

DOI: 10.11686/cyxb2025084

http://cyxb.magtech.com.cn

刘冬娅, 杨燕, 刘静, 等. 短期羊粪归还对荒漠草地土壤质量的影响. 草业学报, 2026, 35(2): 28—39.

LIU Dong-ya, YANG Yan, LIU Jing, *et al.* Effects of short-term sheep manure return on soil quality of desert steppe. *Acta Prataculturae Sinica*, 2026, 35(2): 28—39.

短期羊粪归还对荒漠草地土壤质量的影响

刘冬娅¹, 杨燕¹, 刘静¹, 王博¹, 李志刚^{1,2*}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 盐池北部荒漠草原宁夏回族自治区野外科学观测研究站, 宁夏 银川 750021)

摘要:放牧家畜的粪便归还还在草地土壤养分循环和物理性质改善等方面具有重要作用,但短期家畜粪便归还对荒漠草地土壤质量的影响仍缺乏关注。本研究以宁夏盐池荒漠草地为对象,模拟不同放牧强度下的羊粪蓄积量,探究了4种不同水平的羊粪蓄积量(MN:0 kg·hm⁻²;ML:4000 kg·hm⁻²;MM:8000 kg·hm⁻²;MH:16000 kg·hm⁻²)对土壤质量的影响。结果表明:1)羊粪归还2年后,土壤温度随着羊粪蓄积量的增加而升高,但土壤平均温度仅MH显著高于MN、ML和MM($P<0.05$);土壤平均含水量也仅MH显著高于ML和MM($P<0.05$)。2)随着羊粪蓄积量的增加,pH值呈降低趋势,但土壤胞外酶活性呈增加趋势。3)羊粪归还促进了土壤大团聚体的形成,而降低了微团聚体的数量,说明土壤团聚体稳定性随着羊粪蓄积量的增加而增强。4)与MN相比,ML、MM和MH显著增加了土壤质量指数($P<0.05$);相关性分析和结构方程模型进一步表明,羊粪归还改善了土壤水热状况,激发了土壤碳氮循环相关酶活性,从而增加了土壤养分的输入及大团聚体的数量,并最终改善了土壤质量。总之,低、中和高羊粪归还量均能够有效改善土壤质量状况,可为退化草地土壤的恢复提供理论依据和实践参考。

关键词:荒漠草原;羊粪蓄积;胞外酶;土壤养分;团聚体;土壤质量

Effects of short-term sheep manure return on soil quality of desert steppe

LIU Dong-ya¹, YANG Yan¹, LIU Jing¹, WANG Bo¹, LI Zhi-gang^{1,2*}

1. School of Forestry and Grassland Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Northern Yanchi Desert Grassland and Observation and Research Station of Ningxia, Yinchuan 750021, China

Abstract: The return of livestock manure through grazing plays a significant role in grassland soil nutrient cycling and improvement of physical properties. However, the impact of short-term livestock manure return on soil quality in desert steppes remains understudied. This research simulated sheep manure accumulation under different grazing intensities to explore the effects of four manure accumulation levels (MN, 0 kg·ha⁻¹; ML, 4000 kg·ha⁻¹; MM, 8000 kg·ha⁻¹; MH, 16000 kg·ha⁻¹) on soil quality of a desert steppe in Yanchi, Ningxia. The results demonstrated: 1) After two years of manure application, soil temperature tended to increase with increased manure accumulation level, although the average soil temperature differed significantly only in MH compared to MN, ML and MM ($P<0.05$). Similarly, average soil moisture content was significantly higher in MH than in ML and MM ($P<0.05$). 2) Soil pH decreased while extracellular enzyme activity increased with increased manure accumulation. 3) Manure return promoted the formation of soil macro-aggregates while reducing the proportion of micro-aggregates quantities, and the soil stability increased with increased accumulation of sheep manure. 4) Compared to MN, ML,

收稿日期:2025-03-12;改回日期:2025-04-29

基金项目:宁夏重点研发项目(2021BEG03010,2021BEB04002)和宁夏自然科学基金(2022AAC05013)资助。

作者简介:刘冬娅(1999—),女,山东德州人,在读硕士。E-mail: 573724324@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: lizg001@sina.com

MM and MH also significantly enhanced the soil quality index ($P < 0.05$). Correlation analysis and structural equation modelling further revealed that manure return improved soil hydrothermal conditions, and stimulated enzyme activities related to carbon and nitrogen cycling, thereby increasing nutrient inputs and macro-aggregate formation, and ultimately enhancing soil quality. In conclusion, low, medium and high levels of manure application effectively improved soil quality, providing both a theoretical foundation and practical guidance for restoring degraded grassland soils.

Key words: desert steppe; sheep manure accumulation; extracellular enzymes; soil nutrients; aggregates; soil quality

草地作为我国主要的植被类型之一,其覆盖面积约达国土面积的 40%,在畜牧业生产及陆地生态系统的功能与服务方面,具有重要的作用^[1]。然而,受自然因素与人为因素的双重干扰,草地退化现象日益严重,已然成为我国严峻的环境挑战之一^[2]。过度放牧是造成草地退化的主要因素之一,尤其在干旱半干旱地区,过度放牧使得植被盖度下降,土壤结构破坏,最终造成土壤状况的持续恶化^[3]。然而,通过适当的放牧方式,家畜的粪便沉积和分解可以在草地土壤养分循环和草地恢复中发挥积极作用^[4]。也有研究表明,返还或施用家畜粪便可有效提高草地土壤肥力和生产力^[5]。此外,家畜粪便由于含有高浓度的易分解碳和氮化合物,可为土壤微生物和一些土壤动物提供易于获取的营养物质^[6-8]。因此,放牧过程中家畜排泄物的地表蓄积是一种天然的施肥过程,在土壤质量改善及退化草地修复方面具有重要的意义。

荒漠草地是一种脆弱的生态系统类型,极易受到气候变化及人类活动的影响而发生退化,而土壤养分和水分匮乏是制约其恢复的主要限制性因素之一^[9]。许多学者就荒漠草地的恢复进行了大量研究,如张茹等^[10]发现柠条(*Caragana korshinskii*)枝条覆盖能显著改善荒漠草地的土壤水热条件,为牧草生长提供良好的环境;南万璐等^[11]证明了围栏封育有利于退化荒漠草地的恢复;苏洁琼等^[12]证实施用化肥对荒漠化草原草本植物的种群密度和生物量亦具有显著的促进作用。此外,一些学者针对家畜粪便归还草地也做了相关研究,包括家畜粪便归还可以提高高寒草地^[13]、典型草地^[14]等不同草地类型的土壤肥力及植被生产力。然而,家畜粪便归还对荒漠草地影响的研究相对缺乏,特别是短期的放牧家畜粪便归还对退化荒漠草地土壤理化性质的影响尚不明确。此外,土壤质量指数(soil quality index, SQI)是将各种土壤属性整合的综合性指标,被广泛应用于评估不同土地管理实践下的土壤质量。目前,大多数评估土壤质量的研究集中于土地利用^[15]、土地管理^[16]和植被重建^[17]的影响上,但评估羊粪归还对荒漠草原土壤质量影响的研究较少。有研究表明,土壤质量指数作为评估土壤功能和健康状况的有效诊断指标,可以用来较好地评价退化草地的恢复状况,尤其是荒漠草地对养分添加更加敏感^[18]。因此,本研究设置了 4 种水平的羊粪蓄积量来探究羊粪归还对荒漠草地土壤质量指数的影响,为退化荒漠草地恢复与可持续管理提供借鉴意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于宁夏盐池县北部(106°03'—107°47' E, 37°04'—38°10' N),草地类型为荒漠草地,海拔为 1380~1600 m。研究区是典型的温带大陆性气候,日照充足,但常年干旱少雨,年均降水量 250~350 mm,年均气温 8.1 °C,极端最高温度为 37 °C,极端最低温度为 -27.1 °C。土壤质地为砂质壤土,灰钙土。试验样地的主要植物种为牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)、刺沙蓬(*Salsola tragus*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)等。

