不同施肥处理对呼伦贝尔沙地植被恢复及土壤特性的影响

刘逸飞[1,2], 孔祥鹏[1,2], 代泽成[1], 刘贺永[3], 周全来[1,4], 王 聪[1,2], 罗永清[5], 阿拉木萨[1,4], 姜 勇[3], 刘新平[5], 李玉强[5], 王正文[1,4], 李 慧[1,4]

(1.中国科学院 沈阳应用生态研究所森林生态与保育重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.河北大学 生命科学学院, 河北 保定 071002; 4.中国科学院 沈阳应用生态研究所额尔古纳森林草原过渡带生态系统研究站, 辽宁 沈阳 110016; 5.中国科学院 西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: [目的]阐明不同施肥处理对呼伦贝尔沙地植被恢复、土壤理化性质和微生物学特性的影响,旨在探究适合不同沙化程度的土壤改良措施,为呼伦贝尔沙地恢复提供理论依据。[方法]以呼伦贝尔沙地轻度、中度和重度沙化区域为研究对象,设置对照(CK)、单施化肥(MF)、化肥配施保水剂黏合剂(MA)、单施有机肥(OF)、有机肥部分替代化肥(MO)、有机无机肥配施保水剂黏合剂(MOA)6种处理,探究不同施肥处理对植被盖度、土壤理化性质和微生物学特性的影响。[结果]①随着沙化程度加剧,土壤pH值、含水量、土壤养分指标(包括可溶性有机碳、全氮、硝态氮、有效磷)和微生物活性指标(包括基础呼吸、底物诱导呼吸、土壤酶活性)均显著下降。②各施肥处理使轻度沙化区植被盖度由48.33%提高至59.81%~94.63%;中度沙化区植被盖度由25.93%提高至83.39%~91.85%;重度沙化区植被盖度由5.56%提高至74.07%~97.96%。总体来看,配施有机肥和保水剂/黏合剂的处理植被盖度恢复效果更优。③各施肥处理提高了土壤速效氮磷养分含量和微生物活性,植被盖度与土壤铵态氮、硝态氮、有效磷、微生物底物诱导呼吸以及β-1,4-葡萄糖苷酶、N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶和酸性磷酸酶活性显著正相关。[结论]综合考虑植被恢复效果和土壤养分改善程度,轻度沙化区适宜采用MA处理,中度沙化区适宜采用MOA处理,重度沙化区适宜采用MO处理。

关键词: 有机肥; 保水剂; 微生物生物量; 土壤酶; 呼伦贝尔沙地

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)04-0105-11 **中图分类号:** S154, Q948

文献参数: 刘逸飞, 孔祥鹏, 代泽成, 等.不同施肥处理对呼伦贝尔沙地植被恢复及土壤特性的影响[J].水土保持通报, 2026, 46(4): 105-115. Liu Yifei, Kong Xiangpeng, Dai Zecheng, et al. Effects of different fertilization treatments on vegetation restoration and soil properties in Hulunbuir sandy land [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(4): 105-115.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.019 **CSTR:** 32312.14.stbctb.2026.04.019

Effects of different fertilization treatments on vegetation restoration and soil properties in Hulunbuir sandy land

Liu Yifei[1,2], Kong Xiangpeng[1,2], Dai Zecheng[1], Liu Heyong[3], Zhou Quanlai[1,4], Wang Cong[1,2], Luo Yongqing[5], Alamusa[1,4], Jiang Yong[3], Liu Xinping[5], Li Yuqiang[5], Wang Zhengwen[1,4], Li Hui[1,4]

(1.*CAS Key Laboratory of Forest Ecology and Silviculture, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning* 110016, *China*; 2.*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; 3.*School of Life Sciences, Hebei University, Baoding, Hebei* 071002, *China*; 4.*Erguna Forest-Steppe Ecotone Research Station, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning* 110016, *China*; 5.*Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu* 730000, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of different fertilization treatments on vegetation restoration, soil

收稿日期: 2025-09-25 **修回日期:** 2026-02-13 **采用日期:** 2026-02-15

资助项目: 中国科学院A类战略性先导科技专项"呼伦贝尔沙地植被恢复技术与近原生群落构建"(XDA26020104); 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目"俄罗斯中部和中国东北部地区不同土地利用方式对土壤有机碳稳定性的影响及其微生物驱动机制"(W2412054)

第一作者: 刘逸飞(1999—),男(汉族),吉林省通化人,硕士研究生,研究方向为土壤微生物生态。Email:liuyifei23@mails.ucas.ac.cn。

通信作者: 李慧(1977—),女(回族),辽宁省锦州人,博士,研究员,主要从事脆弱生态系统修复技术及机理研究。Email:huili@iae.ac.cn。

physicochemical properties, and microbial characteristics in the Hulunbuir sandy land were investigated in order to identify suitable soil improvement measures for areas with different degrees of desertification, and to provide a theoretical basis for restoration of the Hulunbuir sandy land. [Methods] Mildly, moderately, and severely desertified areas in the Hulunbuir sandy land were selected as the study sites. Six treatments were established: control (CK), chemical fertilizer alone (MF), chemical fertilizer combined with water-retaining and binding agents (MA), organic fertilizer alone (OF), partial substitution of chemical fertilizer with organic fertilizer (MO), and combined application of organic and inorganic fertilizers with water-retaining and binding agents (MOA). The effects of different fertilization treatments on vegetation cover, soil physicochemical properties, and microbial characteristics were investigated. [Results] ① With increasing desertification severity, soil pH value, water content, soil nutrient indicators (including dissolved organic carbon, total nitrogen, nitrate nitrogen, and available phosphorus), and microbial activity indicators (including basal respiration, substrate-induced respiration, and soil enzyme activities) all decreased significantly. ② The fertilization treatments increased vegetation cover from 48.33% to 59.81%—94.63% in mildly desertified areas, from 25.93% to 83.39%—91.85% in moderately desertified areas, and from 5.56% to 74.07%—97.96% in severely desertified areas. Overall, treatments combining organic fertilizer with water-retaining and binding agents showed better vegetation restoration effects. ③ All fertilization treatments increased soil available nitrogen and phosphorus contents and microbial activity. Vegetation cover was significantly and positively correlated with soil ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, available phosphorus, microbial substrate-induced respiration, and the activities of β-1, 4-glucosidase, N-acetyl-β-D-glucosaminidase, and acid phosphatase. [Conclusion] Considering both vegetation restoration effectiveness and soil nutrient improvement levels, MA is suitable for mildly desertified areas, MOA for moderately desertified areas, and MO for severely desertified areas.

Keywords: organic fertilizer; water-retaining agent; microbial biomass; soil enzymes; Hulunbuir sandy land

呼伦贝尔沙地位于内蒙古东北部的呼伦贝尔高原,东西长达270 km,南北宽约170 km,是中国四大沙地之一,现有沙化土地面积超过1.00×10^4 km^2,其中植被覆盖度小于10%的沙化土地476.27 km^2,植被盖度为10%～29%的沙化土地2.61×10^3 km^2,植被盖度为30%～59%的沙化土地5.64×10^3 km^2,植被盖度大于60%的沙化土地1.35×10^4 km^2[1]。持续的干旱和传统的生产生活方式使呼伦贝尔沙地面临固定沙丘活化、风蚀坑扩大等问题,严重影响当地生态环境和农牧业生产[2-4]。近年来,随着"三北"工程东部"歼灭战"的持续推进,呼伦贝尔沙地防沙治沙工作取得了一定的阶段性成果。然而,在当前较强的土地利用压力和极端天气影响下,局地沙化风险仍然存在,防沙治沙成果亟需进一步巩固和提升[3,5]。

