



不同改良剂对珊瑚砂理化性质和氮素固持的影响

陈涵, 邹碧, 李应文, 李泳兴, 李志安, 陈慧娟, 王法明

引用本文:

陈涵, 邹碧, 李应文, 李泳兴, 李志安, 陈慧娟, 王法明. 不同改良剂对珊瑚砂理化性质和氮素固持的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2024, 32(1): 10–16.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4847>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

珊瑚岛礁表层土壤的主要化学性质分析

Main Chemical Properties in the Surface Soil of the Coral-sand Islands

热带亚热带植物学报. 2018, 26(5): 465–472 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3852>

滨豇豆的生态生物学特征

Ecological and Biological Characteristics of *Vigna marina*

热带亚热带植物学报. 2019, 27(1): 83–89 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3923>

热带滨海植物红厚壳的抗逆生物学特性

Stress Resistance Characteristics of *Calophyllum inophyllum*, A Tropical Beach Plant

热带亚热带植物学报. 2019, 27(4): 391–398 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4043>

三种适生植物对热带珊瑚岛胁迫生境的生理生化响应

Physiological and Biochemical Responses of Three Species to Environment Stresses of Tropical Coral Islands

热带亚热带植物学报. 2017, 25(6): 562–568 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3755>

海刀豆的抗逆生理生化特征分析

Physiology and Biochemical Characteristics of *Canavalia maritima* under Stress

热带亚热带植物学报. 2019, 27(2): 157–163 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3961>

向下翻页, 浏览PDF全文

不同改良剂对珊瑚砂理化性质和氮素固持的影响

陈涵¹, 邹碧¹, 李应文¹, 李泳兴¹, 李志安¹, 陈慧娟^{2*}, 王法明^{1*}

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 广东省科学院生态环境与土壤研究所, 广州 510650)

摘要: 高碱环境和土壤养分的匮乏严重限制了我国热带珊瑚岛土壤环境下植物的生长适应能力, 因此, 珊瑚砂改良对促进珊瑚岛植被恢复, 维持珊瑚岛生态环境可持续健康发展具有重要意义。该研究通过室内土柱模拟试验, 对比了同一梯度下 4 种常用土壤改良材料(蛭石、珍珠岩、生物炭和钙基膨润土)对珊瑚砂理化性质、氮素淋溶以及总氮含量的影响。结果表明, 与对照(CK)相比, 施用生物炭使珊瑚砂 pH 显著降低 1.4%, 钙基膨润土、生物炭和蛭石能够显著提高珊瑚砂的阳离子交换量至 CK 的 24.21、10.43 和 9.43 倍。同时, 施用生物炭、钙基膨润土和蛭石并不能降低以硝态氮形式为主的氮素淋失, 但是能显著减少其他途径的氮素损失, 从而达到促进珊瑚砂氮素固持的效果, 3 种改良剂施用下的珊瑚砂总氮损失相较于 CK 分别降低了 40.92%、27.32% 和 25.09%。因此, 施用生物炭、钙基膨润土和蛭石均能有效提高珊瑚砂土壤质量, 对改良珊瑚砂和热带珊瑚岛植被恢复具有重要意义, 其中生物炭的改良效果最为显著, 是改良珊瑚砂的理想材料。

关键词: 珊瑚砂; 土壤改良; 氮肥淋失; 氮素固持

doi: 10.11926/jtsb.4847

Effects of Different Amendments on Physicochemical Properties and Nitrogen Fixation in Coral Sands

CHEN Han¹, ZOU Bi¹, LI Yingwen¹, LI Yongxing¹, LI Zhian¹, CHEN Huijuan^{2*}, WANG Faming^{1*}

(1. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. Institute of Eco-environmental and Soil Sciences, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: The adaptability of plant growth in soil conditions on Chinese tropical coral islands is severely limited by the alkaline environment and soil nutrient deficiencies. Improving coral sand is essential to facilitate the rejuvenation of coral island vegetation and maintain the healthy development of the coral island ecosystem. In this study, we investigated the effects of four common soil amendment materials (vermiculite, perlite, biochar and calcium-based bentonite) on the physicochemical properties, nitrogen leaching and total nitrogen content of coral sand under the same gradient using an indoor soil column simulation test. The results showed that the application of biochar significantly reduced the pH of coral sand by 1.4% compared to the control (CK), and calcium-based bentonite, biochar, and vermiculite were able to significantly increase the cation exchange capacity of coral sand to 24.21, 10.43, and 9.43 times that of CK. Meanwhile, during the leaching process, nitrogen was rapidly leached out mainly in the form of nitrate nitrogen, and the application of biochar, calcium-based bentonite and vermiculite could not reduce the nitrogen leaching loss, but it could achieve the effect of promoting nitrogen fixation in coral sands by promoting nitrogen fixation through other pathways, which resulted in the reduction of total soil nitrogen loss under the addition of the three amendments versus CK by 40.92%, 27.32% and 25.09%, respectively. The

收稿日期: 2023-09-13 接受日期: 2023-10-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3100402); 广东省科技计划野外科学考察项目(2021B1212110004)资助

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2021YFC3100402), and the Project for Field Scientific Expedition of Guangdong Science and Technology Plan (Grant No. 2021B1212110004).