1.2 样地设置

2020 年 9 月本研究选择了地势平坦且退化程度一致的草地开展试验,采用随机区组试验设计,共设计以下 4 个处理:1) 无羊粪蓄积(0 kg·hm⁻², MN)为对照组,2) 低羊粪蓄积量(4000 kg·hm⁻², ML),3) 中羊粪蓄积量(8000 kg·hm⁻², MM)和 4) 高羊粪蓄积量(16000 kg·hm⁻², MH)。其中 16000 kg·hm⁻²接近于本研究区长期放牧

草地在最大放牧强度下的地表羊粪蓄积量 $15816.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[19],也接近于国内其他学者所添加的最大羊粪施用量 $15000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[13-14]。因此,本试验以 $16000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 来模拟重度放牧强度下的羊粪蓄积量,以 4000 和 $8000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 模拟当地轻度和中度放牧强度下的羊粪蓄积量。所施羊粪的有机碳含量为 $198.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量为 $12.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。所有试验小区羊粪在2020年9月一次性施入,后期再无额外羊粪施入。以上每个处理4次重复,小区面积为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$,每两个小区间距 2 m 。样地布置完后设置围栏以防止大型草食动物啃食草地对样地造成破坏。

1.3 土壤样品采集及指标测定

2022年7月采集土壤样品。考虑到短期羊粪归还对土壤的影响主要集中于表层,因此每个处理小区按3点法取样,采集 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 深度的土壤样品用于检测。将土壤样品装入自封袋排完气体后,放入装有冰袋的保温箱内,尽快运至实验室。采回的新鲜土样混匀后过 2 mm 筛,去除石粒、根系等杂质,分成2部分,一部分自然阴干用于土壤的化学性质测定;另一部分暂时储存在 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱内,用于测定土壤胞外酶活性。

土壤水分和温度测定:在2022年4—9月的每月10号进行测定,土壤含水量使用直径为 2 cm 的土钻采集 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 的土壤样品,立即密封在铝盒中并采用烘干法进行测定^[20]。在测定土壤水分当天的 $8:00$ 、 $14:00$ 、 $18:00$ 分别利用地温计(JZ-TW,北京九州晟欣)测定 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 的土壤温度并记录。

土壤团聚体测定:采用干筛沙维诺夫法^[21],首先从土壤自然裂开的纹理处轻轻掰成小块,去掉土壤中残余的石块和植物的根系。然后取 500 g 左右小土块称重处理,置于套筛上,筛孔大小自上而下的排列顺序为 5.00 、 2.00 、 0.50 、 0.25 mm ,最后加筛盖和筛底并水平晃动,直至筛上的土块不再下漏为止。土壤筛完后对 $>5 \text{ mm}$ 、 $2 \sim 5 \text{ mm}$ 、 $0.5 \sim 2.0 \text{ mm}$ 、 $0.25 \sim 0.50 \text{ mm}$ 、 $<0.25 \text{ mm}$ 粒级的团聚体烘干称重并计算各粒级所占重量比例。根据 Tisdall 等^[22]的分级标准对团聚体进行分级,其中 $>5 \text{ mm}$ 、 $2 \sim 5 \text{ mm}$ 、 $0.5 \sim 2.0 \text{ mm}$ 、 $0.25 \sim 0.50 \text{ mm}$ 属于大团聚体, $<0.25 \text{ mm}$ 属于微团聚体。

土壤化学性质测定:土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)含量的测定采用重铬酸钾外加热法;土壤全氮(soil total nitrogen, TN)、土壤碱解氮(soil alkali hydrolysable nitrogen, AN)含量采用扩散法测定;土壤全磷(soil total phosphorus, TP)含量采用氢氧化钠碱熔—钼锑抗比色法测定;土壤速效磷(soil available phosphorus, AP)用双酸浸提法测定;土壤 pH 采用电位法测定;以上指标的测定方法参照鲍士旦^[23]主编的《土壤农化分析(第三版)》。

土壤胞外酶活性测定:本试验测定了3种与土壤碳循环相关的酶: β -1,4-葡萄糖苷酶(β -1,4-glucosidase, GC)、纤维素酶(cellulase, CL)和 β -1,4-木糖苷酶(β -1,4-xylosidase, YYS),以及3种与土壤氮循环相关的酶:脲酶(urease, UE)、亮氨酸氨基肽酶(leucine aminopeptidase, LAP)和 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(β -1,4-N-acetylglucosaminidase, NAG)^[24]。其中纤维素酶活性用比色法测定^[25]; β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶的活性采用比色法通过检测酶水解底物后生成的产物来定量分析^[26]; β -1,4-葡萄糖苷酶活性测定采用荧光微孔板法,即采用对硝基苯酚- β -D-葡萄糖苷(p-nitrophenyl- β -D-glucopyranoside, pNPG)法^[27];亮氨酸氨基肽酶活性的测定采用7-氨基-4-甲基香豆素作为底物进行荧光标记^[28];脲酶活性则采用苯酚钠一次氯酸钠比色法测定^[29]; β -1,4-木糖苷酶活性测定参考 Schmitt 等^[30]描述的方法。

1.4 数据分析

采用Excel整理数据,利用SPSS 27.0进行处理间各项指标的单因素方差分析(ANOVA),采用Pearson相关性分析探讨土壤的水热、物理性质、化学性质和胞外酶活性的变化。

土壤团聚体稳定性计算方法如下^[31]:

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (1)$$

$$\text{GMD} = \exp \left[\sum_{i=1}^n (W_i \times \ln X_i) \right] \quad (2)$$

式中:MWD(mean weight diameter)为平均重量直径;GMD(geometric mean diameter)为几何平均直径; X_i 为各组分土壤团聚体的平均直径(mm); W_i 为各组分土壤团聚体所占比例(%)。

土壤质量指数的构建采用如下方法^[16,32-34]:首先,选择能够全面反映土壤物理、化学和生物学特性的指标,如土壤养分、酶活性及土壤孔隙度等,这些指标应具有代表性、可测量性、敏感性和相关性^[32]。通过主成分分析和相关性分析,建立最小数据集(minimum data set, MDS),保留解释数据集中至少 5.0% 方差的特征值>1 的主成分(principal component, PC),对于每个选定的主成分,仅选择绝对因子载荷在最大载荷值 10% 范围内的参数。此外,当在一个 PC 中保存多个参数时,进行相关性分析以确定其他参数是否冗余。若保留的参数显示出显著的相关性,只有最高加权的参数被保留在 PC 中。相反,若保留的参数无显著相关性,则所有参数都保留^[33]。然后计算各个指标的权重值,计算方式为各指标公因子方差占所选公因子方差之和的比例^[16]。此外,使用非线性评分函数对土壤指标进行标准化。

$$S = \frac{1}{1 + (x/x_m)^b} \quad (3)$$

式中:S 是土壤指标得分,范围从 0 到 1;x 和 x_m 分别是每个土壤指标的测量值和平均值;b 值遵循“越多越好”的原则,如土壤养分 $b = -2.5$;相反“越少越好”如土壤 pH 值,则 $b = 2.5$ ^[33]。最后,使用加权求和法计算 SQI^[34]。