土壤水分和养分匮乏是限制沙地植被生长的主要因素,合理施肥是恢复退化草地的重要管理措施[6-7]。施肥可以提高土壤肥力,缓解养分限制,改善群落结构,并促进生产力恢复。对于典型砂壤土或黏土,通常施加含氮、磷、钾的化肥以快速提高土壤肥力。然而,沙质土壤因孔隙度高、渗透性强、保水保肥能力弱,单独施用化肥往往伴随较高的养分淋溶风险[8]。此外,沙质土壤中黏土和有机质含量普遍较低,导致其土壤缓冲能力不足,铵态氮硝化产生的酸性物质更易在土壤中积累,从而引起土壤酸化并增加潜在的环境风险[9]。相较而言,生物有机肥含有大量有机质,具有明显的改土培肥作用[10],但养分含量低、释放慢[11]。已有研究表明,在干旱和半干旱地区,有机肥部分替代化肥可起到缓解酸化和长效释放养分的作用,既能提高土壤生产力,又有利于土壤培肥[12-13]。需要指出的是,现有关于有机-无机配施的研究多来自农田生态系统,针对沙地治理和生态恢复情景的系统研究仍相对缺乏。近年来,高分子材料作为土壤改良剂在农业生产和生态恢复中被广泛应用,其可使土壤中水分和养分得以保留,起到保水保肥的作用[14-15]。目前,关于沙地施肥与土壤改良剂联合应用的研究仍然较少,已有研究多集中于施肥对土壤养分和植被生长的影响,而针对土壤微生物学特性的探讨相对匮乏。此外,由于不同沙化程度下植被和土壤状况存在显著差异,是否需要采取差异化的施肥策略仍不明确。

本研究选取呼伦贝尔沙地轻度、中度、重度沙化土地,采用小区试验,以不施肥为对照,设置施加化肥、有机肥、保水剂和黏合剂及其不同组合的施肥处

理,分析不同施肥处理对沙地植被盖度、土壤理化性质和微生物学特性的影响,并针对不同沙化区域提出相应的施肥策略,为呼伦贝尔沙地植被恢复提供科学依据和实践支持,以期促进该区域生态环境的可持续发展。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

本研究选址于内蒙古陈巴尔虎旗呼和诺尔镇乌布日诺尔嘎查(49°04′48″ N,118°46′48″ E),位于呼伦贝尔沙地西南部。该地区属于近寒温带大陆性气候,夏季温和短促,冬季寒冷漫长,无霜期90~110 d,年均气温约−2.6 ℃,年均降水量约340 mm,试验期间逐月平均降水量约43.6 mm。乌布日诺尔嘎查土地面积420 km^2,草场面积360 km^2,沙化面积122.05 km^2。以植被盖度作为参考指标,对研究区域土地沙漠化程度进行划分:植被盖度>30% 为轻度沙化土地;10%<植被盖度≤30% 为中度沙化土地;植被盖度≤10% 为重度沙化土地[16]。在景观上依次表现为固定-半固定沙地、半流动沙地和流动沙地(详见图1)。

该区主要植物有芦苇(*Phragmites australis*),萹蓄(*Polygonum aviculare*)、草地风毛菊(*Saussurea amara*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、藜(*Chenopodium album*)、假苇拂子茅(*Calamagrostis pseudophragmites*)和二裂委陵菜(*Sibbaldianthe bifurca*)等。



a 轻度沙化　　b 中度沙化　　c 重度沙化

图1　呼伦贝尔沙地轻、中、重度沙化土地现状

Fig.1　Current conditions of mildly, moderately, and severely desertified land in Hulunbuir sandy land

1.2　试验设计

于2022年5月进行施肥试验,共设置6个处理,分别为:①对照(CK),②单施化肥(MF),③化肥配施保水剂黏合剂(MA),④单施有机肥(OF),⑤有机肥部分替代化肥(MO),⑥有机无机肥配施保水剂黏合剂(MOA)。每个处理设6个重复,每个沙化区36个试验小区,按随机区组排列,共108个试验小区。小区面积为20 m×20 m,各小区留有2 m的缓冲带和过道,样地边缘设置5 m以上的防护带,并设有防护网以防止牲畜啃食干扰。各处理施肥配方如表1所示,供试化肥主要成分为尿素、磷酸氢二铵和硫酸钾,生物有机肥为商品有机肥(内蒙古昊联科技有限公司,$N+P_2O_5+K_2O$≥5% 和有机质≥45%),总碳含量为23.90%,总氮含量为9.40%,施用时按所替代化肥含氮量换算为等量的有机肥。本试验所用的保水剂和黏合剂的主要成分是聚丙烯酸钠和聚丙烯酰胺。所有肥料以及土壤改良剂均匀干撒施于每个小区。

表1　不同处理施肥量

Table 1　Fertilizer application amounts under different treatments

施肥处理	尿素/(kg·hm^{-2})	磷酸氢二铵/(kg·hm^{-2})	硫酸钾/(kg·hm^{-2})	生物有机肥/(kg·hm^{-2})	保水剂黏合剂/(kg·hm^{-2})
CK	0	0	0	0	0
MF	653.25	139.50	370	0	0
MA	653.25	139.50	370	0	180/180
OF	0	0	0	3 510.75	0
MO	298.25	131.25	284.75	1 755.25	0
MOA	298.25	131.25	284.75	1 755.25	180/180

注:表1中施肥处理字母代码含义见试验设计部分。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤样品采集

于2022年8月底采集0—10 cm土壤样品，每个小区随机选取5点，混合后去除根系和石块，放入保温箱作为代表小区的1个土壤样品。取回的土壤样品分2份保存，1份自然风干，1份于4 ℃下保存，分别用于测定土壤理化性质和微生物学特性。

1.3.2 测定指标与方法

（1）土壤理化性质测定指标包括土壤含水量、pH值、可溶性有机碳、铵态氮、硝态氮、有效磷、全碳、全氮。土壤含水量（SWC）采用连续烘干法于105 ℃条件下测定；pH值采用酸度计进行测定（水土比2.5∶1）；可溶性有机碳（DOC）用TOC分析仪（High-TOC，Elementar Vario MACRO cube，Germany）分析0.5 mol/L K_2SO_4浸提（水土比2∶1）的滤液进行测定；铵态氮（NH_4^+-N）和硝态氮（NO_3^--N）使用连续流动分析仪（AutoAnalyser Ⅲ Bran Luebbe，Germany）分析2 mol/L KCl浸提（水土比5∶1）的滤液测定；有效磷（Olsen-P）采用0.5 mol/L $NaHCO_3$浸提，钼锑抗比色法测定；全碳（TC）、全氮（TN）采用元素分析仪（Elementar Analysensysteme Vario MACRO cube，Germany）测定。

（2）微生物学特性测定指标包括微生物生物量碳和氮、土壤基础呼吸、底物诱导呼吸、β-1,4-葡萄糖苷酶、N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶、碱性磷酸酶活性。微生物生物量碳（MBC）和氮（MBN）采用氯仿熏蒸-浸提法测定；土壤基础呼吸（BR）和底物诱导呼吸（SIR）采用动态气室法测定[17]；β-1,4-葡萄糖苷酶（BG）、N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶（NAG）、酸性磷酸酶（ACP）、碱性磷酸酶（ALP）采用对硝基苯酚（P-nitrophenol，PNP）比色法测定[17]。

（3）植被恢复测定指标为植被盖度。参考《全国生态状况调查评估技术规范》，于2022年8月，使用无人机对试验小区进行航拍，重复拍摄2～3次，并估算植被盖度。对照片先进行预处理，然后使用CAN-EYE软件分析图片上的RGB值区分植被与非植被区域，计算每张相片植被覆盖度，取其平均值作为样方植被覆盖度。

