

牦牛废弃物对沙化土壤养分淋溶损失的影响

欧盛业¹, 丁黎¹, 余宁尔¹, 吴胜春^{1,2}, 梁鹏^{1,2}

(1. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 浙江省土壤污染生物修复重点实验室, 浙江 杭州 311300)

摘要: 【目的】研究施用不同配比的牦牛 *Bos grunniens* 粪生物质炭和牦牛粪堆肥以及聚丙烯酰胺 (PAM) 对沙化土壤养分淋溶的影响。【方法】在实验室条件下, 设置 8 个处理: 单施堆肥处理, 炭肥混施 (1:1) 处理, 以及单施生物质炭处理。另设定不添加炭肥的空白处理。同时, 在上述同样处理的基础上再对应地添加 PAM, 构成添加 PAM 区组, 开展为期 60 d 的土柱模拟淋溶实验并测定土壤养分。【结果】总体而言, 施用生物质炭或者堆肥都可以增强土壤养分含量, 但炭肥混施的效果要明显优于单施生物质炭或单施堆肥。与空白对照相比, 占土壤质量 3% 的生物质炭及堆肥混施能够显著增加土壤 pH 值, 使土壤呈弱碱性, 有机质质量分数提高 530%, 土壤全氮质量分数提升 255%、硝态氮质量分数提升 24.1%, 总磷质量分数提升 120%, 有效磷质量分数提升 78%, 但对铵态氮效果不显著。此外, 添加 PAM 可以有效降低外源养分的淋溶损失; 根据炭肥混施处理的结果, 全氮淋溶率减少 9.6%, 总磷减少 7.1%。【结论】混施生物质炭及堆肥产品并配合 PAM 可以有效提高土壤养分质量分数, 同时减少养分渗流的发生。图 8 表 1 参 38

关键词: 牦牛粪炭; 牦牛粪堆肥; 沙化土壤; 养分淋溶

中图分类号: S156 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2020)06-1088-09

Application of *Bos grunniens* waste on nutrient leaching reduction for the desertified soil

OU Shengye¹, DING Li¹, YU Ninger¹, WU Shengchun^{1,2}, LIANG Peng^{1,2}

(1. College of Environment and Resources, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Key Laboratory of Soil Bioremediation, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to determine the effects of different proportions of biochar and compost from *Bos grunniens* waste as well as the polyacrylamide (PAM) on nutrient leaching in desertified soil. [Method] Experiment were conducted in the laboratory by using soil column leaching method. All of treatments were divided into two groups, with and without PAM. Additionally, each group include four treatments, *Bos grunniens* biochar only, *Bos grunniens* biochar: *Bos grunniens* compost equal to 1:1, *Bos grunniens* compost only and the control treatment. [Result] (1) In general, the application of biochar or compost can enhance soil nutrients, and the effect of combined application of biochar fertilizer is significantly better than that of single application of biochar or compost. (2) Compared with the control group, the mixed application of biochar and compost (1:1, w/w) with a rate of 3% of soil weight can significantly increase the soil pH and make the soil become weak alkaline: the organic matter content increased by 530% with the addition of biochar and compost, the total nitrogen concentration increased by 255%, with the nitrate nitrogen concentration improved by 24.1% and the total and available phosphorus contents increased by 120% and 78%

收稿日期: 2019-12-02; 修回日期: 2020-06-12

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目 (2015BAC05B05-03)

作者简介: 欧盛业, 从事沙化土壤改良技术研究。E-mail: 464378815@qq.com。通信作者: 梁鹏, 教授, 博士, 从事土壤修复及改良技术研究。E-mail: liangpeng@zafu.edu.cn

respectively, with no significant impact on the ammonium nitrogen content, though. (3) The addition of PAM can effectively reduce the leaching loss of exogenous nutrients with the total nitrogen leaching rate decreased by 9.6% in the presence of biochar and compost and the total phosphorus decreased by 7.1%. [Conclusion] The application of biochar and compost products with the addition of PAM can effectively increase the soil nutrient content while reducing nutrient seepage. [Ch, 8 fig. 1 tab. 38 ref.]

Key words: *Bos grunniens* manure biochar; compost product; desertification soil; nutrient leaching

土地沙漠化是全球性的环境问题。土壤沙化不但使生态环境恶化, 而且对社会经济的可持续发展也产生深远影响^[1]。根据《第 5 次全国荒漠化和沙化状况公报》, 截至 2014 年, 全国沙化土地总面积 172.12 万 km², 占国土总面积的 17.93%。对比《第 4 次全国荒漠化和沙化状况公报》, 虽然土壤沙化总体呈现被遏制的态势, 但沙化治理形势依然严峻, 引起的生态负效益仍不容忽视^[2-3]。四川省阿坝州红原县位于青藏高原东南部四川省阿坝州, 海拔平均 3 552 m, 地势起伏平坦。主要为沼泽、草甸、灌丛、森林四大植被类型, 主要土壤类型为沼泽土、亚高山草甸土、风沙土^[4]。根据当地政府统计数据, 红原县沙化土地面积为 4 450 hm², 轻度沙化面积为 378 hm², 其余为中度沙化土壤; 过度放牧是引起当地土壤沙化的主要成因。该地区年均降水为 754 mm, 80% 是集中在 5-9 月, 而且多为雷阵雨和暴雨^[5]。土壤及养分流失的隐患较为突出。红原发达的畜牧业导致每年产生的牲畜粪便数量惊人, 特别是牦牛 *Bos grunniens* 粪, 仅仅红原县瓦切乡年产生量就高达 59 万 t·a⁻¹。然而, 当地以焚烧作为牦牛粪的主要处理方式, 效率较低。如何充分利用当地丰富的牦牛粪资源开展沙化土壤治理是本研究关注的重点。传统的畜禽粪便就是良好的有机肥料, 含有大量的有机质、矿物质等^[6-7]。此外, 生物质炭是当前废弃物资源化利用的研究热点之一, 国内外学者已经对牛粪热解制备生物质炭以及牛粪生物质炭改良土壤进行了初步的探索。施加适量的生物质炭可改善土壤结构, 增加土壤有机质含量和提高土壤微生物活性, 有利于作物生长发育, 增加产量和农业收益^[8]; DUAN 等^[9] 探讨在牛粪堆肥过程中, 生物质炭单独与菌群改良剂联合使用对改善土壤微生物群落和增强土壤酶活性有积极作用。另有研究表明: 聚丙烯酰胺 (PAM) 可以改善土壤的物理性状^[10], 保持土壤良好的透气性和保水性, 还可以防治水土流失, 与分散的土壤颗粒形成大团聚体, 增强表层的抗冲蚀能力^[11]。目前基于牦牛粪制备生物质炭或者堆肥对土壤改良的研究报道较少。同时, 考虑到红原县沙化土壤特性, PAM 可以有效改变沙化土壤粒径组成, 因此, 本研究以红原县当地丰富的牦牛粪为基质, 制备生物质炭和堆肥产品, 通过实验室模拟研究, 验证炭肥产品的混施以及添加 PAM 来进行沙化土壤改良、以减少渗流造成的土壤养分流失的可行性。