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i S_i \quad (4)$$

式中:SQI 是土壤质量指数, W_i 是指标权重, S_i 是指标得分, n 是指标数量。较高的 SQI 值表明土壤质量较好。

最后采用 Origin 2020 进行绘图,并在 R 4.4.2 软件中,采用“Piecewise SEM”包构建结构方程模型。

2 结果与分析

2.1 短期羊粪归还对土壤水热及土壤胞外酶活性的影响

整体而言,4—9 月,土壤温度随着羊粪蓄积量的增加而呈增加趋势;但就平均值而言,与对照(MN)相比,仅高羊粪蓄积量(MH)显著提高了土壤温度(图 1a, $P < 0.05$),而 MN、ML 和 MM 间的平均土壤温度无显著差异($P > 0.05$)。4—9 月的土壤水分动态变化在处理间变化不显著,仅有 MH 在 7 月显著高于其他处理(图 1b, $P < 0.05$)。就土壤水分的平均值而言,虽然 MH 亦显著高于 ML 和 MM,但与 MN 无显著差异($P > 0.05$)。

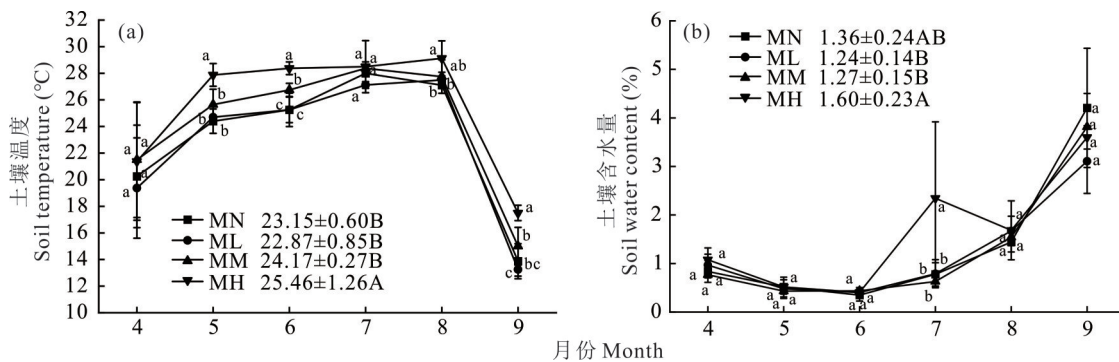


图 1 不同羊粪蓄积量对土壤温度和土壤含水量的影响

Fig. 1 Effects of different sheep manure volumes on soil temperature and soil water content

不同的大写字母代表 4—9 月份土壤温度和土壤含水量的平均值在不同羊粪蓄积量间存在显著差异($P < 0.05$),不同小写字母代表同一月份土壤温度和土壤含水量在不同羊粪蓄积量下存在显著差异($P < 0.05$)。MN: 无羊粪蓄积。ML: 低羊粪蓄积量。MM: 中羊粪蓄积量。MH: 高羊粪蓄积量。下同。Different uppercase letters represent significant differences in the average soil temperature and soil moisture content from April to September among different sheep manure accumulation amounts ($P < 0.05$), while different lowercase letters represent significant differences in soil temperature and soil moisture content for the same month under different sheep manure accumulation amounts ($P < 0.05$). MN: No sheep manure accumulation. ML: Low sheep manure accumulation. MM: Medium sheep manure accumulation. MH: High sheep manure accumulation. The same below.

对土壤酶活性的分析结果表明,整体上土壤酶活性随着羊粪添加量的增加而增加,且与未添加(MN)处理相比,3 种添加量均显著提高了 CL、NAG、GC 和 UE 的活性(图 2a, b, d, e; $P < 0.05$);此外, MH 和 MM 亦提高了土壤 LAP 和 XYS 的活性,并以 MH 处理的值最高(图 2c, f)。

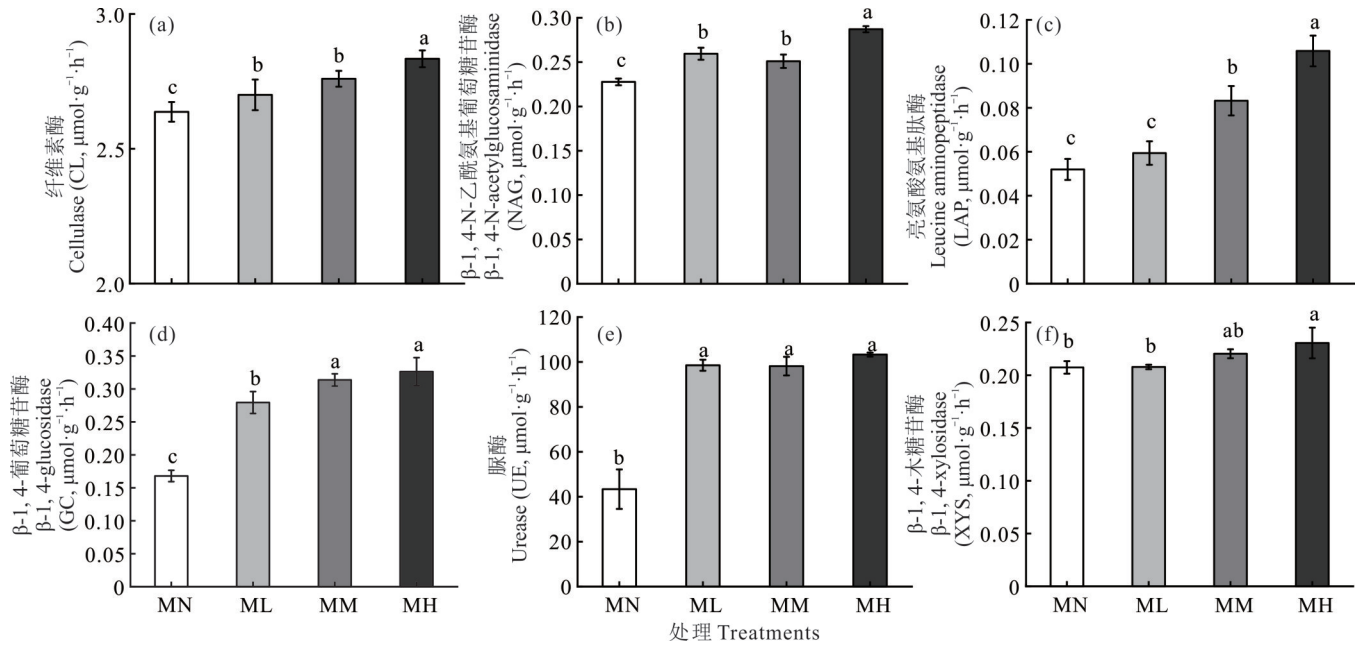


图2 不同羊粪蓄积量对土壤胞外酶活性的影响

Fig. 2 Effects of different sheep manure volumes on soil extracellular enzymes activity

不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$). The same below.