1.4 数据处理

采用Excel 2016初步整理数据，采用IBM SPSS Statistics 27.0进行单因素方差分析（ANOVA）研究各施肥处理对土壤理化性质及土壤微生物学特性的影响，进而采用LSD法进行多重比较，显著性水平设定为0.05。采用Pearson相关分析探究植被盖度、土壤理化性质和微生物学特性的相关关系，用R语言软件corrplot和linkET包处理。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对植被盖度的影响

轻、中、重度沙化区植被盖度分别为48.33%，25.93%，5.56%，差异显著（图2，$p<0.05$）。在不同沙化区，与对照相比各施肥处理均提高植被盖度。在轻度沙化区，配施保水剂黏合剂的处理（MA，MOA）植被盖度显著高于相应未配施保水剂黏合剂的处理（MF，MO），其中有机无机肥配施保水剂黏合剂（MOA）处理的植被盖度最高，植被盖度提高至94.63%。中度沙化区所有施肥处理的植被盖度均显著高于对照，且处理间无显著差异。在重度沙化区，含有机肥的处理（OF，MO，MOA）植被盖度提高至60%以上，且显著高于单施化肥处理（MF），其中有机肥部分替代化肥（MO）和有机无机肥配施保水剂黏合剂（MOA）处理使植被盖度从5.56%分别提高至94.44%和97.96%。配施保水剂黏合剂的处理（MA和MOA）与相应未添加保水剂黏合剂的处理（MF，MO）相比，植被盖度恢复效果更好。

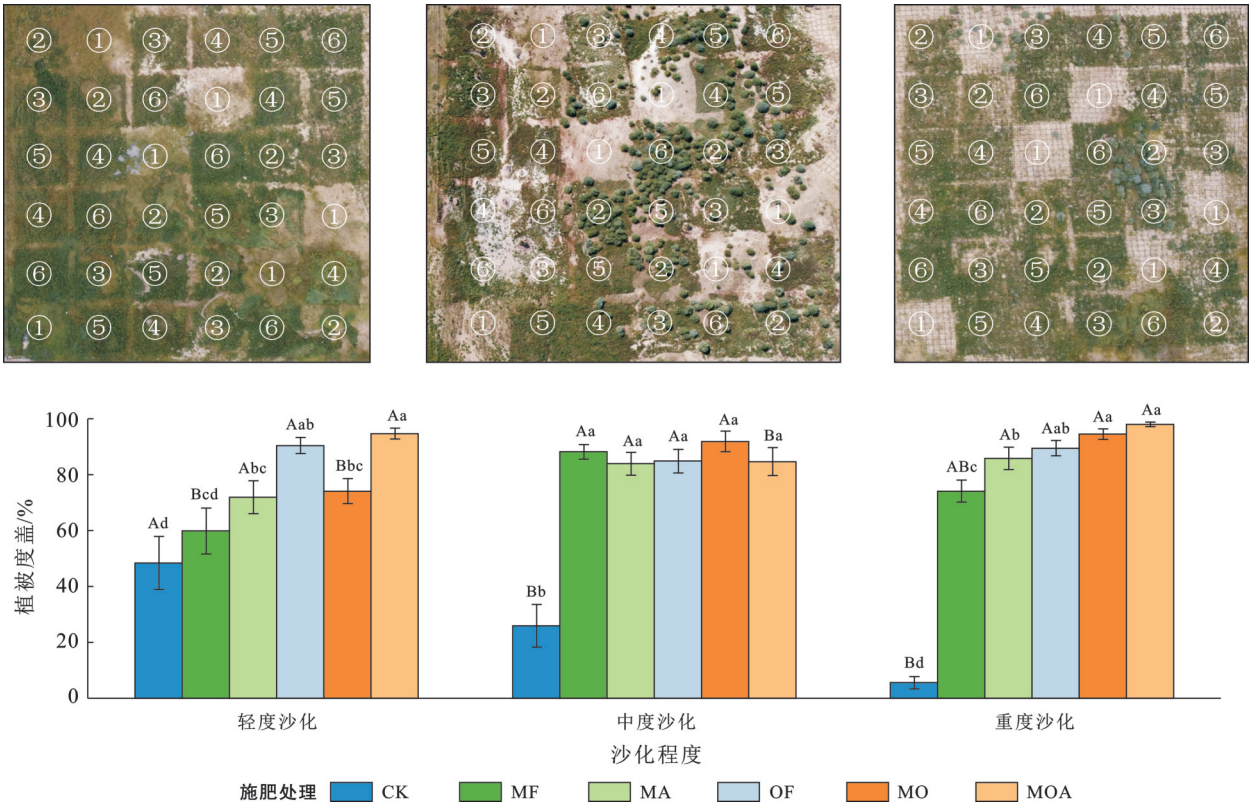
2.2 不同施肥处理对土壤理化性质的影响

从对照来看，随着沙化程度加剧，土壤pH值、含水量（SWC）、可溶性有机碳（DOC）、全氮（TN）、硝态氮（NO_3^--N）、有效磷（Olsen-P）均逐渐下降（表2）。具体而言，中度和重度沙化区土壤DOC，TN，Olsen-P均显著低于轻度沙化区（$p<0.05$），而土壤pH值，SWC和NO_3^--N仅在重度沙化区显著低于轻度沙化区（$p<0.05$）。此外，随着沙化程度加剧，土壤NH_4^+-N含量呈逐渐增加的趋势（表2）。

各施肥处理对SWC的效应在不同沙化区存在明显差异。在轻度沙化区，各施肥处理有降低SWC的趋势，但总体效应不显著；在中度沙化区，有机无机肥配施保水剂黏合剂（MOA）显著降低SWC（$p<0.05$）；在重度沙化区，各处理有提高SWC的趋势，但效应不显著（$p>0.05$）。

各施肥处理在短期内对土壤pH值、土壤总碳（TC）、总氮（TN）含量没有显著影响（$p>0.05$），但显著改变可溶性有机碳（DOC）含量。在轻度沙化区，有机肥部分替代化肥（MO）提高土壤DOC含量，其余施肥处理有降低土壤DOC的趋势；在中度沙化区，各施肥处理均提高土壤DOC含量，有机无机肥配施保水剂黏合剂（MOA）对DOC含量的提升效果显著（$p<0.05$）；在重度沙化区，各施肥处理对土壤DOC

未产生显著影响($p>0.05$)。总体来看,大部分施肥处理均能提高土壤速效氮磷养分含量(NH_4^+-N, NO_3^--N, Olsen-P)。在轻度沙化区,化肥配施保水剂黏合剂(MA)对土壤 NH_4^+-N, NO_3^--N, Olsen-P 含量均具有显著提升效果($p<0.05$)。在中度沙化区,单施有机肥(OF)使土壤 NH_4^+-N 含量由 3.91 mg/kg 提高至 66.84 mg/kg($p<0.05$),但对土壤 NO_3^--N 和 Olsen-P 含量未产生显著影响($p>0.05$);有机无机肥配施保水剂黏合剂(MOA)显著提高土壤 NO_3^--N 和 Olsen-P 含量($p<0.05$),同时使土壤 NH_4^+-N 含量提高至 10.34 mg/kg。在重度沙化区,含有机肥的处理(OF, MO, MOA)显著提高土壤速效氮磷养分含量,单施有机肥(OF)使土壤 NH_4^+-N 含量由 4.34 mg/kg 提高至 65.66 mg/kg($p<0.05$),使土壤 NO_3^--N 含量从 0.86 mg/kg 提高至 2.97 mg/kg($p<0.05$);有机肥部分替代化肥(MO)分别使土壤 NH_4^+-N, NO_3^--N, Olsen-P 含量提高至 74.83 mg/kg, 2.30 mg/kg, 5.31 mg/kg($p<0.05$)。