1 材料与方法

1.1 供试肥料及制备方法

土样采自红原县瓦切乡野外沙化草甸的 0~40 cm 土层, 混合均匀后备用。牦牛粪生物质炭、牦牛粪堆肥产品是向当地牧民处购买新鲜牦牛粪进行制备。牦牛粪生物质炭的制备依照丁黎等^[12] 的生物质炭制备方法, 在热解炉中以 600 ℃ 高温热解。牦牛粪堆肥环境为 40 ℃ 恒温大棚。牦牛粪堆肥基本理化性质为有机质 128.30 g·kg⁻¹, 全氮 33.79 g·kg⁻¹, 总磷 7.97 g·kg⁻¹, 全钾 14.35 g·kg⁻¹。牦牛粪基生物质炭基本理化性质为有机碳 357.32 g·kg⁻¹, 全氮 11.85 g·kg⁻¹。PAM 购自山东宝莫生物化工股份有限公司。

1.2 研究方法

1.2.1 实验设计 从 2016 年 9-11 月, 周期为 60 d。淋溶土柱为聚丙烯 (PP) 圆柱体 (图 1), 内径为 9.7 cm, 高为 48.3 cm。用钻孔机在土柱上从下往上每 10 cm 钻 1 个孔, 共 4 个孔, 以此模拟 40 cm 深的土层。每个小孔安装 1 个土壤溶液采集器, 收集土壤浸出液, 模拟水分流失。共设置 4 个处理: 单施堆肥处理 (H₁), 炭肥混施 (1:1) 处理 (H₂), 以及单施生物质炭处理 (H₃), 此外, 另设定不添加炭肥的空白处理 (H₀)。同时, 在上述同样处理的基础上再对应地添加 PAM, 构成添加 PAM 区组 (分别记为 h₀、h₁、h₂、h₃), 共计 8 个处理 (表 1), 每个处理设 3 个重复, 供试土壤有机质质量分数为 19.20 g·kg⁻¹, 全氮 1.71 g·kg⁻¹, 总磷 0.38 g·kg⁻¹, 速效磷 7.7 mg·kg⁻¹。制作土柱时, 首先在土柱 20~40 cm 处加入沙化土壤, 经称量为 1 500 g, 再将改良材料和同质量的 1 500 g 土壤混合均匀后再加入 0~20 cm 土柱, 加入炭

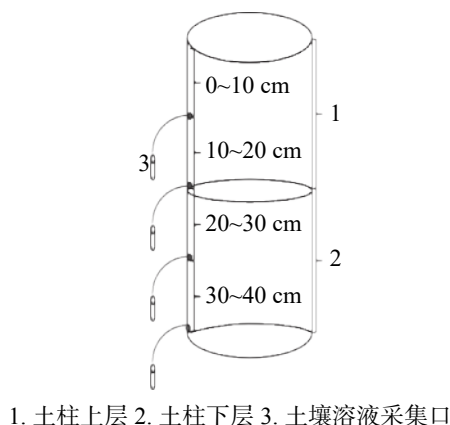


图 1 土柱实验示意图

Figure 1 Schematic diagram of the soil column experiment

表 1 实验设置

Table 1 Experimental treatments				
编号	生物质炭/g	牛粪堆肥/g	聚丙烯酰胺/g	原土/kg
H ₀				3.0
H ₁		45.0		3.0
H ₂	22.5	22.5		3.0
H ₃	45.0			3.0
h ₀			15.0	3.0
h ₁		45.0	15.0	3.0
h ₂	22.5	22.5	15.0	3.0
h ₃	45.0		15.0	3.0

肥改良材料的质量为土壤质量的 3%, 为 45 g。根据红原县当地降雨量, 模拟降水注入超纯水, 2 d 加 1 次水, 每周收集 1 次土壤溶液采集器中的水样。

1.2.2 土壤样品采集及处理 土壤样品的采集时间分别是第 1、15、30、45、60 天, 共 5 次。每次分层采集土柱中的土壤。每次采集用特制的细孔径取土钻取土 20 g。装入自封袋扎孔后放入冻干机中冻干。冻干后用研钵磨细分别过 60 目筛和 100 目筛备用。

1.2.3 分析项目及方法 参照参考文献 [13] 测定分析土壤样品养分, 测定的土壤养分有: 全氮、硝态氮、铵态氮、有机质、土壤 pH、总磷、有效磷。为有效评价 PAM 的添加对外源物质 (耗牛粪炭和堆肥) 中养分淋溶的影响, 用以下公式计算外源养分淋溶率:

$$R = (w_{T2} - w_{ck2}) / (w_{T1} - w_{ck1}) \times 100\%$$

其中: w_{T1} 和 w_{T2} 为处理组, ck 为空白对照组, 1 代表 0~20 cm 土壤上层养分质量分数, 2 代表 20~40 cm 土壤下层养分质量分数, 外源养分淋溶率值越小表示养分淋溶率越低。 $(w_{T2} - w_{ck2})$ 为处理组和对照组下层土壤养分质量分数之差, $(w_{T1} - w_{ck1})$ 为处理组和对照组上层养分质量分数之差。