2.2 短期羊粪归还对土壤化学性质的影响

土壤SOC、TN、TP和AN含量在处理间呈现出MH>MM>ML>MN的趋势(图3b~e),而AP呈MH>MM=ML>MN的趋势(图3f)。土壤pH在处理间表现为MN>ML>MM>MH的趋势(图3a)。即短期羊粪归还增加了土壤养分,降低了土壤pH,且以高羊粪蓄积量增加养分的效果最佳($P < 0.05$)。

2.3 短期羊粪归还对土壤团聚体的影响

对土壤团聚体粒级的分析结果显示,相比于对照(MN),3种羊粪蓄积量均显著提高了>5 mm的团聚体数量

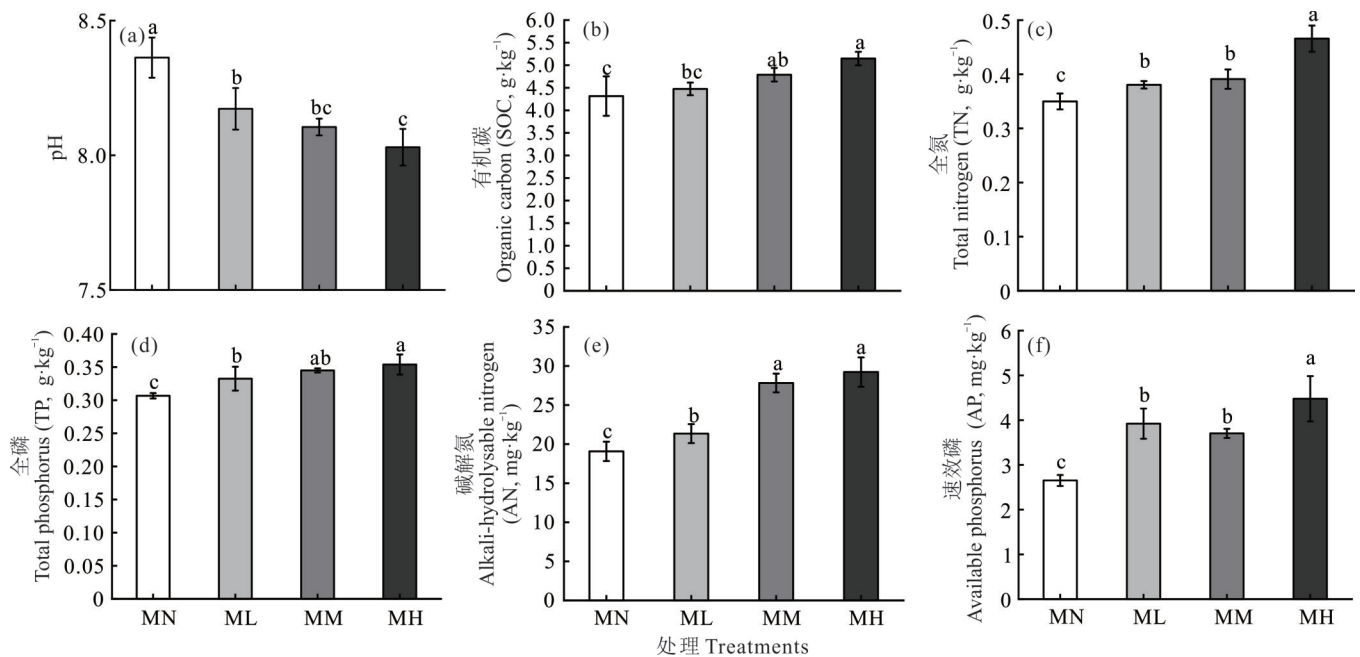


图3 不同羊粪蓄积量对土壤化学性质的影响

Fig. 3 Effects of different sheep manure volumes on soil chemical properties

($P < 0.05$), 而显著降低了 0.5~2.0 mm 和 0.25~0.50 mm 团聚体数量(图 4a, $P < 0.05$)。此外, 与 MN 相比, MH 还显著增加了 2~5 mm 的团聚体数量($P < 0.05$), 而显著降低了 < 0.25 mm 的团聚体数量(图 4a, $P < 0.05$)。然而, 处理 MH、MM 和 ML 的 0.5~2.0 mm 团聚体, 以及 MM、ML 和 MN 的 < 0.25 mm 团聚体数量无统计学差异(图 4a, $P > 0.05$)。相比于对照(MN), 3 种羊粪蓄积量均显著提高了 MWD(图 4b, $P < 0.05$), 同时, 与 MN 相比, 仅 MM 和 MH 显著提高了 GMD, ML 与 MN 间无显著差异(图 4c, $P > 0.05$)。

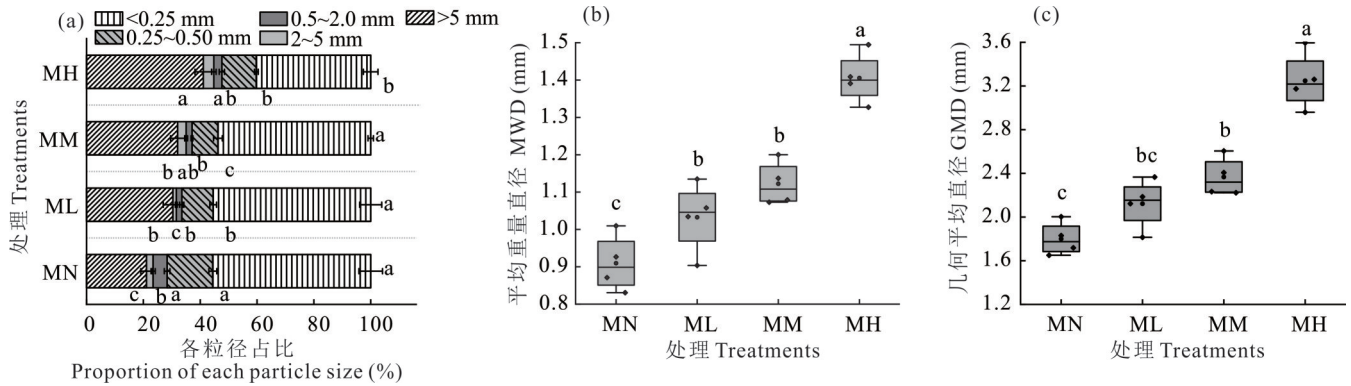


图 4 不同羊粪蓄积量对土壤团聚体的影响

Fig. 4 Effects of different sheep manure volumes on soil aggregates

MWD: 平均重量直径。GMD: 几何平均直径。MWD: Mean weight diameter; GMD: Geometric mean diameter.

2.4 土壤各理化性质间的相关性分析

相关性分析显示, 土壤温度与所有酶活性显著负相关(图 5, $P < 0.05$ 、0.01 或 0.001), 而土壤水分仅与 XY5 活性显著正相关($P < 0.05$)。土壤 pH 与土壤养分、酶活性和土壤温度显著负相关(图 5, $P < 0.05$), 而土壤养分指标(SOC、TN、TP、AN 和 AP)均与土壤酶活性(CL、NAG、GC、UE、LAP 和 XY5)显著正相关($P < 0.05$ 、0.01 或 0.001)。此外, 土壤 SOC 与 SWC(土壤含水量, soil water content)显著正相关($P < 0.05$)。 > 5 mm 的团聚体与所有测定的土壤养分及酶活性显著正相关(图 5, $P < 0.05$ 、0.01 或 0.001)。然而 0.5~2.0 mm、0.25~0.50 mm 和 < 0.25 mm 的土壤团聚体与绝大多数土壤养分和酶活性呈显著负相关($P < 0.05$ 、0.01 或 0.001), 而与 pH 显著正相关($P < 0.05$ 、0.01 或 0.001)。此外, < 0.25 mm 的土壤团聚体与土壤温度显著负相关($P < 0.001$)。对于土壤团聚体稳定性指标来说, MWD 和 GMD 与所有测定的土壤养分、土壤温度及酶活性显著正相关($P < 0.05$ 、0.01 或 0.001), 与土壤 pH 值极显著负相关($P < 0.001$), 与 0.25~0.50 mm 和 < 0.25 mm 的土壤团聚体显著负相关(图 5, $P < 0.05$ 、0.001)。

2.5 短期羊粪归还对土壤质量指数的影响

对所测定的 14 个土壤指标进行主成分分析, 提取了前 2 个主成分, 累积解释度为 85.943%。最终脲酶和 β -1,4-木糖苷酶被纳入土壤质量指数的构建(表 1)。结果表明, 与 MN 相比, ML、MH 和 MM 处理显著增加了 SQI(图 6, $P < 0.05$)。总体而言, 土壤质量指数在羊粪归还土壤的过程中呈上升趋势, 排序为 MH $>$ MM $>$ ML $>$ MN。