作者简介: 陈涵(1999 年生), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤改良研究。E-mail: ch870872335@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangfm@scbg.ac.cn; hjchen@soil.gd.cn

utilization of biochar, vermiculite and calcium-based bentonite can therefore effectively improve the quality of coral sand soil, which is of great significance for the improvement of coral sand and the restoration of tropical coral island vegetation, among which biochar has the most significant improvement effect and is the ideal material for the improvement of coral sand.

Key words: Coral sand; Soil amendment; Nitrogen fertilizer leaching; Nitrogen sequestration

珊瑚砂广泛分布于热带珊瑚岛, 是一种由有孔虫、珊瑚虫等海洋生物残骸碎裂堆积而成的砂状土壤^[1-3], 其中含有大量的钙(Ca)和镁(Mg)元素, 使其呈现高碱性特征^[4-5]。同时, 珊瑚砂中缺乏黏性颗粒以及有机和无机胶体, 吸附和维持养分的能力匮乏, 导致珊瑚砂保水保肥能力差, 极度缺乏氮素^[6], 加上热带珊瑚岛高盐高温, 存在明显干湿季分界, 直接影响了植株存活率, 严重阻碍了热带珊瑚岛的植被建立^[7]。因此, 对珊瑚砂进行土壤改良, 降低碱度对植物胁迫, 同时提升珊瑚砂对植物生长所需养分的固持和供给, 对促进珊瑚岛植被建立, 改善珊瑚岛环境条件, 推动当地经济以及岛屿生态系统可持续健康发展具有至关重要的意义^[8-9]。

目前, 针对珊瑚砂与石灰土等钙质碱性土以及盐碱地土壤, 施用土壤改良剂进行改土是提高土壤肥力、改善土壤结构、增强持水能力和保持养分的有效途径, 具有经济、环保、起效快且作用持久等特点^[10-12]。蛭石、珍珠岩和钙基膨润土是近年来应用较为广泛的土壤改良剂, 能够改善土壤结构, 提高土壤吸水保水能力以及矿质营养^[13-14]。李素艳等^[15]研究表明, 蛭石具有较好的降盐效果, 能够有效抑制滨海盐碱土碱化, 并提高土壤孔隙度, 降低土壤容重。李志安等^[16]研究表明, 在珊瑚砂中施加蛭石、珍珠岩以及钙基膨润土等能够改善珊瑚砂土壤结构, 显著提高珊瑚砂保水保肥能力。生物炭是由动植物残体在缺氧或低氧环境下, 经由长时间高温热解所产生的一类具有稳定结构、高度芳香化且富含碳素的固态物质。因其极具稳定性以及特殊的分子结构, 在近年来成为农林生态系统、土壤环境改良等研究领域关注的焦点^[17-18]。冉成等^[19]研究表明, 向盐碱地稻田土中施加生物炭在显著提高土壤总氮的同时, 降低碱解氮、铵态氮含量。孙嘉曼等^[20]通过向喀斯特山地石灰土中施加生物炭, 认为生物炭处理有利于改善石灰土水分, 提高土壤有机质和氮磷养分含量。然而, 通过施加土壤改良剂对土壤进行改良的研究多集中在盐碱地和石漠化治理等领域^[21-22], 针对珊瑚砂进行土壤改良的研究极其

缺乏。

因此, 本研究在基于前期试验结果的基础上, 以珊瑚砂作为研究对象, 采用 3% 的比例添加生物炭、蛭石、珍珠岩和钙基膨润土作为土壤改良剂, 在添加氮肥并模拟间歇性降雨的条件下, 开展土柱淋溶试验。通过分析不同土壤改良材料添加对珊瑚砂理化性质、养分淋溶和固持能力的影响, 筛选适合珊瑚砂改良的理想材料。本研究的结果可为热带珊瑚岛土壤管理和可持续发展提供科学依据和指导, 同时也为其它类似环境下的生态系统土壤改良提供了理论与实践支持。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验选取 4 种常见的土壤改良剂, 包括蛭石(购自北京赛欧华创科技有限公司)、珍珠岩(购自柏吉生物科技有限公司)、钙基膨润土(购自上海颖心实验室设备有限公司)和生物炭。生物炭的制备过程是将玉米秸秆在 500 °C、真空条件下缓慢热解 3 h 后, 再将所得产物与去离子水按质量比 1:50 放入密封容器中反复洗涤, 直至上清液电导率稳定后, 置于 105 °C 烘箱中烘干后得到^[23]。试验中使用的氮肥为尿素(氮含量 46.7%), 购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司。供试土壤于 2022 年 8 月从海南省采集, 该土壤区域年均降雨量为 2 000 mm, 属于热带海洋性季风气候。试验土壤样品经自然风干, 去除肉眼可见的石块、根系和杂物后保存备用。供试土壤的 pH 值为 9.65, 阳离子交换量为 0.04 cmol/kg, 电导率为 126 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 容重为 1.45 g/cm^3 , 有机碳、全氮和全磷含量分别为 2.342、0.529、0.129 g/kg 。

