

封育与放牧对黄土高原天然草地土壤化学计量特征的影响

张昊¹, 李建平^{1,2}, 王誉陶¹, 张翼¹, 张娟¹, 罗叙¹, 张茹¹

(1.宁夏大学农学院,银川 750021;2.西北退化生态系统恢复与重建国家重点实验室培育基地,银川 750021)

摘要:为揭示封育与放牧 2 种草地利用方式下土壤化学计量特征及其驱动因素,以宁夏固原云雾山封育草地和放牧草地为研究对象,定量分析了 0—30 cm 土壤化学计量特征及其影响因子。结果表明:(1)封育降低了土壤紧实度、容重和含水率,土壤孔隙度略有上升。(2)封育草地 0—10 cm 土层以 >0.25 mm 水稳性团聚体为主,其中 >5 mm 团聚体达到了 46%,平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GWD)分别为 3.78, 1.70,显著高于放牧草地($P<0.05$),但两者分形维数并无差异,封育草地土壤团聚体稳定性有所提高。(3)封育草地 0—10 cm 土层土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)分别为 17.714, 2.018, 0.659 g/kg,均高于放牧草地,其中土壤 TN 含量达到显著水平($P<0.05$)。 (4)封育草地 0—20 cm 土层碳氮比(C/N)、碳磷比(C/P)、氮磷比(N/P)均高于放牧草地。(5)封育草地土壤 SOC、TN、C/P 和 N/P 与土壤容重和分形维数呈显著性负相关($P<0.05$),并且 SOC 和 TN 与 MWD 和 GWD 呈显著性正相关($P<0.05$),放牧草地土壤化学计量特征与物理特性相关性低于封育草地。封育与放牧相比,改善了土壤物理特性和团聚体结构,土壤养分有所提升,土壤化学计量特征与土壤物理特性密切相关,土壤物理结构可能是影响土壤化学计量特征的主控因子。

关键词:封育;放牧;土壤物理特性;水稳性团聚体;分形维数;土壤化学计量

中图分类号:S182.2;S153

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)05-0251-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.05.035

Effect of Enclosure and Grazing on the Soil Stoichiometry Characteristics of Natural Grassland on the Loess Plateau

ZHANG Hao¹, LI Jianping^{1,2}, WANG Yutao¹, ZHANG Yi¹, ZHANG Juan¹, LUO Xu¹, ZHANG Ru¹

(1.School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021; 2.Breeding Base of

State Key Laboratory for Preventing Land Degradation and Ecological Restoration, Ningxia University, Yinchuan 750021)

Abstract: In order to reveal the soil stoichiometric characteristics and their driving factors under the two grassland utilization modes of enclosure and grazing, the enclosed and grazing grassland of the Ningxia Yunwushan in Guyuan were used as the research object, the soil stoichiometric characteristics of 0—30 cm layer and the influencing factors were quantitatively analyzed. The results showed that: (1) Enclosure decreased the soil penetration resistance, bulk density and moisture content, while increased the soil porosity. (2) In the 0—10 cm soil layer of the enclosed grassland, the main water stable aggregates were >0.25 mm, and of which >5 mm water-stable aggregates accounted for 46%, the mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GWD) was 3.78 and 1.70, respectively, which were significantly higher than those of grazing grassland ($P<0.05$), but there was not significant in fractal dimension between enclosed and grazing grassland. The soil stability of enclosed grassland was improved. (3) The content of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) of the 0—10 cm soil layer in enclosed grassland was 17.714, 2.018 and 0.659 g/kg, respectively, which were all higher than those of grazing grassland, and the difference in TN was significant ($P<0.05$). (4) The soil carbon and nitrogen ratio (C/N), carbon and phosphorus ratio (C/P), and nitrogen and phosphorus ratio (N/P) of the 0—20 cm soil layer were all higher in enclosed grassland than those in grazing grassland. (5) SOC, TN, C/P and N/P were all significantly negative related

收稿日期:2020-03-24

资助项目:宁夏重点研发计划项目(2020BEG03046);宁夏自然科学基金项目(2019AAC03042);宁夏大学草学一流学科建设项目(NXYLXK2017A01)

第一作者:张昊(1997—),男,在读硕士研究生,主要从事草地生态与模型构建研究。E-mail:zhanghllqq@163.com

通信作者:李建平(1982—),男,副教授,主要从事草地生态与模型构建研究。E-mail:lijianpingsas@163.com

to the soil bulk density and fractal dimension ($P < 0.05$), and SOC and TN were significantly positive related to MWD and GWD in enclosed grassland ($P < 0.05$). The correlation between soil stoichiometry and physical characteristics of grazing grassland was lower than that of enclosed grassland. Enclosure ameliorated soil physical properties and aggregate structure, improved soil nutrients. Soil stoichiometry was closely related to soil physical properties, and the soil physical structure might be the main control factor affecting soil stoichiometric characteristics.