结构方程模型进一步表明, SQI 主要受到土壤胞外酶的直接正向影响(图 7a, $P < 0.001$), 而间接受到羊粪添加、土壤温度和土壤含水量的调控。此外, 土壤含水量直接负向影响土壤团聚体稳定性。羊粪添加可以直接影响土壤温度和土壤团聚体稳定性, 且羊粪添加一方面可以通过直接影响土壤酶活性, 从而影响土壤化学性质; 另一方面通过直接影响土壤酶活性, 进而影响土壤质量。总之, 羊粪添加及土壤胞外酶活性在土壤质量改善方面影响较大(图 7b)。

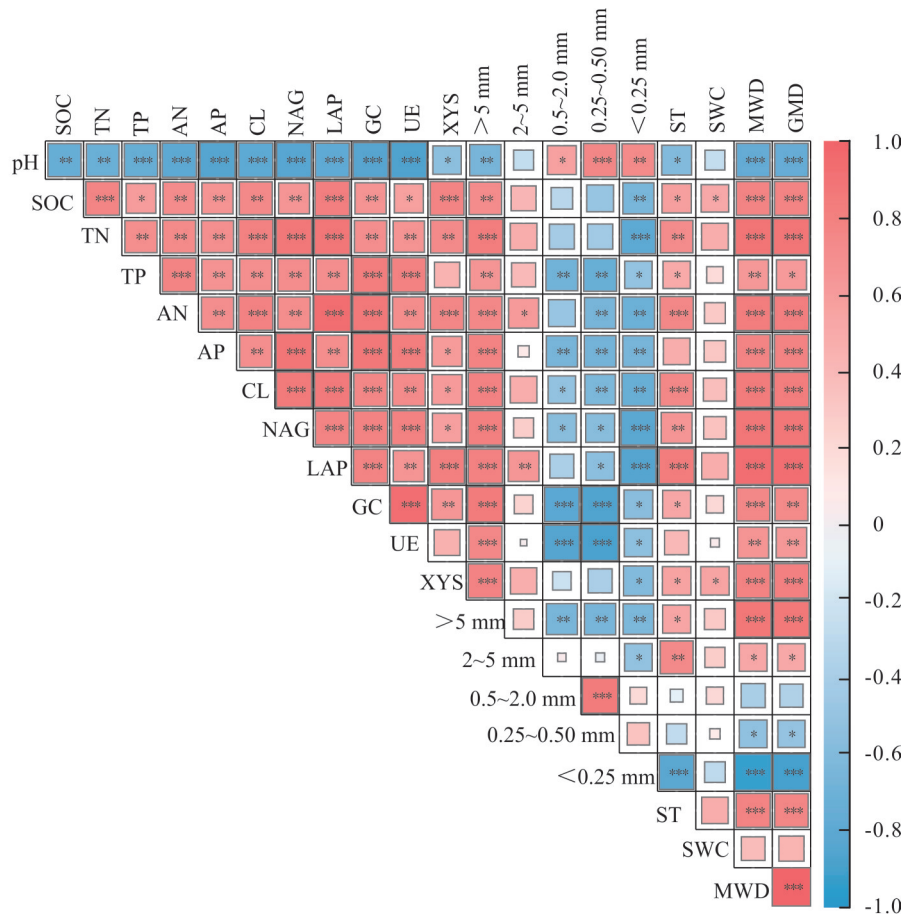


图5 土壤理化性质间的皮尔森相关性分析

Fig. 5 Pearson correlation analysis between soil physicochemical properties

蓝色代表负相关,粉色代表正相关,*表示 $P < 0.05$,**表示 $P < 0.01$,***表示 $P < 0.001$ 。SOC:土壤有机碳;TN:土壤全氮;TP:土壤全磷;AN:土壤碱解氮;AP:土壤速效磷;CL:纤维素酶;NAG: β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶;LAP:亮氨酸氨基肽酶;GC: β -1,4-葡萄糖苷酶;UE:脲酶;YYS: β -1,4-木糖苷酶;ST:土壤温度;SWC:土壤含水量;MWD:平均重量直径;GMD:几何平均直径。下同。Blue represents negative correlation, pink represents positive correlation. * indicates $P < 0.05$; ** indicates $P < 0.01$; *** indicates $P < 0.001$. SOC: Soil organic carbon; TN: Soil total nitrogen; TP: Soil total phosphorus; AN: Soil alkali-hydrolysable nitrogen; AP: Soil available phosphorus; CL: Cellulase; NAG: β -1,4-N-acetylglucosaminidase; LAP: Leucine aminopeptidase; GC: β -1,4-glucosidase; UE: Urease; YYS: β -1,4-xylosidase; ST: Soil temperature; SWC: Soil water content; MWD: Mean weight diameter; GMD: Geometric mean diameter. The same below.

3 讨论

3.1 短期羊粪归还对土壤水热和胞外酶活性的影响

土壤水热是影响荒漠草地生态系统健康发展的关键因素,对维持生态平衡、促进植被生长和应对气候变化具有重要影响^[10]。本研究结果显示,地表高羊粪蓄积量显著提高了土壤温度,这是因为羊粪具有热性肥料的特点,覆盖于土壤后,能够吸收更多的太阳辐射热量,且羊粪中含有丰富的纤维素和微生物,在分解过程中会释放热量,从而提高土壤温度^[35]。因此,羊粪蓄积有利于提高土壤保温作用,尤其在沙地土壤中,昼夜温差大,高羊粪蓄积能够缓冲土壤温度的变化,利于植物的生长发育。然而,土壤温度过高也会增加水分蒸发损失。但值得注意的是,在本研究中,高羊粪蓄积在增加土壤温度的同时亦提高了土壤含水量,这可能是因为高羊粪量蓄积在地表形成一层致密的遮挡物,能够有效降低太阳辐射,并大幅抵消因羊粪蓄积引起的温度增加导致的水分蒸发损失。另一方面,羊粪蓄积地表也能增加对降水的拦蓄作用,以促进水分入渗。刘文谨等^[36]在高寒矿区的研究表明,在高施肥量下,土壤含水量最高,本研究的结果与其相似。

表 1 土壤指标主成分分析结果及公因子方差

Table 1 The results of principal component analysis of soil indicators and the variance of common factors

土壤指标 Soil indicators	主成分分析 Principal component analysis		公因子方差 Common factors variance
	PC1	PC2	
土壤 pH Soil pH	-0.468	-0.803	0.864
有机碳 Organic carbon	0.783	0.386	0.761
全氮 Total nitrogen	0.770	0.495	0.839
全磷 Total phosphorus	0.322	0.824	0.782
碱解氮 Soil alkali-hydrolysable nitrogen	0.676	0.602	0.820
速效磷 Available phosphorus	0.469	0.769	0.811
纤维素酶 Cellulase	0.653	0.614	0.804
β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶 β -1,4-N-acetylglucosaminidase	0.571	0.721	0.846
亮氨酸氨基肽酶 Leucine aminopeptidase	0.839	0.486	0.939
β -1,4-葡萄糖苷酶 β -1,4-glucosidase	0.438	0.846	0.908
脲酶 Urease	0.256	0.935	0.941
β -1,4-木糖苷酶 β -1,4-xylosidase	0.896	0.188	0.839
平均重量直径 Mean weight diameter	0.842	0.476	0.936
几何平均直径 Geometric mean diameter	0.858	0.453	0.942
特征值 Eigenvalue	10.900	1.132	
解释度 Explain of the degree (%)	77.856	8.087	
累计解释度 Cumulative explanatory degree (%)	72.671	85.943	
权重 Weighing value	0.529	0.471	