1.2 试验设计

试验开展于 2023 年 2 月—3 月, 地点位于华南国家植物园科研区温室, 室内温度约为 25 °C。试验装置为内径 4 cm、高 25 cm 的透明玻璃圆管, 底部设置出水口, 在装置底部管口处放有 1 层 120 目的尼龙纱网, 并于管底铺上 2 cm 厚, 粒径为 1~2 mm

经过酸洗处理的石英砂,防止土壤基质流失。淋溶过程中采用蠕动泵控制淋溶过程中水的流速。在正式装填之前,用凡士林均匀涂抹圆柱管内壁,避免土壤基质与管壁之间产生间隙,防止捷径式下渗导致贴壁优先流的发生^[24]。装填土柱时,将 240 g 土壤和土重 3% 的改良材料与 0.06 g 氮肥充分混匀,再将混合后的土壤分 2 层依次装入压实,以减少边缘效应^[25],其中 0~5 cm 为一层,5~15 cm 为一层,最终形成柱高 15 cm,重 247.2 g 的土柱。试验共设置 5 个处理,每处理重复 4 次。试验采用的改良材料的基本理化性质如表 1 所示。

表 1 供试土壤改良剂基本性质

Table 1 Basic properties of soil amendments used in this study

处理 Treatment	改良材料 Amendment	pH	阳离子交换量 (cmol/kg) Cation exchange capacity	总氮 (g/kg) Total nitrogen	总磷 (g/kg) Total phosphorus
对照 CK	-	9.65	0.04	0.529	0.129
生物炭 Biochar	生物炭 Biochar	9.52	0.43	11.273	3.546
蛭石 Vermiculite	蛭石 Vermiculite	8.79	0.39	0.054	0.238
珍珠岩 Perlite	珍珠岩 Perlite	7.12	0.09	0.004	0.013
钙基膨润土 Calcium-based bentonite	钙基膨润土 Calcium-based bentonite	8.96	0.87	0.073	0.043

1.3 方法

土壤基本理化性质参照《土壤农业化学分析方法》^[30]进行分析。土壤和改良材料的总氮(TN)使用浓硫酸消煮法处理。淋溶液中的铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)在经过过滤后置于-20 °C 冷冻保存待测, TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法进行测定。土壤和淋溶液中的 TN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 均通过间断化学分析仪(SKALAR BluVison™ Netherlands)进行测定。pH 值使用 METTLER TOLEDO 公司生产的台式 pH 计测定。阳离子交换量(CEC)使用三氯化六氨合钴浸提-分光光度法进行测定。

土壤 TN 损失量=试验开始时土壤 TN 含量-试验结束时土壤 TN 含量;土壤 TN 淋失量=各次淋溶液中 TN 含量之和;土壤其他途径损失=土壤 TN 损失量-土壤 TN 淋失量。

1.4 数据的统计分析

采用 Microsoft Excel 2021 进行数据处理,采用 SPSS 25.0 软件对试验测定指标进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)和邓肯(Duncan)多重比较检验($\alpha=0.05$)。采用 Python (Spyder v.5.3.3)和 Origin 2021 进行数据可视化分析。

试验根据采样点的降雨情况确定淋溶进水量。具体而言,淋溶进水量等于模拟土柱内横截面积与年均降雨量的乘积(2 513.27 mL),考虑到采样点存在地表径流和蒸发损失过程(损失量按照 60%计算)。最终的进水量为 1 005.31 mL^[26-28]。淋溶过程中采用间歇淋溶^[29]的方式并收集淋溶液。试验开始前加入 1 000 mL 去离子水,使土壤水分接近田间饱和和持水量,并在室温下放置 1 d。随后每隔 3 d 加入 83.78 mL 去离子水,共进行 7 次淋溶。在淋溶完成后,将塑料瓶盖上并迅速转移至-20 °C 冰箱保存待测。

2 结果和分析

2.1 改良材料对土壤 pH 和阳离子交换量(CEC)的影响

由表 2 可知,不同处理下珊瑚砂 pH 和 CEC 存在显著差异。与 CK 相比,生物炭添加显著降低了珊瑚砂的 pH 值($P<0.05$),降低了 1.4%,其余处理对珊瑚砂 pH 无显著影响。钙基膨润土、生物炭和蛭石均显著提高了珊瑚砂 CEC,分别为 CK 的 24.21、10.43 和 9.43 倍,珍珠岩对珊瑚砂 CEC 无显著影响。

表 2 不同处理对土壤 pH 和阳离子交换量(CEC)的影响

Table 2 Effect of different treatments on soil pH and cation exchange capacity

处理 Treatment	pH	CEC (cmol/kg)
对照 CK	9.34±0.07 a	0.04±0.02 c
蛭石 Vermiculite	9.28±0.02 ab	0.33±0.02 b
生物炭 Biochar	9.21±0.08 b	0.37±0.02 b
珍珠岩 Perlite	9.29±0.03 ab	0.07±0.04 c
钙基膨润土 Calcium-based bentonite	9.35±0.07 a	0.85±0.06 a

数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Data followed different letters indicate significant differences at 0.05 level.