1.2.4 数据处理 利用 Excel 2003 进行数据处理, 采用 Sigma Plot 13.0 软件制图, 运用 SPASS 22.0 并选择 Brown-Forsythe 和 Tamhane's T2 方法对结果进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 耗牛粪生物质炭及其堆肥对土壤酸碱度的影响

如图 2 所示: 处理 60 d 时, 施用生物质炭和堆肥产品均可以显著提高 0~20 cm 土壤的 pH 值 ($P < 0.05$), 但 20~40 cm 与对照相比差异不显著。总体来说, 在施用 PAM 的区组中 0~20 cm 土壤 pH 值要高于 20~40 cm; 而未施用 PAM 的区组中, 各个土层的 pH 值差异不显著。

2.2 耗牛粪生物质炭及其堆肥对土壤氮质量分数的影响

经统计分析, 60 d 时, h_0 处理在 0~20 cm 土壤全氮质量分数显著低于 h_1 、 h_2 、 h_3 处理 ($P < 0.05$)。与 h_0 相比, h_1 、 h_2 、 h_3 处理土壤全氮质量分数分别增加 163%、255%、227%(图 3A)。而在未添加 PAM 区组中 (图 3B), H_0 在 0~20 cm 土壤全氮质量分数显著低于 H_1 、 H_2 、 H_3 处理 ($P < 0.05$, $F=344$)。与 H_0 相比, H_1 、 H_2 、 H_3 处理分别增加 43.5%、71.2%、54.0%(图 3B)。 H_1 、 H_2 、 H_3 土壤全氮质量分数随着深度增加而下降。

4 个处理中, 未添加 PAM 区组外源养分全氮的淋

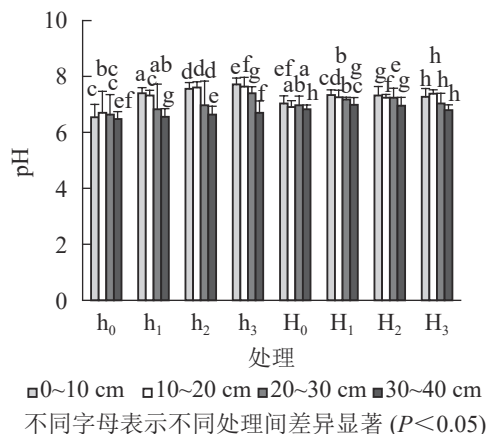


图 2 不同处理 60 d 时土壤 pH 值

Figure 2 pH values in the soils with different treatments at the 60th day

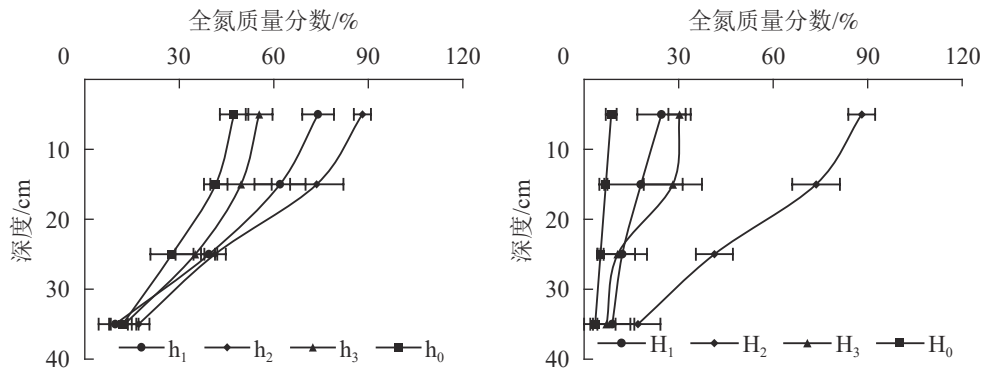


图 3 土壤全氮质量分数

Figure 3 Total nitrogen contents in the soils with different treatments

溶率分别为 23.5%、12.8%、26.5%，而添加 PAM 区组外源养分全氮的淋溶率为 5.4%、3.2%、8.3%。可以发现炭肥混施 (H_2 和 h_2) 在各自处理中淋溶率最低。

在 60 d 时，各处理土壤硝态氮质量分数如图 4。添加 PAM 区组中，0~20 cm 土壤硝态氮质量分数显著高于 20~40 cm，单施生物质炭和炭肥混施效果最显著 ($P < 0.05$)。而在未添加 PAM 区组中， H_1 、 H_2 、 H_3 处理的 20~40 cm 土壤硝态氮质量分数低于 H_0 ，0~20 cm 土壤硝态氮质量分数显著高于 20~40 cm ($P < 0.05$)。与 H_0 相比， H_1 、 H_2 、 H_3 处理分别增加 7.8%、24.1%、19.8%。

图 5 为土壤铵态氮质量分数图。60 d 时，添加 PAM 区组中，0~20 cm 土壤铵态氮质量分数显著高于 20~40 cm ($P < 0.05$)；而未添加 PAM 区组中各处理无显著性差异 ($P > 0.05$)。 H_1 、 H_2 、 H_3 处理外源养分铵态氮淋溶率分别为 40.8%、20.7%、49.2%， h_1 、 h_2 、 h_3 处理外源养分铵态氮淋溶率分别为 34.9%、25.5%、34.8% (图 5)。