Keywords: enclosure; grazing; soil physical properties; water-stable aggregate; fractal dimension; soil stoichiometry

黄土高原地处半干旱半湿润气候带,是我国的生态脆弱区和水土保持重点区域^[1]。为改善黄土高原地区逐渐恶化的生态环境,促进植被恢复,我国开展了大规模的退耕还林草工程,这一工程的实施使得黄土高原植被盖度从 1999 年的 31.6% 提高到 2013 年的 59.6%^[2]。围栏封育被认为是黄土高原半干旱区草地生态系统植被恢复的有效途径,并作为一种高效的草地恢复管理策略被广泛应用。围栏封育不仅有利于植被恢复,改善土壤养分状况,减少土壤侵蚀,同时更多的凋落物和根系运输可以增加土壤养分输入,有助于提高土壤养分的有效性^[3]。

土壤养分是影响生态系统结构和功能的关键性因素,其碳(C)、氮(N)、磷(P)元素是生物体体内元素的主要来源,同时也是草地生态系统生产力的关键限制元素,直接决定了植物群落的结构和生态系统的稳定性^[4],其含量和生态化学计量特征动态可以反映植被恢复过程中生态系统的结构和功能的转变以及生态系统在环境变化时的自我调节能力。土壤 C、N、P 化学计量比是确定土壤 C、N、P 养分平衡特征的重要参数,可以作为 C、N、P 矿化作用和固持作用的评价指标,在生态系统 C、N、P 循环中也起到指向作用^[5-6]。一般来讲,土壤 C/N 化学计量特征与有机质分解速率成反比关系^[7]。土壤 N/P 化学计量特征能够影响生物固氮量、生物生产力及物种多样性和植被动态,土壤 N/P 比值较低反映植物受到 N 限制,指示着较高的初级生产力^[8]。此外,C/P 和 N/P 在植被演替过程中也有一定的指示作用^[9]。

围栏封育使草地植被得到恢复,地面植物数量和物种多样性的增加会导致土壤物理性质和养分循环发生变化。基于此,本研究选取黄土高原宁夏云雾山天然草地,以围栏封育 8 年草地和与其毗邻的连续放牧草地为研究对象,比较封育草地与放牧草地间土壤基本性质的区别,分析两者养分含量特征之间的差异,并结合土壤 C、N、P 化学计量与土壤其他理化性质的相关性,试图揭示围栏封育后草地土壤 C、N、P 化学计量特征的变化及其对其他理化因子的响应关系,以期为黄土高原半干旱区天然草地合理利用和退

化草地恢复提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验地位于黄土高原腹地的宁夏固原云雾山(106°21′—106°27′E, 36°10′—36°17′N),地处黄土高原西南部,海拔 1 700~2 148 m,地质以石灰岩为主,草原总面积约为 6 600 hm²。该地区属于中温带半干旱气候区,大陆性与季风性都很明显,年平均气温 5 °C,年均降水量为 425 mm(1980—2018 年平均值),且多集中在夏季,每年 7—9 月降水量占全年的 65%~85%,年蒸发量 1 300~1 640 mm,年日照时间可达 2 500 h,太阳辐射总量 125 Kcal/cm²,≥0 °C 积温 2 370~2 882 °C。土壤为山地灰褐土和黑垆土,植被类型为典型草原,长芒草(*Stipa bungeana*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、冰草(*Agropyron micchnoi*)、大针茅(*Stipa grandis*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)等是主要的优势植物^[10]。

1.2 试验设计与方法

1.2.1 试验设计 本研究以黄土高原宁夏固原云雾山封育 8 年草地(106°22′52.5″E, 36°15′08.1″N,海拔 2 069 m,半阳坡,坡度 7°~10°)和放牧草地(106°22′40.3″E, 36°14′49.3″N,海拔 2 075 m,半阳坡,坡度 3°~9°)为研究对象,样地间隔距离在 500 m 内。封育样地位于云雾山国家自然保护区外围,于 2011 年开始围栏封育,样地封育前与放牧草地在植被组成、群落特征及地形地貌上基本相似。