2.2 改良材料对淋溶液 NH₄⁺-N 浓度的影响

由图 1 可见, 各处理淋溶液 NH₄⁺-N 浓度均随时间呈下降趋势。首次淋溶过程中, 各处理淋溶液中 NH₄⁺-N 浓度存在显著差异($P<0.05$), 与 CK 相比, 生物炭处理下淋溶液 NH₄⁺-N 浓度显著增长了 17.71%, 珍珠岩、钙基膨润土和蛭石处理则分别降低了 13.03%、62.65%和 79.63%。

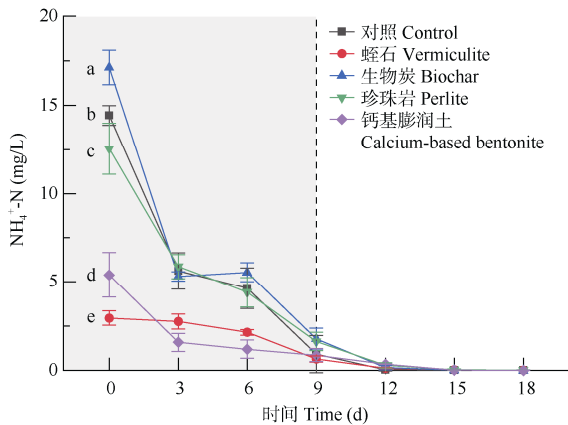


图 1 不同处理下淋溶液中 NH₄⁺-N 浓度的变化。灰色: 快速淋失阶段; 白色: 浓度稳定阶段。下同

Fig. 1 Changes in ammonium nitrogen concentration of leachate under different treatments. Grey: Rapid leaching phase; White: Concentration stabilisation phase. The same below

2.3 改良材料对淋溶液 NO₃⁻-N 浓度的影响

由图 2 可见, 各处理淋溶液 NO₃⁻-N 浓度均随时间迅速下降。在首次淋溶过程中, 各改良剂添加均显著提高淋溶液中 NO₃⁻-N 浓度($P<0.05$), 由大到小依次为: 生物炭、蛭石、钙基膨润土和珍珠岩, 与 CK 相比分别增加 93.54%、66.28%、16.06%和 10.24%。

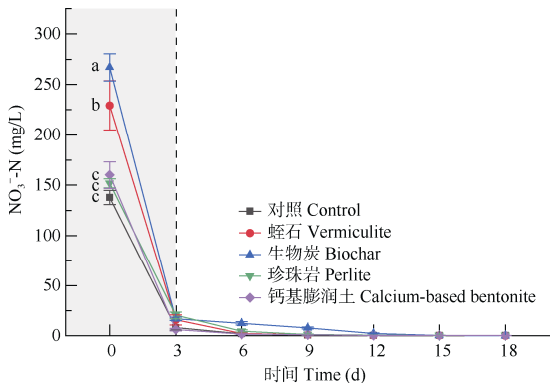


图 2 不同处理下淋溶液中 NO₃⁻-N 浓度的变化

Fig. 2 Changes in nitrate nitrogen concentration of leachate under different treatments

2.4 改良材料对淋溶液 TN 浓度变化

由图 3 可见, 各处理淋溶液 TN 浓度均随时间迅速下降。在首次淋溶过程中, 各改良剂添加均显著提高了淋溶液中 TN 浓度($P<0.05$), 由大到小依次为生物炭、蛭石、钙基膨润土和珍珠岩, 与 CK 相比, 分别增加了 86.30%、56.85%、10.91%和 7.28%。

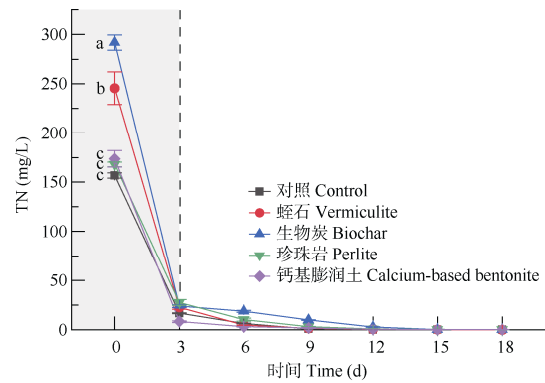


图 3 不同处理下淋溶液 TN 浓度的变化趋势

Fig. 3 Changes in total nitrogen concentration of leachate under different treatments