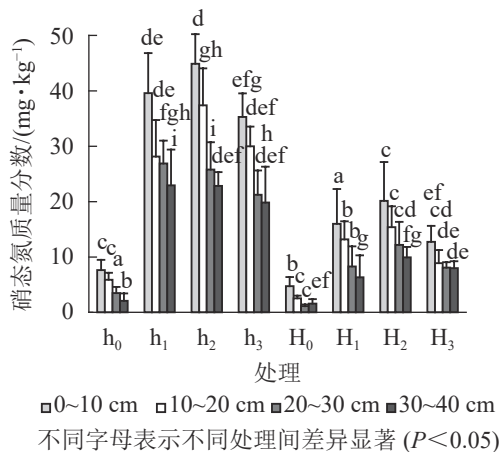


图 4 土壤硝态氮的质量分数

Figure 4 Nitrate nitrogen contents in the soils with different treatments

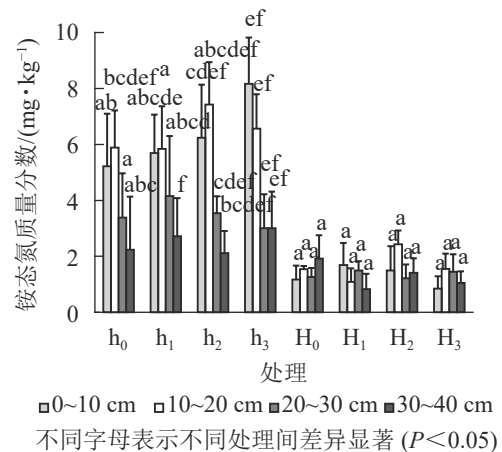


图 5 土壤铵态氮质量分数

Figure 5 Ammonium nitrogen content in the soils with or without PAM for different treatments

2.3 牛粪生物质炭及其堆肥对土壤磷素质量分数及形态的影响

各处理土壤总磷质量分数变化趋势如图 6 所示。除空白处理外，各处理 0~20 cm 土壤中总磷质量分数显著高于 20~40 cm ($P < 0.05$)；20~40 cm 土壤中总磷质量分数在 0~45 d 内呈现上升趋势，在 45 d 后，总磷质量分数下降。60 d 时， H_1 、 H_2 、 H_3 总磷淋溶率分别为 16.5%、11.4%、19.3%，而 h_1 、 h_2 、 h_3 组总磷淋溶率为 6.3%、4.3%、9.1%。

经统计分析，添加 PAM 区组各处理土壤有效磷质量分数存在显著差异 ($P < 0.05$)。0~20 cm 层土壤有效磷质量分数在处理期间整体呈下降趋势，而在 20~40 cm 层土壤中则变化幅度较小 (图 7)。总体来说，未添加 PAM 区组各处理土壤有效磷质量分数存在显著差异 ($P < 0.05$)，20~30 cm 层土壤有效磷质量分数在 0~30 d 表现上升趋势，并在 30 d 达到峰值，随后逐渐下降。