注:(1) 表中①—⑥含义见试验设计部分; CK为对照; MF 为单施化肥; MA 为化肥配施保水剂黏合剂; OF 为单施有机肥; MO为有机肥部分替代化肥; MOA 为有机无机肥配施保水剂黏合剂。(2) Mild 为轻度沙化区; Moderate 为中度沙化区; Severe 为重度沙化区。(3) 误差线代表标准误(SE, $n=6$)。(4) 不同大写字母表示同一处理下沙化程度间差异显著,不同小写字母表示同一沙化程度下处理间差异显著($p<0.05$),下同。

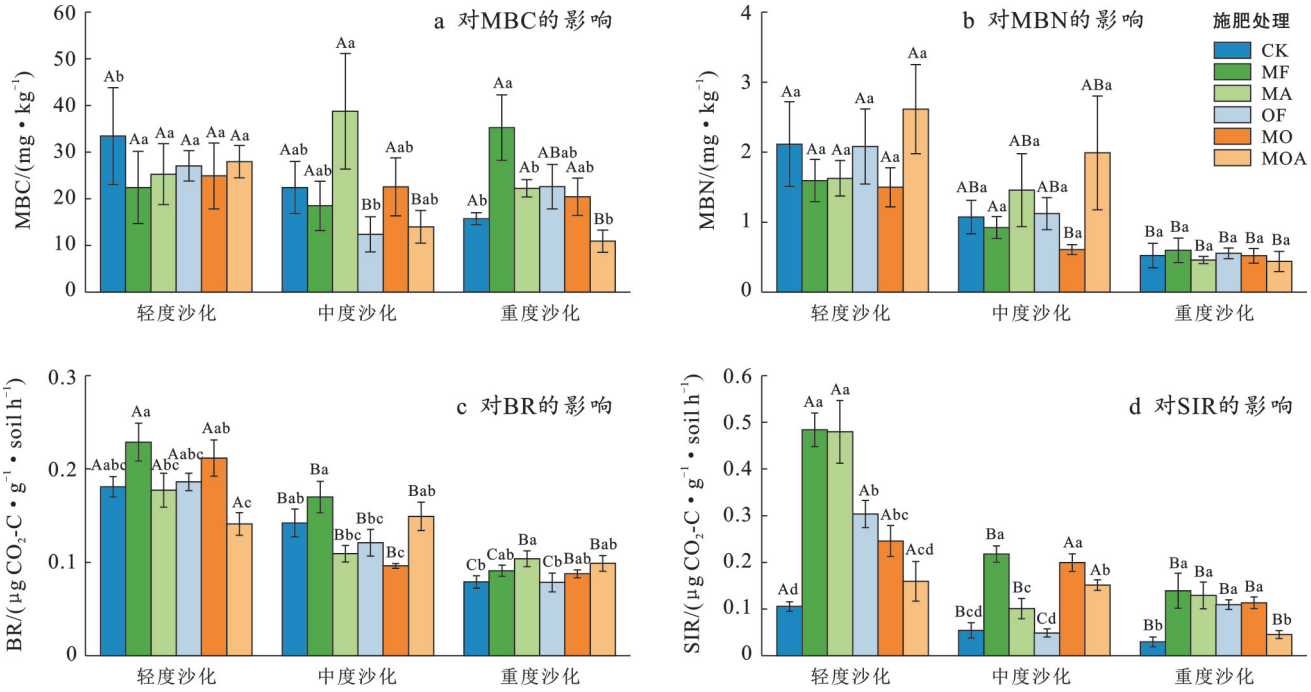
图 2　不同施肥处理对植被盖度的影响

Fig.2　Effects of different fertilization treatments on vegetation cover

2.3　不同施肥处理对土壤微生物学特性的影响

土壤微生物生物量(包括 MBC 和 MBN)随着沙化程度加剧而逐渐下降(图 3a, 3b)。在重度沙化区,单施化肥处理(MF)显著提高了 MBC($p<0.05$)。随着沙化程度加剧,土壤基础呼吸(BR)和底物诱导呼吸(SIR)均逐渐降低(图 3c, 3d)。总体来看,各施肥处理对土壤 BR 无显著影响,但显著提高了土壤微生物 SIR 水平。此外,配施保水剂黏合剂的处理(MA, MOA)SIR 水平低于相应的未配施保水剂黏合剂的处理(MF, MO)。

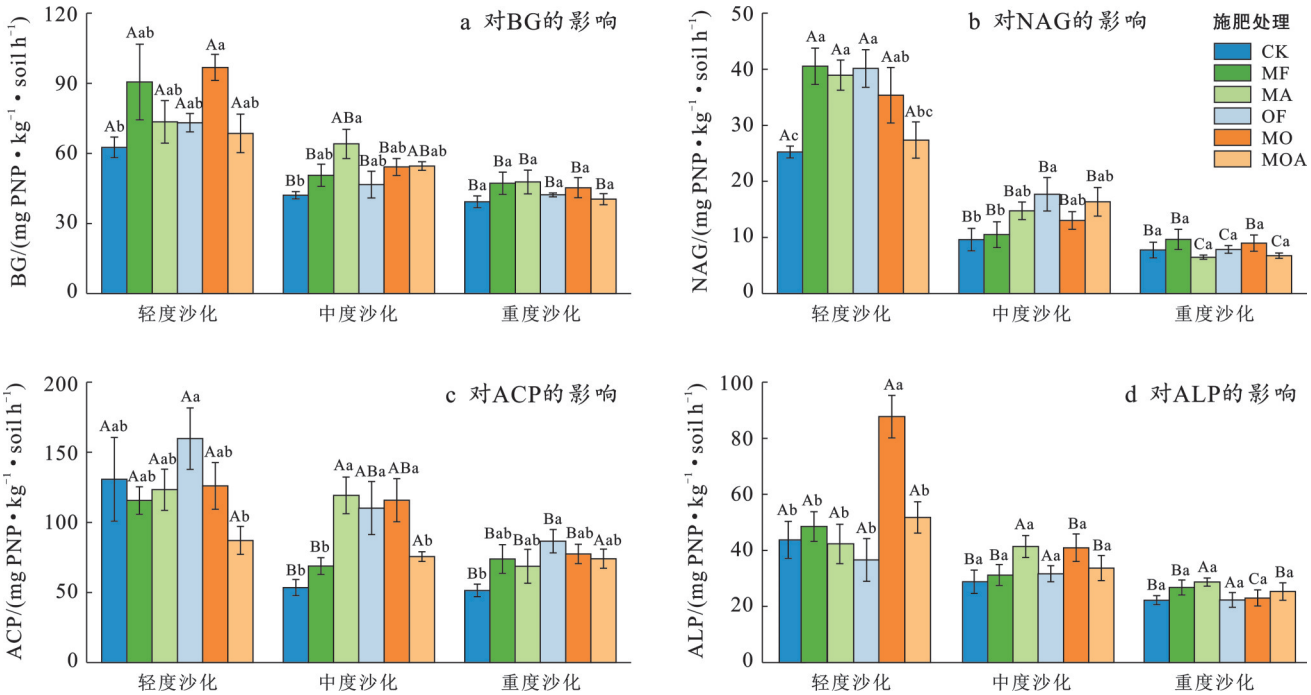
随着沙化程度加剧,土壤酶活性逐渐降低(图 4)。各施肥处理对酶活性的效应在不同沙化区存在明显差异。在轻度沙化区,各施肥处理显著提高 N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶(NAG)的活性,有机肥部分替代化肥处理(MO)还显著提高 β-1,4-葡萄糖苷酶(BG)和碱性磷酸酶(ALP)的活性($p<0.05$)。在中度沙化区,各施肥处理显著提高酸性磷酸酶(ACP)的活性;此外,化肥配施保水剂黏合剂处理(MA)显著提高 BG 活性($p<0.05$),单施有机肥处理(OF)显著提高 NAG 活性($p<0.05$)。在重度沙化区,各施肥处理对土壤酶活性总体上无显著影响,仅单施有机肥处理(OF)显著提高 ACP 活性($p<0.05$)。