2.5 改良剂对珊瑚砂氮素损失的影响

由图 4 可见, 改良剂添加在不同的氮素损失途径上存在促进和抑制 2 种相反的结果。一方面, 生物炭、蛭石和珍珠岩加剧了珊瑚砂 TN 的淋溶损失, 另一方面, 生物炭、蛭石和钙基膨润土抑制了珊瑚砂其他途径的 TN 损失, 但其他途径抑制的氮素损失量高于淋溶损失量, 最终在总体上显著降低珊瑚砂的 TN 损失($P<0.05$)。与 CK 相比, 生物炭、蛭石和钙基膨润土分别减少了 40.92%、27.32%和 25.09%的 TN 损失, 而珍珠岩添加影响不显著。

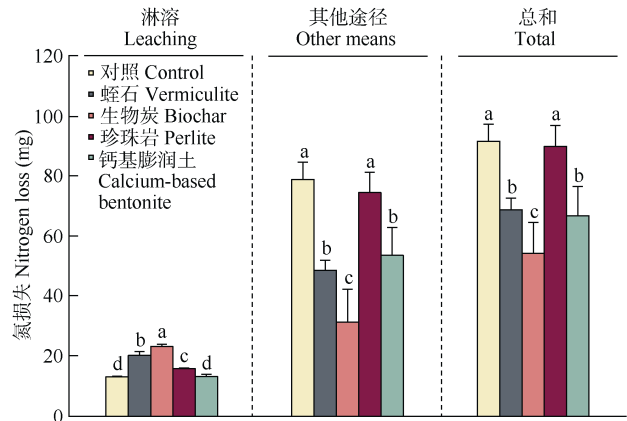


图 4 改良剂对珊瑚砂氮素损失的影响

Fig. 4 Effect of amendments on nitrogen loss of coral sand

3 讨论和结论

3.1 改良剂对珊瑚砂 pH 和 CEC 的影响

生物炭添加显著降低了珊瑚砂的 pH 值, 而蛭石、珍珠岩以及钙基膨润土添加对珊瑚砂 pH 无显著影响。这可能是因为相比于颗粒较大的蛭石、珍珠岩以及钙离子含量较高的钙基膨润土, 生物炭的多孔结构及较大的比表面积使其能更好地与珊瑚砂相结合, 减小土壤容重的同时增加土壤孔隙度, 增强珊瑚砂盐分淋洗, 进而在一定程度上降低珊瑚砂 pH^[31]。与此同时, 蛭石、生物炭和钙基膨润土对珊瑚砂 CEC 均表现出显著的促进作用, 这与改良材料自身的特性有关。蛭石、生物炭以及钙基膨润土在比表面积、孔隙体积以及表面活性位点等方面优于其他改良材料, 使他们具有良好的吸附性和离子交换能力, 能够增加土壤胶体的交换点位, 提高土壤 CEC^[32-33]。

3.2 改良剂对氮素淋溶的影响

淋溶初期, 各改良材料添加下淋溶液中 NO₃⁻-N 浓度与淋失速度均高于 NH₄⁺-N, 且淋失趋势与淋溶液 TN 淋失趋势一致, 说明氮素在珊瑚砂中主要以 NO₃⁻-N 的形式快速淋失, 这与前人的研究结果一致^[25]。这是因为土壤对 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 的吸附特性不同, NO₃⁻-N 难以被土壤胶体所吸附, 在土体中随水运移能力强, 而 NH₄⁺-N 则易被土壤中的胶体和矿物吸附固定, 在土壤中的持留能力更强^[34-35]。随着淋溶过程的进行, 各处理下的淋溶液 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 浓度迅速下降, 说明氮素在珊瑚砂中的淋失速度极快, 这可能与珊瑚砂极度缺乏有机及无机胶体, 导致珊瑚砂对养分的吸附固持能力较弱有关。

同时, 各改良材料添加在试验初期均对 NO₃⁻-N 的淋失表现出不同程度的促进作用, 这可能与土壤环境的改变有关, 改良剂添加提高了土壤孔隙度^[10], 改善了土柱中的土壤通气环境, 从而提高了土壤中硝化、亚硝化细菌的活性, 硝化作用增强, 最终导致淋溶液中的 NO₃⁻-N 浓度升高。试验后期, 随着淋溶过程中氮素的大量淋失, 加上土壤湿度的持续上升, 通气条件下降, 土壤中硝化作用受到抑制^[36], 使得淋溶液中 NO₃⁻-N 浓度逐渐降低。此外, 生物炭处理下土壤淋溶液中的 NH₄⁺-N 浓度反而增加, 这可能与生物炭添加对土壤微生物群落的影响有关, 生物炭在短期内增加可溶性活性碳源, 能够促进土壤微生物生长代谢^[37], 从而增加土壤微生物的生物量和活性, 促进氨化过程产生更多的 NH₄⁺-N。