1.2.2 样品采集与处理 土壤样品于 2019 年 10 月采集,每块样地间隔 20 m 随机设置 1 m×1 m 的样方 3 个,清除地上生物部分以及凋落物(不扰动表层土壤),采用土块挖掘法挖取长 80 cm,宽 60 cm,深 40 cm 的土壤剖面,采集 0—10,10—20,20—30 cm 土层深度的原状土 1 kg 左右,置于封闭的保鲜盒中带回室内于通风阴凉处自然风干后分两部分,一部分用于土壤团聚体含量的测定,另一部分用于测定土壤有机碳、全氮和全磷。利用环刀采集各层次的土壤样品,带回室内测定土壤容重、孔隙度、含水率等物理性状。

1.3 样品分析方法

土壤紧实度采用 SC900 土壤紧实度仪 (SC900 Soil Compaction Meter, Spectrum Technologies Inc., U.S.A.) 测定,测定土壤层次:0—30 cm,每层 2.5 cm,每个样方测定 3 次,取平均值。

土壤物理性质和土壤养分于 2019 年 11—12 月在实验室进行测量。土壤容重、孔隙度和含水率的测定采用环刀法(环刀容积为 100 cm³),具体操作步骤^[11]为:

首先称取空环刀的重量,然后分层取样,把装有原状土样品的环刀放入水中,使其充分吸水 12 h,称重至恒重,然后放入沙土中 2 h,称重,最后放入烘箱中至环刀平衡,计算公式为:

$$\text{土壤容重}(\text{g}/\text{cm}^3) = \frac{m_5 - m_1}{V} \quad (1)$$

$$\text{总孔隙度}(\%) = \frac{m_3 - m_5}{V} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{毛细孔隙度}(\%) = \frac{m_4 - m_5}{V} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{非毛细孔隙度}(\%) = \text{总孔隙度}(\%) - \text{毛细孔隙度}(\%) \quad (4)$$

$$\text{土壤含水率}(\%) = \frac{m_2 - m_5}{m_5 - m_1} \times 100\% \quad (5)$$

式中:V 为环刀体积(cm³);m₁为空环刀质量(g);m₂为环刀取土后总质量(g);m₃为环刀内土壤吸水 12 h 后质量(g);m₄为环刀放入沙土 2 h 后质量(g);m₅为烘干后环刀和干土总重量(g)。

土壤水稳性团聚体含量的测定首先要将 500 g 风干土进行干筛,根据干筛得到的团粒质量比例配成 50 g 土壤,采用萨维诺夫湿筛法测定出 >5, 2~5, 1~2, 0.5~1, 0.25~0.5, <0.25 mm 各粒级水稳性团聚体含量^[12]。

土壤 SOC 采用重铬酸钾容量法—外加热法测定,土壤 TN 采用半微量开氏蒸馏法测定,土壤 TP 采用高氯酸—浓硫酸法^[11]测定,土壤酸碱度采用 pH 计测定。

1.4 数据处理与分析

采用土壤团聚体分形维数(fractal dimension, D)、平均重量直径(mean weight diameter, MWD)和几何平均直径(geometric mean diameter, GMD)来衡量团聚体的稳定性。各指标的计算方法^[12]为:

$$\frac{M(\delta < \bar{d}_i)}{M_0} = \left(\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}}\right)^{3-D} \quad (6)$$

对上边公式两边取对数:

$$\lg\left(\frac{M(\delta < \bar{d}_i)}{M_0}\right) = (3-D)\lg\left(\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}}\right) \quad (7)$$

分别以 $\lg\left(\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}}\right)$ 、 $\lg\left(\frac{M(\delta < \bar{d}_i)}{M_0}\right)$ 为横、纵坐标作

图,3-D 即为 $\lg\left(\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}}\right)$ 和 $\lg\left(\frac{M(\delta < \bar{d}_i)}{M_0}\right)$ 试验直线的斜率,即可求得土壤 D 值。