注:MBC为微生物生物量碳;MBN为微生物生物量氮;BR为基础呼吸;SIR为底物诱导呼吸。

图3 不同施肥处理对土壤微生物生物量及呼吸的影响

Fig.3 Effects of different fertilization treatments on soil microbial biomass and respiration



注:BG为β-1,4-葡萄糖苷酶;NAG为N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶;ACP为酸性磷酸酶;ALP为碱性磷酸酶。

图4 不同施肥处理对土壤酶活性的影响

Fig.4 Effects of different fertilization treatments on soil enzyme activities

2.4 植被盖度与土壤理化性质和微生物学特性的关系

采用Pearson相关分析植被盖度与土壤理化性质和微生物特性的关系(图5)可知,植被盖度与土壤速效氮磷养分(有效磷、铵态氮、硝态氮)、微生物底物诱导呼吸以及土壤酶活性(β-1,4-葡萄糖苷酶、N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶活性)呈显著正相关($p<0.05$)。植被盖度与pH值呈显著负相关($p<0.05$)。

表 2　不同施肥处理对土壤理化性质的影响

Table 2　Effects of different fertilization treatments on soil physicochemical properties

试验区域	处 理	pH值	SWC/%	TC/(g·kg^{-1})	TN/(g·kg^{-1})	DOC/(mg·kg^{-1})	NH_4^+-N/(mg·kg^{-1})	NO_3^--N/(mg·kg^{-1})	Olsen-P/(mg·kg^{-1})
轻度沙化区	CK	6.93±0.24^{Aa}	3.28±0.38^{Aa}	1.23±0.28^{Aa}	0.47±0.04^{Aa}	24.78±3.04^{Aab}	3.47±0.54^{Ac}	2.70±0.78^{Ab}	3.85±0.44^{Ac}
	MF	7.01±0.16^{Aa}	2.91±0.49^{Aa}	0.86±0.14^{Aa}	0.40±0.03^{Aa}	20.42±2.30^{Aab}	3.64±0.74^{Bc}	7.12±1.15^{Aa}	4.96±0.61^{Abc}
	MA	6.50±0.14^{Aa}	2.44±0.43^{Aa}	1.20±0.14^{Aa}	0.50±0.03^{Aa}	15.63±2.04^{ABb}	7.94±1.47^{Ab}	7.67±0.49^{Aa}	5.75±0.66^{Aab}
	OF	6.54±0.26^{Aa}	2.32±0.23^{Ba}	1.38±0.28^{Aa}	0.47±0.05^{Aa}	17.75±5.22^{ABb}	11.26±0.72^{Ba}	5.89±0.41^{Ab}	4.16±0.53^{Abc}
	MO	6.59±0.11^{Aa}	3.36±0.54^{Aa}	1.33±0.10^{Aa}	0.52±0.05^{Aa}	30.53±8.68^{Aa}	5.65±0.68^{Bbc}	7.36±1.74^{Aa}	6.90±0.66^{Aa}
	MOA	6.68±0.14^{Aa}	2.04±0.39^{Aa}	0.92±0.17^{ABa}	0.43±0.02^{Aa}	24.18±5.63^{Bab}	3.72±0.30^{Bc}	7.21±1.53^{Aa}	5.16±0.32^{Bbc}
中度沙化区	CK	6.69±0.10^{ABa}	2.98±0.34^{ABa}	1.03±0.19^{Aa}	0.30±0.04^{Ba}	16.36±2.36^{Bb}	3.91±0.55^{Ab}	1.69±0.39^{ABbc}	2.38±0.18^{Bc}
	MF	6.45±0.09^{Ba}	2.51±0.32^{Aab}	0.67±0.18^{Aa}	0.32±0.02^{Ba}	21.85±1.17^{Aab}	6.16±0.87^{ABb}	3.78±0.84^{Ba}	3.58±0.17^{Bc}
	MA	6.39±0.20^{Aa}	2.43±0.35^{Aab}	0.80±0.19^{Aa}	0.35±0.03^{Ba}	25.01±6.55^{Aab}	5.33±0.61^{Ab}	3.11±0.57^{Bab}	6.22±0.67^{Ab}
	OF	6.41±0.17^{Aa}	2.29±0.22^{Bab}	1.23±0.22^{Aa}	0.4±0.03^{ABa}	28.83±6.64^{Aab}	66.84±4.64^{Aa}	0.88±0.22^{Bc}	3.08±0.56^{Ac}
	MO	6.55±0.11^{Aa}	2.85±0.27^{Aab}	0.84±0.12^{Ba}	0.35±0.05^{Ba}	26.28±6.34^{ABab}	5.16±0.57^{Bb}	2.11±0.55^{Bbc}	2.54±0.41^{Bc}
	MOA	6.54±0.06^{ABa}	1.96±0.28^{Ab}	1.18±0.16^{Aa}	0.38±0.05^{Aa}	38.70±9.72^{ABa}	10.34±2.41^{ABb}	3.88±0.31^{Ba}	7.73±0.80^{Aa}
重度沙化区	CK	6.34±0.06^{Bab}	1.99±0.49^{Ba}	0.60±0.06^{Aab}	0.28±0.03^{Bab}	9.18±1.98^{Ba}	4.34±0.59^{Ab}	0.86±0.12^{Bc}	2.15±0.15^{Bc}
	MF	6.41±0.05^{Ba}	2.43±0.37^{Aa}	0.62±0.11^{Aab}	0.25±0.02^{Cb}	9.03±2.10^{Ba}	9.79±2.00^{Ab}	1.00±0.31^{Cc}	2.06±0.11^{Cc}
	MA	6.21±0.19^{Aab}	2.90±0.40^{Aa}	0.80±0.16^{Aab}	0.33±0.02^{Ba}	8.55±2.47^{Ba}	5.92±1.01^{Ab}	1.63±0.37^{Cbc}	2.34±0.33^{Bc}
	OF	5.93±0.15^{Ab}	3.13±0.14^{Aa}	0.75±0.10^{Aab}	0.33±0.02^{Ba}	10.24±2.30^{Ba}	65.66±6.28^{Aa}	2.97±0.44^{Ca}	3.30±0.28^{Abc}
	MO	6.08±0.16^{Bab}	2.75±0.28^{Aa}	0.87±0.06^{Ba}	0.33±0.02^{Ba}	7.89±0.78^{Ba}	74.83±10.62^{Aa}	2.30±0.31^{Bab}	5.31±0.99^{Aa}
	MOA	6.24±0.12^{Bab}	2.26±0.41^{Aa}	0.53±0.04^{Bb}	0.27±0.02^{Bab}	12.18±1.94^{Ba}	14.08±3.36^{Ab}	1.40±0.13^{Bbc}	3.98±0.67^{Bab}

注:SWC 为含水量;TC 为全碳;TN 为全氮;DOC 为可溶性有机碳;NH_4^+-N 为铵态氮;NO_3^--N 为硝态氮;Olsen-P 为有效磷。不同大写字母表示同一处理下沙化程度间差异显著,不同小写字母表示同一沙化程度下处理间差异显著($p<0.05$)。