酶活性对土壤水分和温度的变化比较敏感,是土壤质量的重要评价指标之一^[37]。本研究测定分析了参与碳循环的酶如 β -1,4-葡萄糖苷酶、纤维素酶和 β -1,4-木糖苷酶,以及参与土壤氮循环的酶如脲酶,亮氨酸氨基肽酶和 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶^[24]。以上这些酶直接参与土壤碳氮的转化过程,并催化植物产生自身可利用的末端单体^[38],是评价土壤养分循环,土壤质量改善的有效指标。在本研究中,随着地表羊粪蓄积量的增加,土壤中与碳、氮循环相关的酶活性逐渐增强,这是因为羊粪中含有大量有机物质,能显著提高分解酶的活性^[39],并为土壤微生物提供大量的底物,刺激微生物分泌酶。此外,土壤温度升高也会影响酶的活性,如本研究中土壤温度与酶活性显著正相关,说明土壤温度的升高有利于酶活性的增加。然而,土壤水分对酶活性的影响比较有限,可能与本试验的年限较短以及羊粪本身的特性有关。

3.2 短期羊粪归还对土壤理化性质的影响

土壤养分是评价土壤健康状况的关键要素,直接影响土壤肥力和生态系统功能^[40]。本研究表明,土壤 SOC、TN、TP、AN 和 AP 含量随着羊粪蓄积量增加呈上升趋势。这说明羊粪归还土壤后,能够迅速补充土壤中的碳、氮养分含量。如魏夏新等^[41]和陈源泉等^[42]的研究发现,增施猪粪等有机肥能显著提高土壤全氮和碱解氮含量;陈

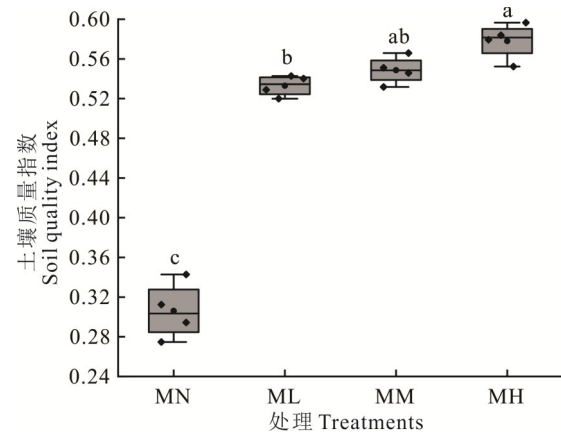


图 6 不同羊粪蓄积量下的土壤质量指数

Fig. 6 Soil quality index under different sheep manure accumulation

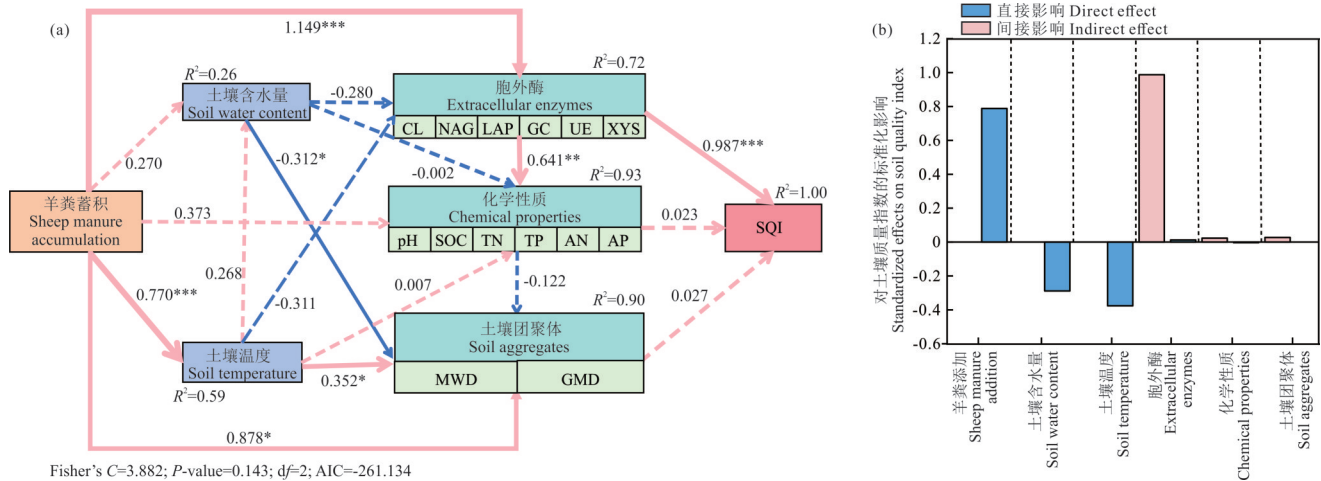


图7 羊粪归还对土壤质量指数影响的结构方程模型

Fig. 7 Structural equation model of the impact of sheep manure return on soil quality index

实线粉色和蓝色分别代表正相关和负相关,虚线代表相关性不显著($P>0.05$),箭头的粗细与标准化路径系数的路径强度成正比。粉色和蓝色柱子分别代表结构方程模型中每个变量的直接效应和间接效应。SQI:土壤质量指数;Fisher's C:费希尔C统计量;P-value:概率值;df:自由度;AIC:赤池信息准则。Solid pink and blue lines represent positive and negative correlations, respectively, while dashed lines indicate non-significant correlations ($P>0.05$), the thickness of the arrows is proportional to the strength of the standardized path coefficients. The pink and blue bars represent the direct and indirect effects of each variable in the structural equation model (SEM), respectively. SQI: Soil quality index; Fisher's C: Fisher's C-statistic; P-value: Probability-value; df: Degrees of freedom; AIC: Akaike information criterion.

广娇^[43]研究表明,动物的粪便能增加土壤中碳组分的含量,此外,土壤中的磷素水平也随之升高^[44]。此过程中,酶活性的增强有利于增加对羊粪的分解作用,从而增加土壤养分含量。例如本研究中测定的参与土壤碳氮循环的酶活性与土壤养分含量呈显著正相关关系,而与pH值显著负相关,说明对于偏碱性的荒漠草地而言,羊粪归还于土壤后,其中的微生物能够通过分解代谢活动向土壤释放大量的有机酸类物质以降低土壤的pH值^[35]。并且较低的土壤pH也有利于微生物活性的增强,从而加速SOC等土壤养分的循环^[45]。

此外,羊粪分解过程向土壤输入的SOC等物质与团聚体的形成和稳定密切相关^[46]。在本研究中,羊粪蓄积量的增多显著提高了土壤大团聚体的数量(>5 mm),而降低了微团聚体(<0.25 mm)的数量。尤其是高羊粪蓄积量 $16000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 在改善土壤团聚体方面的效果较好,一方面是由于土壤温度升高,酶活性及微生物代谢活动也随之增强,使得短期羊粪归还于土壤能够吸引更多的分解者聚集,并为大团聚体的形成提供胶结物质^[47-48];另一方面,本研究表明,土壤团聚体稳定性指标(MWD、GMD)随着羊粪蓄积量的增加呈上升趋势,且土壤有机碳与大团聚体显著正相关,而与微团聚体呈显著负相关关系,说明SOC等物质通过与土壤矿质颗粒相结合,形成有机或无机复合体,从而增强土壤颗粒的团聚作用,利于团聚体的形成和稳定^[46]。大团聚体的形成能够提高土壤透气性且加强了对有机碳的物理保护,从而有利于土壤碳的固存。总而言之,地表羊粪蓄积能够增加微生物的代谢活性,促进羊粪的分解及向土壤的养分释放,并且改善团聚体等土壤物理性质,有利于促进退化草地的恢复。