式中: \bar{d}_i 为两筛分粒级第 d_i 和 d_{i+1} 的平均值($d_i > d_{i+1}, i=1, 2, 3, \dots, i$),即为 $\bar{d}_i = \frac{d_i + d_{i+1}}{2}$, d_{\max} 为团聚体最大直径(mm); $M(\delta < \bar{d}_i)$ 表示粒径小于 \bar{d}_i 团聚体的质量(g); M_0 为团聚体质量(g)。

$$\text{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i \omega_i)}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (8)$$

$$\text{GMD} = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i \ln \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}\right) \quad (9)$$

式中: x_i 为各粒级平均直径(mm); ω_i 为各粒级土壤质量比例(%)。

数据用 Excel 2010 和 SPSS 23.0 软件进行方差分析和多重比较,显著性水平设定为($P < 0.05$),Pearson 法进行相关分析,利用 Origin 2017 软件作图。

2 结果与分析

2.1 土壤物理性质变化

2.1.1 土壤紧实度变化 由图 1 可知,封育草地 0—5 cm 土壤紧实度高于放牧草地,5—30 cm 土壤紧实度均为封育草地小于放牧草地,两者在 10—20 cm 土层土壤平均紧实度相差最大,封育草地比放牧草地低出 228 kPa。封育和放牧草地土壤紧实度均随着土层的加深呈现出上升趋势,0—30 cm 土层内,封育草地和放牧草地土壤紧实度分别在深度 27.5, 30.0 cm 处达到最大值,分别为 1 248, 1 610 kPa,两者紧实度在土层深度 30.0 cm 处相差最大,封育草地比放牧草地低出 407 kPa。

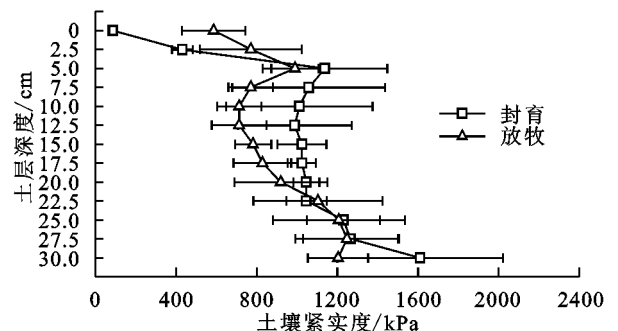


图 1 封育与放牧草地土壤紧实度

2.1.2 土壤容重和孔隙度的变化 在 0—10, 20—30 cm 土层,土壤容重均为封育草地低于放牧草地,而在 10—20 cm 土层,封育草地土壤容重高于放牧草地,但两者土壤容重在土层间差异并不显著($P > 0.05$)。无论是封育草地还是放牧草地,土壤容重均随着土层的加深而增加,两者在 0—10, 10—20, 20—30 cm 土层土壤容重平均值分别为 1.043, 1.095, 1.149 g/cm³和 1.076, 1.079, 1.178 g/cm³,其中封育

草地 20—30 cm 土层土壤容重显著高于 0—10 cm 土层 ($P < 0.05$), 放牧草地 20—30 cm 土层土壤容重显著高于 0—10, 10—20 cm 土层 ($P < 0.05$), 其他土层土壤容重之间差异并不显著 (图 2)。

由图 3 可知, 封育和放牧草地土壤总孔隙度的范围分别为 58.55%~50.93% 和 57.99%~48.29%。20—30 cm 土层土壤总孔隙度和毛管孔隙度均为封育草地显著高于放牧草地 ($P < 0.05$), 其他土层间的差异并不显著。封育草地 0—10 cm 土层土壤总孔隙度和毛管孔隙度最低, 而非毛管孔隙度最高。放牧草地 0—10, 10—20 cm 土层土壤总孔隙度和毛管孔隙度显著高于 20—30 cm ($P < 0.05$)。