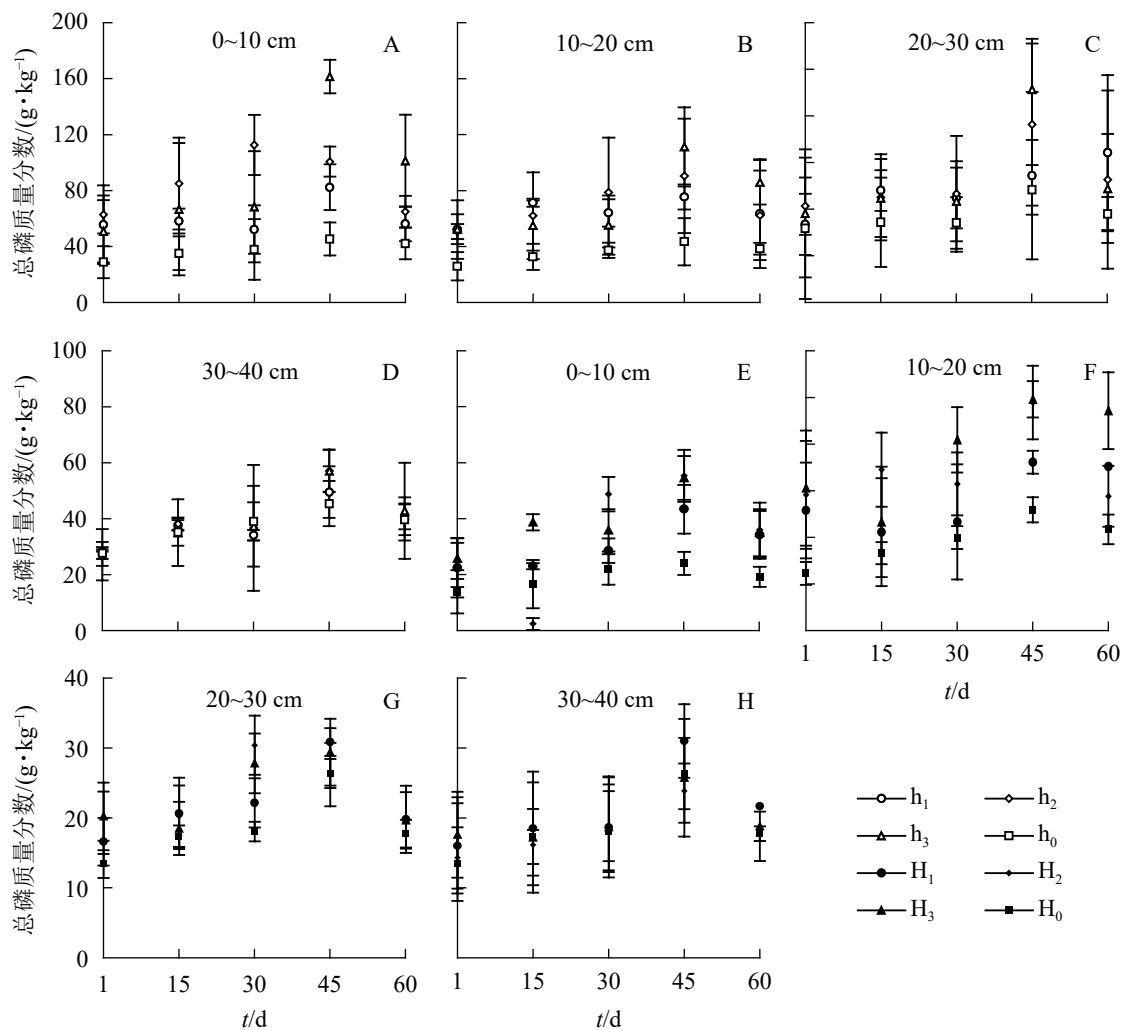


图6 土壤总磷质量分数

Figure 6 Total phosphorus contents in the soils with different treatments

2.4 牛粪生物质炭及其堆肥对土壤有机质质量分数的影响

如图8所示: 60 d时, 添加PAM区组中0~20 cm土壤有机质质量分数高于20~40 cm ($P < 0.05$), 与 h_0 相比, h_1 、 h_2 、 h_3 处理土壤pH分别增加230%、341%、321%。未添加PAM区组中0~20 cm土壤有机质质量分数高于20~40 cm ($P < 0.05$)。与 H_0 相比, H_1 、 H_2 、 H_3 处理有机质质量分数分别增加322%、530%、515%。 H_1 、 H_2 、 H_3 外源养分有机质的淋溶率分别为19.0%、11.2%、15.9%, h_1 、 h_2 、 h_3 组有机质淋溶率为5.1%、1.2%、5.9%。

3 讨论

3.1 生物质炭与堆肥配施对沙化土壤养分质量分数的影响

生物质炭施入土壤后显著提高了土壤pH值, 因为生物质炭表面的—COO—和—O—等有机官能团和生物质炭中的碳酸盐是碱性的主要存在形态^[14]。添加热解生物质炭能提升土壤的pH值, 但畜禽粪便制成的生物质炭因含有更多的灰分, 要较木炭和秸秆有更高的pH值^[15]。有研究表明: 生物质炭对于酸性或者弱酸性沙化土壤提高pH的效果较为理想^[16]。本研究的结果与之相一致, 因为牦牛粪堆肥的pH为7.1, 低于生物质炭^[17]。由此可以得出, 生物质炭与堆肥之比中所占的比例不同, 其对土壤酸碱度的改良程度也不同, 生物质炭所占比例越多则土壤的pH越高。

添加生物质炭可导致土壤水向下迁移速度减慢, 从而使得在一定时间内全氮的淋溶率降低, 这与王燕等^[18]、杨放等^[19]和盖霞普^[20]的研究结果一致, 其原因是生物质炭改变土壤容重和增加孔隙度, 从而提高土壤储水能力, 增加土壤溶液中氮素在各土层中的持留时间, 减少全氮的淋溶量^[21-23]。根据不同处

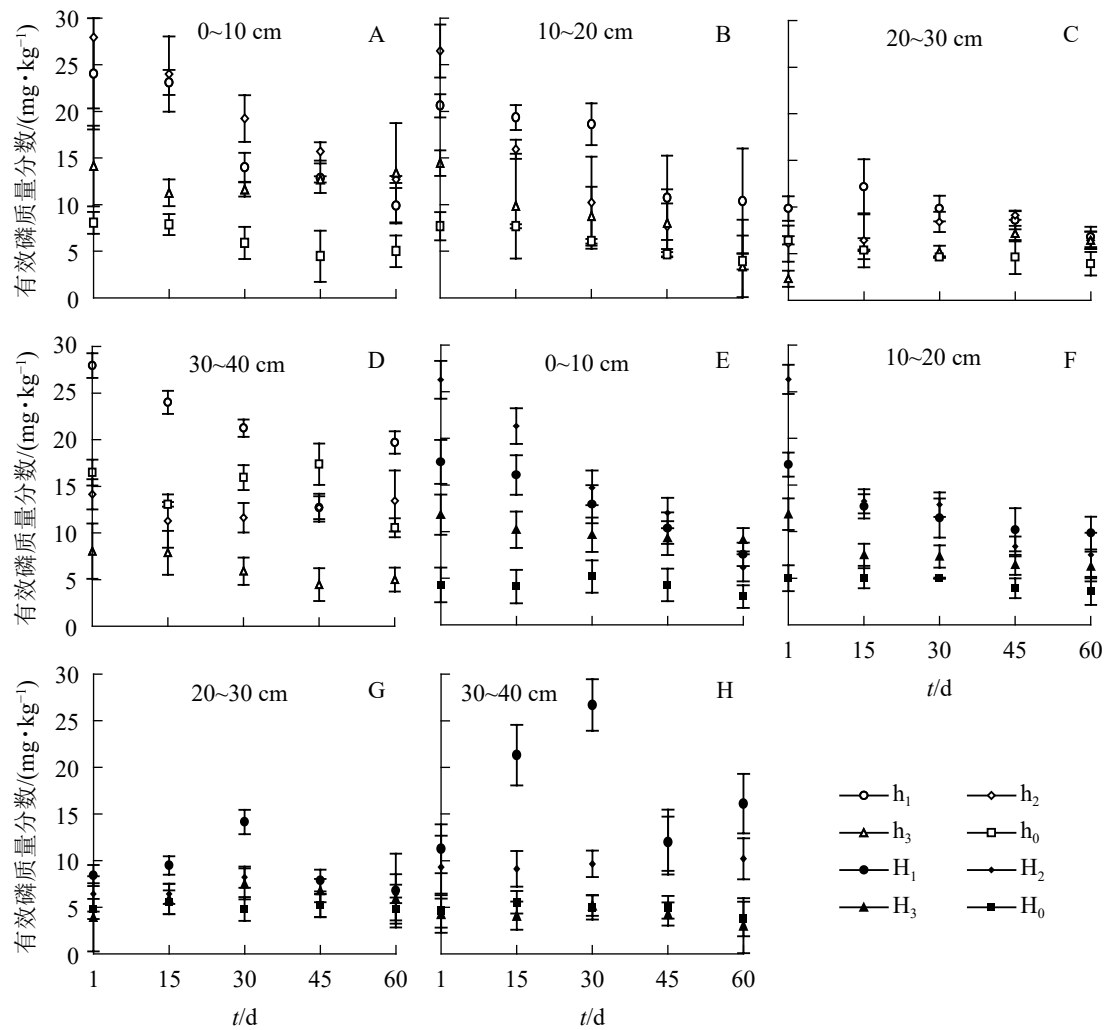


图 7 土壤有效磷质量分数

Figure 7 Available phosphorus contents in the soils with different treatments

理的氮素淋溶率结果可知：单施堆肥效果要优于单施生物质炭，这是由于堆肥氮素含量显著高于生物质炭，而且添加堆肥后可以增加土壤容重减少孔隙度，减少养分淋溶，而炭肥混施后可以抵消单独施用时的养分淋溶和养分含量提升不够的问题，可以显著减少土壤中全氮的淋溶率。