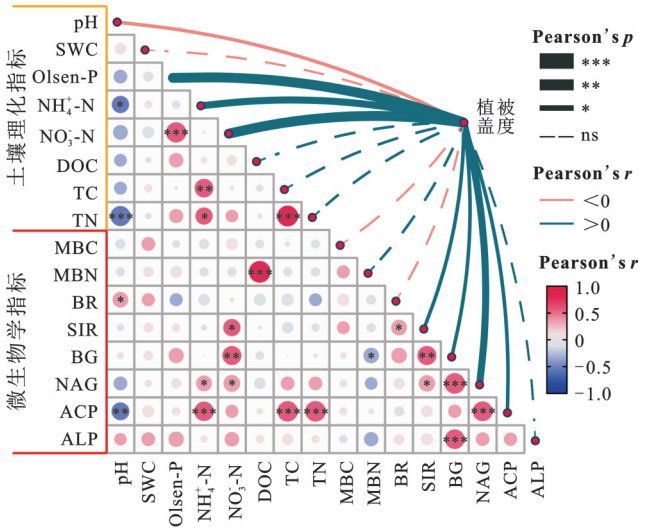


图 5　植被盖度与土壤理化性质和微生物学特性的关系

Fig.5　Relationship between vegetation cover and soil physicochemical and microbiological properties

3　讨　论

3.1　土地沙化对土壤养分和微生物学特性的影响

随着土地沙化程度加剧,土壤养分含量显著降低(表 2),包括土壤可溶性有机碳、全氮、硝态氮以及有效磷,这与之前大多研究结果基本一致。在青藏高原荒漠化高寒草甸[18]、宁夏回族自治区东部荒漠草地[19]和毛乌素沙地[20]的研究均发现,重度沙化区土壤有机碳、可溶性有机碳、全氮、铵态氮、硝态氮、速效钾、有效磷损失比轻度沙化区更加严重。过度放牧、过度开垦等人类活动是导致呼伦贝尔草原土地沙化的重要原因[21],频繁的放牧和刈割活动使土壤氮磷被植物带出系统,导致土壤中的全氮和速效氮磷减少。可溶性有机碳主要来源于植物凋落物、土壤腐殖质、根系腐解物及分泌物、微生物残体及代谢产物[22],而在沙化程度较严重的地区,由于植被盖度较低,植物途径输入的可溶性有机碳减少。此外,沙化土地土壤砂砾含量增加,黏粒含量减少,水分入渗条件好,水分、养分向下迁移,不易留存在表层土壤,造成可溶性有机碳和氮磷等养分淋失。虽然土壤硝态氮含量随沙化程度加剧显著下降,但铵态氮含量呈逐渐增加的趋势。在氮循环过程当中,微生物首先将有机氮矿化为铵态氮,再通过硝化作用将铵态氮转变为硝态氮。重度沙化区,铵态氮相对积累的原因可能是硝化作用受到限制。有研究发现,*Noviherbaspirillum*, *Nitrospira*(硝化螺菌属)等硝化相关菌属对土壤沙化过程响应敏感,其相对丰度在沙化加剧过程中显著降低[23]。此外,铵态氮作为阳离子,易被土壤胶体吸附;在植被覆盖度较低的重度沙化区,植物对养分的吸收能力有限,多余的铵态氮

以吸附态形式留存于土壤中，从而表现出铵态氮的相对积累。相反，硝态氮作为阴离子，不易被土壤胶体吸附，在沙质土壤中更容易随水分淋溶损失，这也进一步加剧硝态氮含量的下降。

随着土地沙化程度增加，土壤中微生物生物量呈下降趋势（图3a，3b）。在青藏高原东部沙漠化草地开展的相关研究也发现，随着沙化程度加剧，微生物生物量显著降低[24]。一方面，沙化区域土地干旱且养分贫瘠；另一方面，植被盖度较小，导致植物来源的有机质较少，微生物缺乏生长所需的碳源、氮源，从而限制生长。本研究还发现，随着土地沙化程度加剧，土壤基础呼吸、底物诱导呼吸以及土壤β-1，4-葡萄糖苷酶、N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶、酸性磷酸酶以及碱性磷酸酶活性均显著下降（$p<0.05$）。土壤呼吸和土壤酶活性反映了微生物的生长代谢活动，微生物生物量的减少也直接导致了土壤呼吸和酶活性下降。此外，随着土地沙化程度加剧，土壤有机质含量降低，底物和能量供给受限，从而抑制胞外酶的合成与分泌。胞外酶释放到土壤环境后，既可以游离态存在，也可吸附于土壤有机质或矿物颗粒表面。游离态酶通常更易发生构象改变、失活或被其他酶降解，而吸附于土壤颗粒表面的酶被认为能够获得一定程度的物理保护，从而降低其降解速率并延长其功能寿命。有研究表明，土壤中酶的吸附和稳定程度通常随黏粒含量的增加而增强[25]，因此，在重度沙化区，由于土壤有机质和黏粒含量极低，不利于胞外酶在土壤中的吸附与保存，可能进一步加剧酶活性的下降。在青藏高原开展的研究也表明，土壤呼吸和酶活性随着荒漠化程度加剧而下降[23,26]。

3.2 不同施肥处理对植被恢复及土壤特性的影响

本研究发现各施肥处理提高植被盖度和土壤速效氮、磷养分含量，并对微生物底物诱导呼吸水平和酶活性也表现出一定的促进作用，表明在呼伦贝尔沙地，施肥是促进植被快速恢复的有效措施。相关性分析表明，植被盖度与土壤铵态氮、硝态氮、有效磷、底物诱导呼吸以及β-1，4-葡萄糖苷酶、N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶和酸性磷酸酶活性呈显著正相关。植被生长（盖度）与土壤特性的作用是相互的，一方面，施肥改善土壤特性，促进植被生长；另一方面，植被恢复过程中，凋落物分解、根系分泌物和光合碳输入又进一步提高土壤养分、改善土壤结构。

化肥易溶于水，养分释放快，可在短期内迅速提高土壤养分水平，为植物生长提供有利条件。研究结果表明，单施化肥（MF）显著提高中度和重度沙化区的植被盖度（$p<0.05$），而对轻度沙化区植被盖度的提升作用不显著（$p>0.05$）。这可能与轻度沙化区较高的初始植被盖度（48.33%）有关，在该条件下，化肥投入所释放的养分优先被原有植被吸收，用于增强个体生长和生理活性，而非促进新植被定植，从而导致植被盖度未显著增加。例如，在美国草原生态系统开展的研究表明，在养分相对匮乏的条件下，氮添加增加根系生物量，磷添加提高根系生产力[27]。在轻度沙化区，单施化肥处理（MF）显著提高微生物基础呼吸、底物诱导呼吸以及β-1，4-葡萄糖苷酶和N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶活性。一方面，化肥提供的大量速效养分缓解微生物的养分限制，直接促进微生物活性[28]；另一方面，土壤养分含量以及微生物活性的提高促进植物生长，向土壤中输入更多根系分泌物、植物凋落物等光合碳，这些地下碳输入进一步刺激微生物代谢活动，形成良性的“土壤养分-微生物-植物”反馈。

沙地土壤结构疏松，孔隙度大，保水保肥能力较弱，化肥提供的速效养分易发生淋溶损失，从而导致其利用效率较低。我们的研究表明，有机肥部分替代化肥（MO）和单施有机肥处理（OF）在促进植被盖度恢复方面均显著优于单施化肥（MF）。一方面，有机肥含有大量有机质，能显著改善团聚体结构，增强保水保肥能力，为种子萌发和植被生长提供更加稳定和适宜的生境条件。另一方面，有机肥具有缓释养分的特性，养分释放过程相对平缓且持续时间较长，有利于在整个生长季为植物提供稳定的养分供给。本研究中，单施有机肥处理（OF）一年后，土壤中仍维持较高的铵态氮含量，提高了养分利用效率，尤其是中度和重度沙化区。在甘肃地区沙地开展的不同施肥处理效应的研究也表明，有机肥部分替代化肥促进植物的生长及其对氮素的利用能力，减少硝态氮的淋失，使得地上植被生物量显著提高[29]。