3.3 改良剂对珊瑚砂 TN 损失的影响

为探明氮素在珊瑚砂中的淋溶损失情况, 本研究测定了 TN 的淋溶损失量、其他途径损失量以及珊瑚砂的 TN 变化量, 结果表明, 在珊瑚砂中, 经由其他途径损失的氮素要高于淋溶损失, 这可能与珊瑚砂高碱性的土壤环境有关, 相较于淋失, 氮素更容易被转化为 NH₃ 和 N₂O 等气体, 经由气态挥发的方式损失^[38]。改良剂添加在氮素淋失和其他途径损失方面表现出截然相反的结果, 蛭石、钙基膨润土和生物炭会在不同程度上增加珊瑚砂中氮素的淋失, 但同时能够显著抑制其他途径的氮损失, 进而表现为对珊瑚砂 TN 损失的显著抑制。这可能是因为生物炭等土壤改良剂的多孔性和较大的比表面积使之能够直接影响珊瑚砂的物理结构, 其丰富的孔隙结构能够有效提升珊瑚砂对养分的吸附能力^[39], 缓解珊瑚砂土壤环境对土壤微生物的胁迫, 促进土壤微生物的生长和活动, 从而在促进珊瑚砂氮素固持的同时抑制硝化作用, 使得更多的氮能够保留在珊瑚砂中。

本研究表明, 生物炭能够缓解珊瑚砂高碱性环境, 而生物炭、蛭石和钙基膨润土能够显著提高珊瑚砂 CEC。改良材料添加虽然会促进以 NO₃⁻-N 形式为主的氮素淋失, 但是能够通过降低其他途径的氮素损失, 达到在总体上促进珊瑚砂氮素固持的效果。故生物炭、蛭石和钙基膨润土均具备珊瑚砂改良的应用潜力, 对降低氮肥流失, 减少热带珊瑚岛植被建设过程中的氮肥滥用具有积极意义。其中, 施用生物炭的效果最为显著, 是改善珊瑚砂土壤理化性质, 提升珊瑚砂氮素固持能力的理想材料。

参考文献

- [1] YAMANO H, MIYAJIMA T, KOIKE I. Importance of foraminifera for the formation and maintenance of a coral sand cay: Green Island, Australia [J]. *Coral Reefs*, 2000, 19(1): 51-58. doi: 10.1007/s00338050226.
- [2] JONES O A, ENDEAN R. *Biology and Geology of Coral Reefs*, Volume 4, *Geology 2* [M]. Burlington: Elsevier Science, 2012.
- [3] WANG X, WU Y, CUI J, et al. Shape characteristics of coral sand from the South China Sea [J]. *J Marine Sci Eng*, 2020, 8(10): 803. doi: 10.3390/jmse8100803.
- [4] MOORE O W, BUSS H L, GREEN S M, et al. The importance of non-carbonate mineral weathering as a soil formation mechanism within a karst weathering profile in the SPECTRA critical zone observatory, Guizhou Province, China [J]. *Acta Geochim*, 2017, 36(3): 566-571. doi:

- 10.1007/s11631-017-0237-4.
- [5] BAUTISTA F, PALACIO-APONTE G, QUINTANA P, et al. Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the peninsula of Yucatan, Mexico [J]. *Geomorphology*, 2011, 135(3/4): 308–321. doi: 10.1016/j.geomorph.2011.02.014.
- [6] WOODROFFE C D, MORRISON R J. Reef-island accretion and soil development on Makin, Kiribati, central pacific [J]. *Catena*, 2001, 44(4): 245–261. doi: 10.1016/S0341-8162(01)00135-7.
- [7] LIN Y X, LIU H, HE P C, et al. Physiological and biochemical responses of three species to environment stresses of tropical coral island [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2017, 25(6): 562–568. [林忆雪, 刘慧, 贺鹏程, 等. 三种适生植物对热带珊瑚岛胁迫生境的生理生化响应 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2017, 25(6): 562–568. doi: 10.11926/jtsb.3755.]
- [8] REN H, LI P, ZHOU H C, et al. The restoration of degraded island ecosystems [J]. *Ecol Sci*, 2001, 20(1): 60–64. [任海, 李萍, 周厚诚, 等. 海岛退化生态系统的恢复 [J]. *生态科学*, 2001, 20(1): 60–64. doi: 10.3969/j.issn.1008-8873.2001.01.012.]
- [9] RANI S, AHMED M K, XUE X Z, et al. Economic valuation and conservation, restoration & management strategies of Saint Martin's Coral Island, Bangladesh [J]. *Ocean Coast Manag*, 2020, 183: 105024. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2019.105024.
- [10] CHEN Y Q, DONG Y H. Progress of research and utilization of soil amendments [J]. *Ecol Environ Sci*, 2008, 17(3): 1282–1289. [陈义群, 董元华. 土壤改良剂的研究与应用进展 [J]. *生态环境*, 2008, 17(3): 1282–1289. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2008.03.056.]
- [11] WANG L Y, LI F J, QIN C L. Amelioration of saline soils in the Junggar Basin by application of different soil amendments [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2022, 50(16): 259–264. [王磊元, 李凤娟, 秦翠兰. 施用不同土壤改良剂对准格尔盆地盐碱地的改良作用 [J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(16): 259–264. doi: 10.15889/j.issn.1002-1302.2022.16.038.]
- [12] ZHAO P, HUANG Z B, REN Z X, et al. Research and application on advance of soil conditioners of primary degraded soils in China [J]. *J Drain Irrig Mach Eng*, 2022, 40(6): 618–625. [赵鹏, 黄占斌, 任忠秀, 等. 中国主要退化土壤的改良剂研究与应用进展 [J]. *排灌机械工程学报*, 2022, 40(6): 618–625. doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.20.0166.]
- [13] XU X M, WU S F, KANG B M, et al. Study and evaluation on nutrients and water retention capacity of five natural soil amendments [J]. *J Arid Land Res Environ*, 2014, 28(9): 85–89. [徐晓敏, 吴淑芳, 康倍铭, 等. 五种天然土壤改良剂的养分与保水性研究及评价 [J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(9): 85–89. doi: 10.13448/j.cnki.jalre.2014.09.007.]
- [14] LIU J Y, LIN S W, PAN J Y, et al. Different improved soil substrates on the growth and physiological characters of seedlings from *Trollius chinensis* Bunge [J]. *Bull Bot Res*, 2021, 41(6): 928–937. [刘金玉, 林声威, 潘景玉, 等. 不同土壤改良基质对金莲花幼苗生长及生理指标的影响 [J]. *植物研究*, 2021, 41(6): 928–937. doi: 10.7525/j.issn.1673-5102.2021.06.011.]
- [15] LI S Y, ZHAI P H, SUN X Y, et al. Saline-alkali soil characteristics and improvement in coastal area [J]. *J Basic Sci Eng*, 2014, 22(6): 1069–1078. [李素艳, 翟鹏辉, 孙向阳, 等. 滨海土壤盐渍化特征及土壤改良研究 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2014, 22(6): 1069–1078. doi: 10.16058/j.issn.1005-0930.2014.06.003.]
- [16] LI Z A. Soil Properties and Improvement on a Tropical Coral Island in China [M]. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 2021. [李志安. 中国热带珊瑚岛土壤性状与改良 [M]. 广州: 广东科技出版社, 2021.]
- [17] LEHMANN J, RILLIG M C, THIES J, et al. Biochar effects on soil biota: A review [J]. *Soil Biol Biochem*, 2011, 43(9): 1812–1836. doi: 10.1016/j.soilbio.2011.04.022.
- [18] LI Y, XU M, XIE Y H, et al. Effects of different modifiers on aggregates and organic carbon in acidic purple soil [J/OL]. *Environ Sci*, 2023. (2023-11-01). [李越, 徐曼, 谢永红, 等. 不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响 [J/OL]. *环境科学*, 2023. (2023-11-01). doi: 10.13227/j.hjcx.202303246.]
- [19] RAN C, SHAO X W, ZHU J, et al. Amending soda saline-alkali paddy soil with biochar improves soil nutrients and rice yield [J]. *J Irrig Drain*, 2019, 38(5): 46–51. [冉成, 邵玺文, 朱晶, 等. 生物炭对苏打盐碱稻田土壤养分及产量的影响 [J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(5): 46–51. doi: 10.13522/j.cnki.gggs.20180692.]
- [20] SUN J M, BU X L, WU Y B, et al. Effects of biochar application on the growth of *Robinia pseudoacacia* L. seedlings and soil properties in limestone soil in a karst mountain site [J]. *Chin J Ecol*, 2016, 35(12): 3250–3257. [孙嘉曼, 卜晓莉, 吴永波, 等. 喀斯特山地石灰土施用生物炭对刺槐幼苗生长和土壤特性的影响 [J]. *生态学杂志*, 2016, 35(12): 3250–3257. doi: 10.13292/j.1000-4890.201612.036.]
- [21] WU L P, ZHENG H N, WANG X J. Effects of soil amendments on fractions and stability of soil organic matter in saline-alkaline paddy [J]. *J Environ Manag*, 2021, 294: 112993. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112993.
- [22] XUE J H, ZHOU Z D, WU Y B. Research progresses on ecological remediation of the degraded soil in karst rocky desertification mountainous areas [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2022, 46(6): 135–145. [薛建辉, 周之栋, 吴永波. 喀斯特石漠化山地退化土壤生态修复研究进展 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(6): 135–145. doi: 10.12302/j.issn.1000-2006.202207040.]