炭肥混施可以增强土壤的硝化作用^[24]，生物质炭通过提高土壤氨氧化细菌的丰度间接促进铵态氮向硝态氮的催化氧化^[25]，堆肥提高土壤中硝化细菌的活性，促进了硝化反应的进程^[26]。研究周期中，硝态氮的淋溶远高于铵态氮，这是由于土壤黏土矿物颗粒带负电，生物质炭表面也带负电，对铵态氮的吸附能力较强^[27]，还有一部分铵态氮通过硝化反应形成硝态氮，而硝态氮带负电荷，不易被土壤吸附，会随着模拟降水不断向下淋溶，使得含量降低^[27]。另外，单施堆肥仅能显著提高土壤中氮素的质量分数，但无法有效抑制养分渗流；而炭肥混施则可有效减少养分的淋溶损失。谢胜禹等^[28]研究表明：加入生物质炭可以降低堆肥中铵态氮的损失。本研究中添加炭肥混施效果最显著，与上述结果相符合。

0~45 d 土壤 30~40 cm 处总磷质量分数呈上升趋势，45 d 后，总磷质量分数表现为下降趋势，只是因为前期上层土壤磷素淋溶，后期上层磷素释放减少。空白对照组中，土壤总磷质量分数随淋溶的进行保持水平，无明显变化；土壤总磷质量分数呈现明显升高趋势的主要原因为生物质炭和堆肥中磷素的释放，土壤有机物料中的水溶性磷与土壤淋溶液中的磷质量分数密切相关^[29]。有研究表示：炭肥混施后，作为外源输入功能材料，直接或间接参与土壤生态系统中的磷素循环，并对土壤磷素物质转化过程产生重要影响^[30]。一方面，生物质炭够吸附土壤中磷元素，减少流失；另一方面，生物质炭热解炭化有机磷化学键的断裂，极大提高了磷的有效性^[31-33]。

有机质质量分数的增加是因为生物质炭和堆肥产品本身能够增加土壤中有机质的质量分数, 生物质炭作为一种本身有着大量有机质的改良剂, 可以提高土壤中有机质的质量分数, 且具有巨大的比表面积和良好的吸附和固定能力, 能吸附土壤中的有机物^[34]。MIDDELBURG 等^[35]研究证实: 生物质炭有助于土壤有机质的积累, 土壤中生物质炭表面可被部分轻度氧化形成羰基、酚基和醌基, 提高土壤的阳离子交换量, 增加对有机质的吸附^[36]。同时堆肥具有很高的有机质含量, 可以显著提高土壤中有机质的质量分数。

3.2 PAM 添加对沙化土壤养分渗流的影响

单施炭肥可以提升土壤中有机质质量分数, 但没有有效改善其渗流的情况。炭肥混施不仅能提高有机质质量分数还能抑制淋溶情况, 添加 PAM 后可以抑制养分渗流的情况。单施炭肥同样无法改善磷素渗流的情况, 炭肥混施后才能有效抑制土壤磷素渗流, 添加 PAM 后外源养分淋溶率下降说明炭肥混施并添加 PAM 可以抑制土壤中磷素的流失。

根据外源养分淋溶率可知, 炭肥混施组中全氮下降 9.6%, 总磷下降 7.4%, 有机质下降 10.1%, 单施炭肥有效降低外源养分淋溶率。因此可知, 添加 PAM 可以显著减少土壤中养分淋溶率。有研究指出: PAM 是通过分子结构中的基键与土壤颗粒间形成吸附力, 维系土壤结构, 防止土壤结皮, 提高土壤入渗率, 减小地表径流, 减轻土壤侵蚀, 增强土壤保肥能力^[37], 与分散的土壤颗粒形成大团聚体, 增强表层的抗冲蚀能力, 大幅度减少土壤中氮磷钾等营养元素的损失^[38]。

4 结论

牦牛粪生物质炭及其堆肥产品混施对川西北沙化土壤养分渗流损失的抑制能力要优于单施生物质炭和单施堆肥处理。炭肥混施能够有效改善土壤的理化性质, 增加土壤全氮、硝态氮、总磷、有效磷和有机质, 分别提升 255%、24%、120%、78%、530%。添加 PAM 可有效减少 0~20 cm 土壤养分渗流, 全氮淋溶率减少 9.6%, 总磷减少 7.1%。因此, 利用红原当地的牦牛粪资源进行沙化土壤治理是确实可行的, 并且可为后续的植被恢复奠定良好的基础。