本研究还发现施用保水剂和黏合剂的处理（MA，MOA）植被盖度显著高于相应未施用保水剂黏合剂的处理（MF，MO）。保水剂在水分和养分相对充足时能够吸收并暂存多余的水分和养分，在水分和养分供给不足时再逐步释放；黏合剂通过促进土壤团聚体形成，改善土壤结构并减少水分和养分的淋溶损失，二者共同作用，为植物生长提供稳定和适宜的条件，从而显著提高植被盖度。相关研究也表明，在沙化土壤中适量施用保水剂能够促进植物对土壤养分的吸收，并有利于种子出苗和植株生长[30]。在本研究中，施用保水剂并未显著提高土壤养分和含水量，这可能与采样时间有关，在生长旺季，施用保水剂和黏合剂导致植被盖度增加更多更

快,植被生长带走土壤中大量的水分和养分,因此导致保水剂和黏合剂对土壤养分水分的储留作用消失,未表现出土壤含水量的显著增加。

3.3　不同沙化区施肥策略的优化选择

研究发现,施肥处理对植被盖度和土壤特性的改良效果在不同沙化区表现出明显差异,可能是由于不同沙化区在微地形、微气候、植被盖度、土壤养分及物理结构等方面存在差异。与中度、重度沙化区相比,轻度沙化区在不施肥处理下,植被覆盖度(48.33%)、土壤养分和微生物生物量较高,表明轻度沙化区的土壤团聚体状况较好,漏水漏肥状况也相对较轻。轻度沙化区与其他沙化区相比,在化肥配施保水剂和黏合剂处理(MA)下,不仅显著提高植被盖度,而且铵态氮、硝态氮、有效磷含量显著升高。化肥养分释放周期短,轻度沙化区土壤速效氮磷养分含量在施肥后可维持较高水平,表明该处理可有效激活土壤养分的内部循环过程。化肥提供的速效养分直接或间接刺激微生物代谢活动,从而加快土壤养分转化;同时,保水剂和黏合剂的配施通过降低养分淋溶损失并改善土壤结构稳定性,为"植被-微生物-土壤"耦合的养分循环过程提供更加有利的条件。化肥配施保水剂黏合剂处理(MA)促进轻度沙化区生态系统功能的恢复,推动系统逐步向自我维持状态转变。在中度沙化区,所有施肥处理均显著提高植被盖度,处理间差异不显著。在此基础上,有机无机配施保水剂和黏合剂处理(MOA)还显著提高土壤可溶性有机碳、硝态氮和有效磷含量,铵态氮含量也有增加的趋势。在重度沙化区,原本植被覆盖度较低,土壤沙化程度高,几乎没有团聚体结构,存在严重的漏水漏肥现象,土壤养分贫瘠,微生物数量少、活性低。有机肥部分替代化肥处理(MO)不仅显著提高植被盖度,还显著提升土壤铵态氮、硝态氮和有效磷含量。有机-无机配施形成"速效-缓释"协同的养分供给模式。化肥为植物和微生物提供可直接吸收的速效养分,促进植被快速建立并激活微生物代谢活动;与此同时,有机肥一方面通过增加土壤有机质改善土壤结构,增强保水保肥能力。另一方面在微生物作用下持续释放养分。上述作用共同促进重度沙化区土壤养分的改良和植被恢复。

4　结 论

(1) 土地沙化导致土壤肥力和微生物活性显著下降。与轻度沙化区相比,中度和重度沙化区土壤含水量、可溶性有机碳、硝态氮和有效磷含量分别下降 9.15%～39.33%, 33.98%～62.95%, 37.41%～68.15% 和 38.18%～44.16%。同时,土壤基础呼吸、底物诱导呼吸、β-1,4-葡萄糖苷酶活性、N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶活性和酸性磷酸酶活性分别下降 21.42%～56.34%, 48.46%～71.97%, 32.73%～37.25%,61.93%～69.27% 和 59.10%～60.65%。

(2) 各施肥处理均显著提高植被盖度,轻度沙化区植被盖度由 48.33% 提高至 59.81%～94.63%;中度沙化区植被盖度由 25.93% 提高至 83.89%～91.85%;重度沙化区植被盖度由 5.56% 提高至 74.07%～97.96%。总体来看,配施有机肥和保水剂/黏合剂的处理植被盖度恢复效果更优。施肥处理提高土壤速效氮磷养分含量和微生物活性,植被盖度与土壤铵态氮、硝态氮、有效磷、微生物底物诱导呼吸以及β-1,4-葡萄糖苷酶、N-乙酰-β-D-葡萄糖苷酶和酸性磷酸酶活性显著正相关。

(3) 综合考虑植被恢复效果和土壤养分改善程度,建议不同沙化程度的土壤采用相适宜的施肥措施。在轻度沙化区域推荐使用化肥配施保水剂和黏合剂处理,有效激活"植被-微生物-土壤"耦合的养分循环过程;在中度沙化区域推荐使用有机无机配施保水剂和黏合剂处理,可显著提高植被盖度以及土壤可溶性有机碳、硝态氮和有效磷含量;在重度沙化区域推荐使用有机肥部分替代化肥处理,通过"速效-缓释"协同供肥机制,改善土壤养分状况并促进植被恢复。

参考文献(References)

[1] 张天琪,杨光,刘峰,等.呼伦贝尔沙地2000—2020年土地利用变化及生态服务价值[J].水土保持通报,2021,41(4):331-338.
Zhang Tianqi, Yang Guang, Liu Feng, et al. Land use change and ecological service value of Hulun Buir sandy land from 2000 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(4):331-338.

[2] 万勤琴,朴起亨,丁国栋,等.呼伦贝尔沙地草场沙漠化成因分析[J].水土保持研究,2007,14(4):263-266.
Wan Qinqin, Park K H, Ding Guodong, et al. Analysis on the reason of sandy desertification in Hulunber steppe [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007,14(4):263-266.

[3] 郭坚,薛娴,王涛,等.呼伦贝尔草原沙漠化土地动态变化过程研究[J].中国沙漠,2009,29(3):397-403.
Guo Jian, Xue Xian, Wang Tao, et al. Dynamic variation of aeolian desertified land in Hulun Buir grassland [J]. Journal of Desert Research, 2009,29(3):397-403.

[4] 冯宇,王文杰,刘军会,等.呼伦贝尔草原生态功能区防风固沙功能重要性主要影响因子时空变化特征[J].环境工程技术学报,2013,3(3):220-230.

Feng Yu, Wang Wenjie, Liu Junhui, et al. Spatial and temporal variation of main impact factors and importance of wind break and sand-fixing function in Hulun Buir grassland eco-function area [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2013,3(3):220-230.

[5] 李姣,张春来,李庆,等.近15年来呼伦贝尔沙地土地沙漠化发展及其驱动力[J].北京师范大学学报(自然科学版),2017,53(3):323-328.
Li Jiao, Zhang Chunlai, Li Qing, et al. Development of sandy desertification and driving forces in Hulun Buir sandy land in the past 15 years [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2017, 53(3): 323-328.

[6] Zong Ning, Shi Peili, Zheng Lili, et al. Restoration effects of fertilization and grazing exclusion on different degraded alpine grasslands: Evidence from a 10-year experiment [J]. Ecological Engineering, 2021, 170: 106361.

[7] Zheng Lina, Zhao Wei, Gao Shaobo, et al. Fertilization promotes the recovery of plant productivity but decreases biodiversity in a Khorchin degraded grassland [J]. Nitrogen, 2025,6(3):64.

[8] Wang F L, Alva A K. Leaching of nitrogen from slow-release urea sources in sandy soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1996,60(5):1454-1458.

[9] Minhal F, Ma'as A, Hanudin E, et al. Improvement of the chemical properties and buffering capacity of coastal sandy soil as affected by clays and organic by-product application [J]. Soil and Water Research, 2020,15(2): 93-100.