- [23] YI S S, WITT B, CHIU P, et al. The origin and reversible nature of poultry litter biochar hydrophobicity [J]. *J Environ Qual*, 2015, 44(3): 963–971. doi: 10.2134/jeq2014.09.0385.
- [24] TONG C. Simulating changes of leaching characteristics and bacterial diversity of loam under different rainfall conditions [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019. [童川. 模拟不同降雨条件下壤土淋溶特征和细菌多样性变化研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.]
- [25] XING Y, LI X Q, WANG B, et al. Effects of biochar on soil nitrogen leaching: A laboratory simulation test with yellow soil column [J]. *Chin J Ecol*, 2011, 30(11): 2483–2488. [邢英, 李心清, 王兵, 等. 生物炭对黄壤中氮淋溶影响: 室内土柱模拟 [J]. *生态学杂志*, 2011, 30(11): 2483–2488. doi: 10.13292/j.1000-4890.2011.0369.]
- [26] LI Y M, LI X, FENG W, et al. Investigation of the synoptic situation associated with autumnal Non-TC heavy precipitation in Xisha [J]. *Meteor Mon*, 2016, 42(8): 934–943. [李玉梅, 李勋, 冯文, 等. 秋季西沙非台风强降雨天气形势分析 [J]. *气象*, 2016, 42(8): 934–943. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.08.003.]
- [27] HAN S S, LIU S X, SONG X F, et al. Field evapotranspiration experiment in Zhaoshu Island of Xisha Islands, South China Sea [J]. *Geogr Res*, 2021, 40(1): 172–184. [韩生生, 刘苏峡, 宋献方, 等. 西沙赵述岛地表蒸散发实验 [J]. *地理研究*, 2021, 40(1): 172–184. doi: 10.11821/dlyj020190860.]
- [28] CAI H Y, LU H F, TIAN Y, et al. Effects of invasive plants on the health of forest ecosystems on small tropical coral islands [J]. *Ecol Indic*, 2020, 117: 106656. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106656.
- [29] XIONG Y S, CHEN M L, YU Y X, et al. The fate of nitrogen forms of nitrogen fertilizers under alternate leaching and drying conditions [J]. *J Plant Nutr Fert*, 2001, 7(2): 153–158. [熊又升, 陈明亮, 喻永熹, 等. 间歇淋洗干湿交替条件下氮肥的氮行为研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(2): 153–158. doi: 10.11674/zwfyf.2001.0206.]
- [30] LU R K. Soil Agricultural Chemical Analysis Method [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 12–292. [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: 12–292.]
- [31] HUANG Z, QU S H, BAI L, et al. Effects of different straw mixing biochar on nutrient and enzyme activity of saline soil [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2017, 24(4): 290–295. [黄哲, 曲世华, 白岚, 等. 不同秸秆混合生物炭对盐碱土壤养分及酶活性的影响 [J]. *水土保持研究*, 2017, 24(4): 290–295. doi: 10.13869/j.cnki.rswc.2017.04.046.]
- [32] WANG Q, LI R H, CAI H Z, et al. Improving pig manure composting efficiency employing ca-bentonite [J]. *Ecol Eng*, 2016, 87: 157–161. doi: 10.1016/j.ecoleng.2015.11.032.
- [33] GLASER B, LEHR V I. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis [J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 9338. doi: 10.1038/s41598-019-45693-z.
- [34] YANG R Q, CAO F, LI Y C, et al. Effect of different fertilization on nitrogen leaching in an open field used for vegetable planting on north China [J]. *Soil Fert Sci China*, 2020(6): 130–137. [杨荣全, 曹飞, 李迎春, 等. 不同施肥处理对华北露天菜地氮素淋溶的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2020(6): 130–137. doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.19481.]
- [35] KONG B S, JIAO S Y, LI Y Q, et al. Effects of acidified zeolite on urea nitrogen leaching and nitrogen utilization in maize kernel [J]. *J Soil Water Conserv*, 2021, 35(2): 303–308. [孔柏舒, 焦树英, 李永强, 等. 酸化沸石对尿素氮淋失和玉米籽粒氮素利用的影响 [J]. *水土保持学报*, 2021, 35(2): 303–308. doi: 10.13870/j.cnki.stbxb.2021.02.040.]
- [36] RUSER R, FLESSA H, RUSSOW R, et al. Emission of N₂O, N₂ and CO₂ from soil fertilized with nitrate: Effect of compaction, soil moisture and rewetting [J]. *Soil Biol Biochem*, 2006, 38(2): 263–274. doi: 10.1016/j.soilbio.2005.05.005.
- [37] SIMARANI K, AZLAN HALMI M F, ABDULLAH R. Short-term effects of biochar amendment on soil microbial community in humid tropics [J]. *Arch Agron Soil Sci*, 2018, 64(13): 1847–1860. doi: 10.1080/03650340.2018.1464149.
- [38] SHI Z Q, SHE D L, CHEN X Y, et al. Effects of salinity on soil ammonia volatilization and denitrification rates [J]. *J Ecol Rural Environ*, 2021, 37(11): 1458–1464. [史祯琦, 余冬立, 陈心逸, 等. 盐分对土壤氨挥发与反硝化速率的影响 [J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(11): 1458–1464. doi: 10.19741/j.issn.1673-4831.2020.0883.]
- [39] LIU Q, LIU B J, ZHANG Y H, et al. Biochar application as a tool to decrease soil nitrogen losses (NH₃ volatilization, N₂O emissions, and N leaching) from croplands: Options and mitigation strength in a global perspective [J]. *Glob Change Biol*, 2019, 25(6): 2077–2093. doi: 10.1111/gcb.14613.