3.3 短期羊粪归还对土壤质量的综合影响

前人研究表明,将土壤物理性质、化学性质和酶活性纳入土壤质量指数的构建能够较为全面地表征土壤质量状况^[32]。在主成分分析中,脲酶、 β -1,4-木糖苷酶活性作为SQI强解释力的因子,说明羊粪归还后脲酶对土壤环境的变化极为敏感,其活性的提升能够有效加速氮素从低效形态向高效形态的转化进程,从而显著增加植物可吸收利用氮素的比例,在土壤氮循环与植物营养供给过程中发挥着至关重要的作用^[49]。而对于 β -1,4-木糖苷酶来说,其活性的提升促进了土壤碳素循环,进一步证明了荒漠草地的土壤条件得到了有效改善^[24]。本研究发现,低中高羊粪蓄积量均能够显著增强土壤质量。正如结构方程模型显示,羊粪添加一方面可以通过土壤胞外酶直接正向调控土壤质量,另一方面也可以通过影响土壤温度和土壤团聚体稳定性一定程度上间接调控土壤质量。因此,羊粪归还还是土壤质量改善的重要措施。尤其对于退化草地的修复而言,较高的羊粪蓄积量能够较好地改善土

壤养分匮乏的现状。因此,通过合理的放牧管理措施可以增加牲畜粪便在草地的沉积,且有效补充因动物采食而减少的土壤养分归还。

4 结论

本研究结果表明,短期羊粪归还能够改善土壤温度和水分条件,增加 0~10 cm 土层土壤胞外酶活性、养分含量、大团聚体的数量、团聚体稳定性以及降低土壤 pH 值,并最终改善土壤质量。低、中、高羊粪蓄积量(4000,8000 和 16000 kg·hm⁻²)在土壤质量改善方面潜力巨大,可以通过有效改善土壤化学性质和土壤胞外酶活性,促进土壤质量的改善。因此,对于养分匮乏的荒漠草地,应通过合理的放牧管理措施以增加牲畜粪便的输入,同时亦可通过人工添加有机肥的方式来改善土壤质量,以促进退化草地的恢复及提高草地的生产力。本研究只是针对短期羊粪归还探讨了其对表层土壤质量的影响,未来还应继续关注长期家畜粪便归还对深层土壤质量的改善作用,以期荒漠草地的可持续管理提供理论依据。

参考文献 References:

- [1] Kang L, Han X G, Zhang Z B, *et al.* Grassland ecosystems in China: review of current knowledge and research advancement. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 2007, 362(1482): 997—1008.
- [2] Liu G X, Zhang Y J, Hovstad K A, *et al.* Competition of *Leymus chinensis* and *Bromus inermis* in response to gap size and neighbouring root exclusion. *Grass & Forage Science*, 2014, 69(3): 479—487.
- [3] Gang C C, Zhou W, Chen Y Z, *et al.* Quantitative assessment of the contributions of climate change and human activities on global grassland degradation. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(11): 4273—4282.
- [4] Schuman G E, Janzen H H, Herrick J E. Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): 391—396.
- [5] Du Z Y, Cai Y J, Wang X D, *et al.* Research progress on grazing livestock dung decomposition and its influence on the dynamics of grassland soil nutrients. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(13): 4627—4637.
杜子银, 蔡延江, 王小丹, 等. 放牧牲畜粪便降解及其对草地土壤养分动态的影响研究进展. *生态学报*, 2019, 39(13): 4627—4637.
- [6] Cai Y J, Akiyama H. Effects of inhibitors and biochar on nitrous oxide emissions, nitrate leaching, and plant nitrogen uptake from urine patches of grazing animals on grasslands: a meta-analysis. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2017, 63(4): 405—414.
- [7] Frost C J, Hunter M D. Insect canopy herbivory and frass deposition affect soil nutrient dynamics and export in oak mesocosms. *Ecology*, 2004, 85(12): 3335—3347.
- [8] Veldhuis M P, Gommers M I, Olf H. Spatial redistribution of nutrients by large herbivores and dung beetles in a savanna ecosystem. *Journal of Ecology*, 2017, 106(1): 422—433.
- [9] An H, Li G Q. Effects of grazing on plant biomass and soil nutrient in desert steppe. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(3): 705—712.
安慧, 李国旗. 放牧对荒漠草原植物生物量及土壤养分的影响. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(3): 705—712.
- [10] Zhang R, Li J P, Peng W D, *et al.* Effects of mulching with caragana (*Caragana intermedia*) branches on soil moisture content and temperature and reseeded forage biomass in desertified grassland in Ningxia Province, China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(4): 58—67.
张茹, 李建平, 彭文栋, 等. 柠条枝条覆盖对宁夏荒漠草原土壤水热及补播牧草生物量的影响. *草业学报*, 2021, 30(4): 58—67.
- [11] Nan W L, Xie Y Z, Peng W D, *et al.* Restoration effects of reseeded and enclosure on vegetation of different degraded desert steppes. *Pratacultural Science*, 2024, 41(5): 1068—1077.
南万璐, 谢应忠, 彭文栋, 等. 补播与围封对不同退化程度荒漠草地植被的恢复效果. *草业科学*, 2024, 41(5): 1068—1077.
- [12] Su J Q, Li X R, Yang H T, *et al.* Effects of fertilization on population density and biomass of herbaceous plants in desert steppe. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(3): 696—702.
苏洁琼, 李新荣, 杨昊天, 等. 施肥对荒漠化草原草本植物种群密度和生物量的影响. *中国沙漠*, 2013, 33(3): 696—702.
- [13] Min X X, Ma Y S, Li S X, *et al.* Effects of sheep manure on productivity and nutrition of soil for *Poa pratensis* cv. Qinghai

pasture. *Pratacultural Science*, 2014, 31(6): 1039–1044.

闵星星, 马玉寿, 李世雄, 等. 羊粪对青海草地早熟禾草地生产力和土壤养分的影响. *草业科学*, 2014, 31(6): 1039–1044.