5 参考文献

- [1] 李秀英. 土地沙化与防沙治沙措施研究[J]. 科技创新与应用, 2013(15): 143.
LI Xiuying. Study on land desertification and sand control measures [J]. *Technol Innovation Appl*, 2013(15): 143.
- [2] 国家林业局. 第 5 次中国荒漠化和沙化状况公报[R/OL]. 2015-12-29[2019-08-13]. <http://www.forestry.gov.cn>.
- [3] 国家林业局. 第 4 次中国荒漠化和沙化状况公报[R/OL]. 2011-01-07[2019-08-13]. <http://www.forestry.gov.cn>.
- [4] 唐学芳, 刘冬梅, 万婷, 等. 川西北高寒草地沙化土壤特征及治理模式探讨: 以阿坝州红原县为例[J]. 四川环境, 2013, 32(6): 11–15.
TANG Xuefang, LIU Dongmei, WAN Ting, et al. Research on soil characteristics of Alpine desertification grassland and treatment model in Hongyuan County, Northwest Sichuan [J]. *Sichuan Environ*, 2013, 32(6): 11–15.
- [5] 王艳, 杨剑虹, 潘洁, 等. 川西北高寒草原退化沙化成因分析: 以红原县为例[J]. 草原与草坪, 2009, 1(1): 20–26.
WANG Yan, YANG Jianhong, PAN Jie, et al. Analysis on the causes of degeneration and sandification of alpine grassland in northwest part of Sichuan Province: Taking Hongyuan County as the example [J]. *Grassland Turf*, 2009, 1(1): 20–26.
- [6] WU Hanjing, MILFORD A H, JONES D D. Thermogravimetric characterization of dairy manure as pyrolysis and combustion feedstocks [J]. *Waste Manage Res*, 2012, 30(10): 1066–1071.
- [7] CANTRELL K B, HUNT P G, UCHIMIYA M, et al. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar [J]. *Bioresour Technol*, 2012, 107: 419–428.

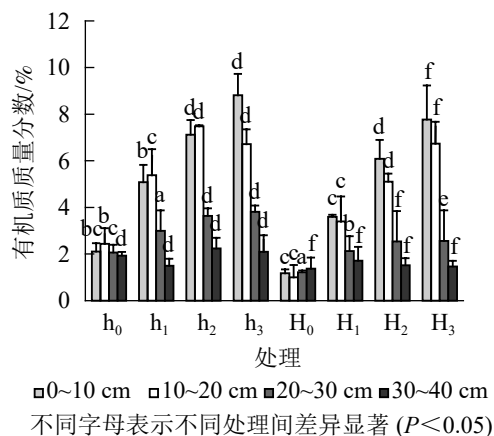


图 8 土壤有机质质量分数

Figure 8 Organic matter contents in the soils with different treatments

- [8] 吴成, 张晓丽, 李关宾. 黑碳吸附汞砷铅镉离子的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(2): 770 – 774.
WU Cheng, ZHANG Xiaoli, LI Guanbin. Sorption of Hg^{2+} , As^{3+} , Pb^{2+} and Cd^{2+} by Black Carbon [J]. *J Agro Environ Sci*, 2007, **26**(2): 770 – 774.
- [9] DUAN Yumin, AWASTHI S K, LIU Tao, *et al.* Positive impact of biochar alone and combined with bacterial consortium amendment on improvement of bacterial community during cow manure composting [J]. *Bioresour Technol*, 2019, **280**: 79 – 87.
- [10] 曹丽花, 赵世伟, 梁向锋, 等. PAM 对黄土高原主要土壤类型水稳性团聚体的改良效果及机理研究[J]. *农业工程学报*, 2008, **24**(1): 45 – 49.
CAO Lihua, ZHAO Shiwei, LIANG Xiangfeng, *et al.* Improvement effects of PAM on soil water stable aggregates and its mechanisms in different soils in the Loess Plateau [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2008, **24**(1): 45 – 49.
- [11] 刘纪根, 张平仓, 陈展鹏. 聚丙烯酰胺对扰动红壤可蚀性及临界剪切力的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, **26**(7): 45 – 49.
LIU Jigen, ZHANG Pingcang, CHEN Zhanpeng. Effects of polyacrylamide(PAM) on soil erodibility and critical shear stresses for disturbed red soil [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2010, **26**(7): 45 – 49.
- [12] 丁黎. 羊粪炭化及堆肥产品对沙化土壤改良的研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.
DING Li. *The Effect of Sheep Dung Biochar and Composting Products on the Nutrient Improvement of Sandy Soil*[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2018.
- [13] 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, 1999.
- [14] 潘凤娥, 索龙, 胡俊鹏, 等. 生物质炭对砖红壤 pH 及养分含量影响研究[J]. *热带农业科学*, 2015, **35**(9): 25 – 29.
PAN Fenge, SUO Long, HU Junpeng, *et al.* Effect of biochar on the pH and nutrient content in latosol [J]. *Trop Agric Sci*, 2015, **35**(9): 25 – 29.
- [15] 谢祖彬, 刘琦, 许燕萍, 等. 生物炭研究进展及其研究方向[J]. *土壤*, 2011, **43**(6): 857 – 861.
XIE Zubin, LIU Qi, XU Yanping, *et al.* Advances and perspectives of biochar research [J]. *Soils*, 2011, **43**(6): 857 – 861.
- [16] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(4): 779 – 785.
YUAN Jinhua, XU Renkou. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions [J]. *J Ecol Environ*, 2011, **20**(4): 779 – 785.
- [17] 蔡娟, 张应虎, 张昌勇, 等. 牛粪堆肥过程中的物质变化及腐熟度评价[J]. *贵州农业科学*, 2018, **46**(10): 72 – 75.
CAI Juan, ZHANG Yinghu, ZHANG Changyong, *et al.* Material change and rotten degree evaluation in cattle dung composting process [J]. *Guizhou Agric Sci*, 2018, **46**(10): 72 – 75.
- [18] 王燕, 庞卓, 贾月, 等. 生物炭对北京郊区砂土持水力和氮淋溶特性影响的土柱模拟研究[J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(9): 1820 – 1828.
WANG Yan, PANG Zhuo, JIA Yue, *et al.* Effects of biochar on water holding capacity and nitrogen leaching of sandy soil column from a Beijing suburb [J]. *J Agro Environ Sci*, 2017, **36**(9): 1820 – 1828.
- [19] 杨放, 李心清, 刑英, 等. 生物炭对盐碱土氮淋溶的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(5): 972 – 977.
YANG Fang, LI Xinqing, XING Ying, *et al.* Effect of biochar smendment on nitrogen leaching in saline soil [J]. *J Agro Environ Sci*, 2014, **33**(5): 972 – 977.
- [20] 盖霞普, 刘宏斌, 翟丽梅, 等. 玉米秸秆生物炭对土壤无机氮素淋失风险的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(2): 310 – 318.
GAI Xiapu, LIU Hongbin, ZHAI Limei, *et al.* Effects of corn stalk biochar on inorganic nitrogen leaching from soil [J]. *J Agro Environ Sci*, 2015, **34**(2): 310 – 318.
- [21] 郑瑞伦, 王宁宁, 孙国新, 等. 生物炭对京郊沙化地土壤性质和苜蓿生长、养分吸收的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(5): 904 – 912.
ZHENG Ruilun, WANG Ningning, SUN Guoxin, *et al.* Effects of biochar on soil properties and alfalfa growth and nutrient uptake in desertified land in Beijing suburb [J]. *J Agro Environ Sci*, 2015, **34**(5): 904 – 912.
- [22] ZHENG Hao, WANG Zhenyu, DENG Xia, *et al.* Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil [J]. *Geoderma*, 2013, **206**: 32 – 39.
- [23] ULYEET J, SAKRABANI R, KIBBLEWHITE M, *et al.* Impact of biochar addition on water retention, nitrification and carbon dioxide evolution from two sandy loam soils [J]. *Eur J Soil Sci*, 2014, **1**: 96 – 104.