[10] Meng Lei, Ding Weixin, Cai Zucong. Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N_2O emissions, soil quality and crop production in a sandy loam soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005,37(11):2037-2045.

[11] Shu Xiangyang, He Jia, Zhou Zhenghu, et al. Organic amendments enhance soil microbial diversity, microbial functionality and crop yields: A meta-analysis [J]. Science of the Total Environment, 2022,829:154627.

[12] Chen Qian, Xie Junhong, Li Lingling, et al. Partial substitution of chemical fertilizer with organic fertilizer: A promising circular economy approach for improvement soil physical and chemical properties and sustainable crop yields [J]. Frontiers in Plant Science, 2025,16: 1565081.

[13] Gao Huizhou, Xi Yajing, Wu Xueping, et al. Partial substitution of manure reduces nitrous oxide emission with maintained yield in a winter wheat crop [J]. Journal of Environmental Management, 2023,326(B):116794.

[14] 韩军,薛焘,胡宇,等.保水剂在牧草生产和草地沙化治理中的应用现状与前景[J].中国农学通报,2024,40(3):158-164.
Han Jun, Xue Tao, Hu Yu, et al. Application status and prospect of super absorbent polymer in forage production and desertification control [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024,40(3):158-164.

[15] 员学锋,吴普特,汪有科,等.施加PAM条件下土壤养分淋溶试验研究[J].水土保持通报,2003,23(2):26-28.
Yun Xuefeng, Wu Pute, Wang Youke, et al. A study on effect of PAM on eluviations of soil nutrient [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2003,23(2):26-28.

[16] 朱震达.中国土地荒漠化的概念、成因与防治[J].第四纪研究,1998,18(2):145-155.
Zhu Zhenda. Concept, cause and control of desertification in China [J]. Quaternary Sciences, 1998,18(2): 145-155.

[17] 王志瑞,杨山,马锐骜,等.内蒙古草甸草原土壤理化性质和微生物学特性对刈割与氮添加的响应[J].应用生态学报,2019,30(9):3010-3018.
Wang Zhirui, Yang Shan, Ma Ruiao, et al. Responses of soil physicochemical properties and microbial characteristics to mowing and nitrogen addition in a meadow steppe in Inner Mongolia, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019,30(9):3010-3018.

[18] Zhang Fang, Zhu Benzhen, Zheng Jing, et al. Soil properties as indicators of desertification in an Alpine meadow ecosystem of the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2013,70(1): 249-258.

[19] 阎欣,刘任涛,安慧.土壤易氧化有机碳与溶解性有机碳对荒漠草地沙漠化过程中土壤碳库变异的表征[J].草业学报,2018,27(11):15-25.
Yan Xin, Liu Rentao, An Hui. Characterization of readily oxidizable carbon and dissolved organic carbon within the soil carbon pool during desertification of grassland in central China [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018,27(11):15-25.

[20] Yang M H, Ma Z Z, Zhang M C. Response of soil organic carbon and total nitrogen stocks to desertification of China agropastoral transitional zone: A study of the southeastern edge of the Mu Us sandy land [J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2020,18(2):2975-2988.

[21] 聂浩刚,岳乐平,杨文,等.呼伦贝尔草原沙漠化现状、发展态势与成因分析[J].中国沙漠,2005,25(5):635-639.
Nie Haogang, Yue Leping, Yang Wen, et al. Present situation, evolution trend and causes of sandy desertification in Hulunbuir steppe [J]. Journal of Desert Research, 2005,25(5):635-639.

[22] Gmach M R, Cherubin M R, Kaiser K, et al. Processes

that influence dissolved organic matter in the soil: A review [J]. Scientia Agricola, 2020,77(3):e20180164.

[23] 朱灵,李易,杨婉秋,等.沙化对高寒草地土壤碳、氮、酶活性及细菌多样性的影响[J].水土保持学报,2021,35(3):350-358.
Zhu Ling, Li Yi, Yang Wanqiu, et al. Effect of desertification on soil carbon and nitrogen, enzyme activity and bacterial diversity in alpine grassland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(3):350-358.

[24] Hu Yufu, Jiang Shuanglong, Yuan Shu, et al. Changes in soil organic carbon and its active fractions in different desertification stages of alpine-cold grassland in the eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. Environmental Earth Sciences, 2017,76(9):348.

[25] Sarkar J M, Leonowicz A, Bollag J M. Immobilization of enzymes on clays and soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1989,21(2):223-230.

[26] Zhang Fang, Wang Tao, Xue Xian, et al. The response of soil CO_2 efflux to desertification on Alpine meadow in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Environmen tal Earth Sciences, 2010,60(2):349-358.

[27] Keller A B, Walter C A, Blumenthal D M, et al. Stronger fertilization effects on aboveground versus belowground plant properties across nine U.S. grasslands [J]. Ecology, 2023,104(2):e3891.

[28] Liu Yang, Chen Qianmei, Wang Zexi, et al. Nitrogen addition alleviates microbial nitrogen limitations and promotes soil respiration in a subalpine coniferous forest [J]. Forests, 2019,10(11):1038.

[29] 杨荣,苏永中.不同施肥对黑河中游边缘绿洲沙地农田玉米产量及土壤硝态氮积累影响的初步研究[J].中国沙漠,2010,30(1):110-115.
Yang Rong, Su Yongzhong. Effects of fertilization on grain yield and nitrate accumulation in oasis sandy farmland in middle Heihe River basin [J]. Journal of Desert Research, 2010,30(1):110-115.

[30] 庄文化,冯浩,吴普特.高分子保水剂农业应用研究进展[J].农业工程学报,2007,23(6):265-270.
Zhuang Wenhua, Feng Hao, Wu Pute. Development of super absorbent polymer and its application in agriculture [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007,23(6):265-270.

(上接第 9 页)

[18] Watakabe T, Matsushi Y. Lithological controls on hydrological processes that trigger shallow landslides: Observations from granite and hornfels hillslopes in Hiroshima, Japan [J]. Catena, 2019,180:55-68.

[19] Liu Qixin, Tang Liansheng, Chen Yang. Response of soil-water characteristics to pore structure of granite residual soils [J]. Soils and Foundations, 2023,63(6):101395.

[20] DiBiagio A, Capobianco V, Oen A, et al. State-of-the-art: Parametrization of hydrological and mechanical reinforcement effects of vegetation in slope stability models for shallow landslides [J]. Landslides, 2024,21(10):2417-2446.

[21] Li Mingfeng, Yao Jingjing, Yan Ru, et al. Effect of slope position on the spatial distribution of soil preferential flow paths based on point pattern analysis [J]. PLoS One, 2024,19(12):e0315660.

[22] Nian Gengqian, Chen Zhonghui, Bao Min, et al. Rainfall infiltration and three-dimensional stability analyses of fractured rock slopes considering preferential flow [J]. Natural Hazards, 2023,118(3):2629-2656.

[23] Nimmo J R, Wiekenkamp I, Araki R, et al. Identifying preferential flow from soil moisture time series: Review of methodologies [J]. Vadose Zone Journal, 2025,24(2):e70017.

[24] Filipović V, Defterdarović J, Šimůnek J, et al. Estimation of vineyard soil structure and preferential flow using dye tracer, X-ray tomography, and numerical simulations [J]. Geoderma, 2020,380:114699.

[25] Kumar V, Sharma K V, Caloiero T, et al. Comprehensive overview of flood modeling approaches: A review of recent advances [J]. Hydrology, 2023,10(7):141.

[26] Ng C W W, Zhou Chao, Ni Junjun. Advanced unsaturated soil mechanics: theory and applications [M]. London: CRC Press, 2024:64-68.

[27] Dou Hongqiang, Xie Senhua, Jian Wenbin, et al. Characteristics of preferential flow suffosion of soil-rock interface in spherical weathered granite slopes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024,45(4):950-960.