- [14] Zhang Y G, Yang S, Fu M M, *et al.* Sheep manure application increases soil exchangeable base cations in a semi-arid steppe of Inner Mongolia. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(3): 361–369.
- [15] Kooch Y, Ghorbanzadeh N, Haghverdi K, *et al.* Soil quality cannot be improved after thirty years of land use change from forest to rangeland. *Science of the Total Environment*, 2022, 856: 159132.
- [16] Ma J, Zhou Y, Lu Q, *et al.* Soil properties and quality evaluation of desert steppe under different management measures in arid windy and sandy areas. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(24): 106–116.
马菁, 周瑶, 陆琪, 等. 不同管理方式下干旱风沙区荒漠草原土壤性状变化及质量评价. *农业工程学报*, 2024, 40(24): 106–116.
- [17] Wan R P, Luo D Y, Liu J Y, *et al.* Superior improvement on soil quality by *Pennisetum sinense* vegetation restoration in the dry-hot valley region, SW China. *The Science of the Total Environment*, 2023, 878: 163185.
- [18] Li Z G, Xie Y Z. Improving desertified soil properties by incorporating and mulching tree branch in Ningxia Province. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(10): 174–181.
李志刚, 谢应忠. 翻埋与覆盖林木枝条改善宁夏沙化土壤性质. *农业工程学报*, 2015, 31(10): 174–181.
- [19] Wang X, Song N P, Yang X G, *et al.* Effects of sheep dung return on surface soil organic carbon and total nitrogen contents in deserted grassland. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(5): 6–10.
王兴, 宋乃平, 杨新国, 等. 羊粪归还对荒漠草原表层土壤碳氮的影响. *水土保持通报*, 2013, 33(5): 6–10.
- [20] Zhao Q L, Sun M, Lin W, *et al.* Effects of sowing modes on soil water dynamics and grain protein formation in dryland wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11): 3977–3987.
赵庆玲, 孙敏, 林文, 等. 播种方式对旱地小麦土壤水分变化和籽粒蛋白质形成的影响. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 3977–3987.
- [21] Liu G S. Soil physical and chemical analysis and description of soil profiles. Beijing: Standard Press of China, 1996.
刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [22] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141–163.
- [23] Bao S D. Soil agrochemistry analysis (the third edition). Beijing: China Agriculture Press, 2000.
鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] Liu J. The effects of *Caragana korshinskii* branches cover on the surficial sheep manure decomposition and associated with the regulation on soil–vegetation in a desert steppe. Yinchuan: Ningxia University, 2023.
刘静. 柠条枝条覆盖对荒漠草地地表羊粪分解的影响及土壤–植被的调控. 银川: 宁夏大学, 2023.
- [25] Ma X K, Xie Y P, Wang J, *et al.* Screening method of cellulase-producing fungi based on chromogenic enzyme reaction. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2023, 40(4): 407–414.
马学坤, 谢燕萍, 王娟, 等. 基于酶反应显色的产纤维素酶真菌筛选方法. *深圳大学学报(理工版)*, 2023, 40(4): 407–414.
- [26] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1309–1315.
- [27] Yao W R, Ding X L. Determination of β -glucosidase in cellulase system by pNPG method. *Microbiology China*, 1998, 25(3): 982–983.
姚卫蓉, 丁霄霖. pNPG法测定纤维素酶系中 β -葡萄糖苷酶. *微生物学通报*, 1998, 25(3): 982–983.
- [28] Huang S Y. The mechanism study of soil leucine aminopeptidase affected by cadmium contamination. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2023.
黄舜禹. 土壤亮氨酸氨基肽酶对镉污染响应机制研究. 成都: 成都理工大学, 2023.
- [29] Guan S Y. Soil enzyme and its research methods. Beijing: Agriculture Press, 1986.
关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [30] Schmitt S, Tsai P, Bell J, *et al.* Assessing the complex sponge microbiota: core, variable and species-specific bacterial communities in marine sponges. *The ISME Journal*, 2012, 6(3): 564–576.
- [31] Lu Q, Ma H B, Zhou Y, *et al.* Restoration of soil quality of degraded grassland can be accelerated by reseeding in an arid area of Northwest China. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1101295.

- [32] Zhou Y, Ma H B, Xie Y Z, *et al.* Assessment of soil quality indexes for different land use types in typical steppe in the loess hilly area, China. *Ecological Indicators*, 2020, 118: 106743.
- [33] Raiesi F. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. *Ecological Indicators*, 2017, 75: 307–320.
- [34] Nabiollahi K, Taghizadeh-Mehrjardi R, Kerry R, *et al.* Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran. *Ecological Indicators*, 2017, 83: 482–494.
- [35] Wang M M, Ren C H, Huang Y F, *et al.* Research progress on the effects of sheep manure on soil properties and plant growth. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2024, 45(1): 1–8.
王明明, 任春环, 黄枢锋, 等. 羊粪对土壤性状及植物生长影响的研究进展. *家畜生态学报*, 2024, 45(1): 1–8.
- [36] Liu W J, Jiang F Z, Qi K B, *et al.* Effects of different fertilization and sowing amounts on vegetation restoration and soil quality in alpine mining areas and comprehensive evaluation. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(5): 27–39.
刘文谨, 蒋福祯, 祁凯斌, 等. 不同施肥量和播种量对高寒矿区植被恢复和土壤质量的影响及综合评价. *草业学报*, 2025, 34(5): 27–39.
- [37] Yang Y P, Yin J, Zhu Y H, *et al.* Effects of water and nitrogen regulation on potato yield and soil quality in the arid region of central Ningxia. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(9): 358–370, 458.
杨莹攀, 尹娟, 朱银浩, 等. 水氮调控对宁夏中部旱区马铃薯产量与土壤质量的影响. *农业机械学报*, 2024, 55(9): 358–370, 458.
- [38] Shukla G, Varma A. *Soil enzymology*. Germany: Springer Berlin Heidelberg Press, 2011.
- [39] An X T, Yu Z Y, Hu S B, *et al.* Effects of different fertilization combinations on soil physicochemical properties and enzyme activities in alpine mining area. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(3): 984–991.
安晓婷, 于中阳, 胡生斌, 等. 不同施肥组合对高寒矿区土壤理化性质及酶活性的影响. *草地学报*, 2025, 33(3): 984–991.
- [40] Mo S W, Yu W, Liang L X, *et al.* Organic fertilizer types and application methods on tea yield, quality and soil health. *Journal of Guizhou Tea*, 2024(5): 5–8.
莫尚威, 余威, 梁林霞, 等. 有机肥料种类和施用方式对茶叶产量与品质及土壤健康的影响. *贵茶*, 2024(5): 5–8.
- [41] Wei X X, Xiong J F, Li T, *et al.* Effects of different organic amendments on soil organic carbon and its labile fractions in the paddy soil of a double rice cropping system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(7): 2373–2380.
魏夏新, 熊俊芬, 李涛, 等. 有机物料还田对双季稻田土壤有机碳及其活性组分的影响. *应用生态学报*, 2020, 31(7): 2373–2380.
- [42] Chen Y Q, Sui P, Yan L L, *et al.* Effects of different organic wastes incorporation on soil organic carbon and its fraction under wheat-maize cropping system in North China plain. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(S2): 94–102.
陈源泉, 隋鹏, 严玲玲, 等. 有机物料还田对华北小麦玉米两熟农田土壤有机碳及其组分的影响. *农业工程学报*, 2016, 32(S2): 94–102.
- [43] Chen G J. Effects of wild animal feces on soil organic carbon decomposition, formation and stabilization. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2024.
陈广娇. 野生动物粪便对土壤有机碳分解、形成和稳定的影响. 南昌: 江西农业大学, 2024.
- [44] Cui H. Transformation and regulation of phosphorus fractions during livestock manure composting. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022.
崔虎. 畜禽粪便堆肥过程中磷形态的转化与调控. 北京: 中国科学院大学, 2022.
- [45] Malik A A, Jeremy P, Buckeridge K M, *et al.* Land use driven change in soil pH affects microbial carbon cycling processes. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1–10.
- [46] Angst G, Mueller K E, Kögel-Knabner I, *et al.* Aggregation controls the stability of lignin and lipids in clay-sized particulate and mineral associated organic matter. *Biogeochemistry*, 2017, 132(3): 307–324.
- [47] Zhu Y H, Merbold L, Leitner S, *et al.* The effects of climate on decomposition of cattle, sheep and goat manure in Kenyan tropical pastures. *Plant and Soil*, 2020, 451(1/2): 325–343.
- [48] Rabbi S M F, Warren C R, Swarbrick B, *et al.* Microbial decomposition of organic matter and wetting-drying promotes aggregation in artificial soil but porosity increases only in wet-dry condition. *Geoderma*, 2024, 447: 116924.
- [49] Jia P J, Liu Y M, Liu Y M, *et al.* Effects of understory vegetation on the growth and soil quality of young *Phoebe zhennan* forest. *Journal of Forest and Environment*, 2025, 45(1): 53–61.
贾朋聚, 刘亚敏, 刘玉民, 等. 林下植被对桢楠幼林生长和土壤质量的影响. *森林与环境学报*, 2025, 45(1): 53–61.