- [24] 何飞飞, 梁运珊, 吴爱平, 等. 不同生物炭用量对酸性菜地土硝化作用的影响[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(9): 2376 – 2383.
HE Feifei, LIANG Yunshan, WU Aiping, *et al.* Effect of biochar on nitrification from vegetable planting acid soil [J]. *Acta Sci Circumst*, 2014, **34**(9): 2376 – 2383.
- [25] GUNDALE M J, DELUCA T H. Charcoal effects on soil solution chemistry and growth of *Koeleria macrantha* in the ponderosa pine/Douglas fir ecosystem [J]. *Biol Fert Soil*, 2007, **3**: 303 – 311.
- [26] DELUCA T H, MACKENZIE M D, GUNDALE M J. *Biochar Effects on Soil Nutrient Transformations* [M]. London: Earthscan Publications Ltd, 2009.
- [27] 王静, 付伟章, 葛晓红, 等. 玉米生物炭和改性炭对土壤无机氮磷淋失影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(12): 2810 – 2820.
WANG Jing, FU Weizhang, GE Xiaohong, *et al.* Effects of corn biochar and modified carbon on leaching of inorganic nitrogen and phosphorus in soil [J]. *J Agro Environ Sci*, 2018, **37**(12): 2810 – 2820.
- [28] 谢胜禹, 余广伟, 潘兰佳, 等. 添加生物炭对猪粪好氧堆肥的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(6): 1365 – 1372.
XIE Shengyu, YU Guangwei, PAN Lanjia, *et al.* Influence of biochar on the aerobic compost of pig manure [J]. *J Agro Environ Sci*, 2019, **38**(6): 1365 – 1372.
- [29] SMEBYE A, ALLIN G V, VOGT R D, *et al.* Biochar amendment to soil changes dissolved organic matter content and composition [J]. *Chemosphere*, 2016, **142**: 100 – 105.
- [30] 张宝贵, 李贵桐. 土壤生物在土壤磷有效化中的作用[J]. 土壤学报, 1998, **35**(1): 104 – 111.
ZHANG Baogui, LI Guitong. The role of soil organisms in the activation of soil phosphorus [J]. *Acta Pedol Sin*, 1998, **35**(1): 104 – 111.
- [31] 刘玉学, 唐旭, 杨生茂, 等. 生物炭对土壤磷素转化的影响及其机理研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, **22**(6): 1690 – 1695.
LIU Yuxue, TANG Xu, YANG Shengmao, *et al.* Review on the effect of biochar on soil phosphorus transformation and mechanisms [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2016, **22**(6): 1690 – 1695.
- [32] ANGST T E, SOHI S P. Establishing release dynamics for plant nutrients from biochar [J]. *GCB Bioenergy*, 2013, **2**: 221 – 226.
- [33] STREUBEL J D, COLLINS H P, GARCIA-PEREZ M, *et al.* Influence of contrasting biochar types on five soils at increasing rates of application [J]. *Soil Sci Soc Am*, 2011, **75**(4): 1402 – 1413.
- [34] 袁耀, 郭建斌, 尹诗萌, 等. 自制环保型土壤改良剂对一年生黑麦草生长的作用[J]. 草业学报, 2015, **24**(10): 206 – 213.
YUAN Yao, GUO Jianbin, YIN Shimeng, *et al.* Effect of soil conditioner on the growth of *Lolium multiflorum* [J]. *Acta Pratac Sin*, 2015, **24**(10): 206 – 213.
- [35] MIDDELBURG J J, NIEUWENHUIZE J, van BREUGEL P. Black carbon in marine sediments [J]. *Marine Chem*, 1999, **65**(3/4): 245 – 252.
- [36] GLASER B, HAUMAIER L, GUGGENBERGER G, *et al.* Black carbon in soils: the use of benzenecarboxylic acids as specific markers [J]. *Orga Geochem*, 1998, **29**(4): 811 – 819.
- [37] 陆绍娟, 王占礼. 土壤改良剂聚丙烯酰胺的研究进展[J]. 人民黄河, 2016, **38**(7): 73 – 77.
LU Shaojuan, WANG Zhanli. Research progress of soil conditioner polyacrylamide [J]. *Yellow River*, 2016, **38**(7): 73 – 77.
- [38] 王辉, 王全九, 邵明安. PAM 对黄土坡地水分养分迁移特性影响的室内模拟试验[J]. 农业工程学报, 2008, **24**(6): 85 – 88.
WANF Hui, WANG Quanjia, SHAO Mingan. Laboratory simulation experiment of impact of polyacrylamide on transportation of soil water and nutrients from the loess sloping land [J]. *Trans CSAE*, 2008, **24**(6): 85 – 88.