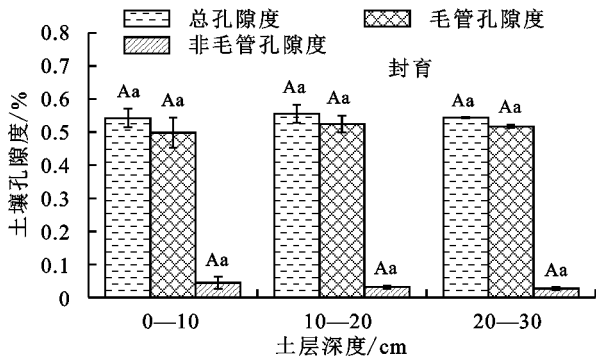


图 3 封育与放牧草地土壤孔隙度

2.1.3 土壤含水率的变化 在 0—10, 20—30 cm 土层, 土壤含水率均为封育草地低于放牧草地, 而在 10—20 cm 土层, 封育草地土壤含水率高于放牧草地, 但两者各土层间土壤含水率差异并不显著 ($P > 0.05$)。无论是封育还是放牧, 草地土壤含水率均随着土层的加深而减小, 两者在 0—10, 10—20, 20—30 cm 土层土壤含水率平均值分别为 21.0%, 20.5%, 19.6% 和 21.5%, 20.0%, 20.0%, 其中封育草地 0—10 cm 土层土壤含水率显著高于 20—30 cm 土层 ($P < 0.05$), 放牧草地 0—10 cm 土层土壤含水率显著高于 10—20, 20—30 cm 土层 ($P < 0.05$), 其他土层土壤含水率之间差异并不显著 (图 4)。

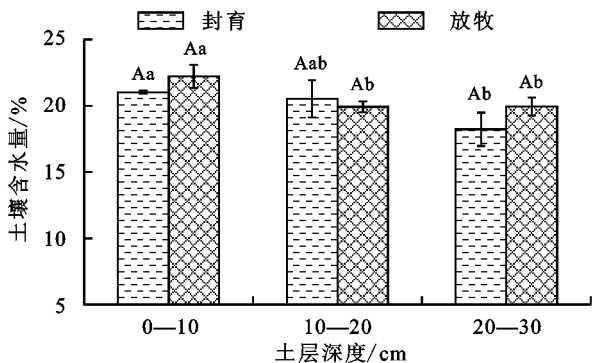
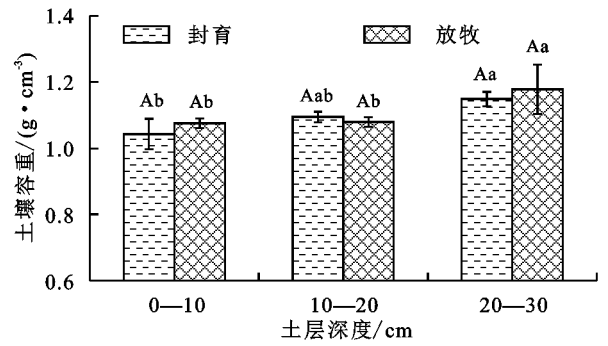


图 4 封育与放牧草地土壤含水率

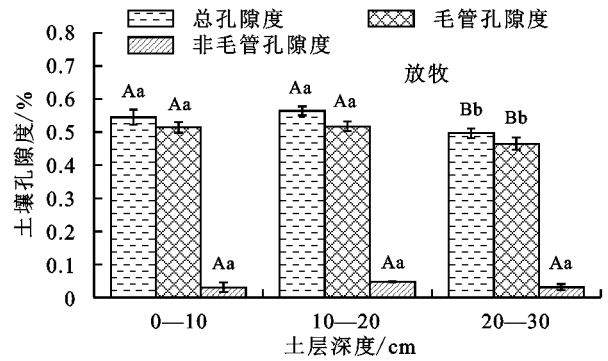
2.2 土壤水稳定性团聚体分布特征及评价参数

封育和放牧草地各土层土壤水稳性团聚体主要以粒径 < 0.25 , > 5 mm 团聚体为主, 封育草地各土层



注: 图中不同小写字母表示同一处理不同土层间差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

图 2 封育与放牧草地土壤容重



< 0.25 mm 团聚体含量均高于放牧草地。封育和放牧草地 0—10 cm 土层 < 0.25 mm 团聚体占比最低, > 5 mm 团聚体占比最高。随着土层的加深, < 0.25 mm 团聚体占比逐渐增加, > 5 mm 团聚体占比逐渐递减。封育草地和放牧草地 10—20, 20—30 cm 土层 < 0.25 mm 团聚体占比均相差不多, 分别为 59%, 64% 和 51%, 57%, 并且都明显高于 0—10 cm 土层, 分别为 36% 和 34%。封育草地 0—10 cm 土层 > 5 mm 团聚体占比为 46%, 明显高于 10—20, 20—30 cm 土层, 其分别为 20% 和 19%, 放牧草地 > 5 mm 团聚体占比在各土层变化不大 (图 5)。

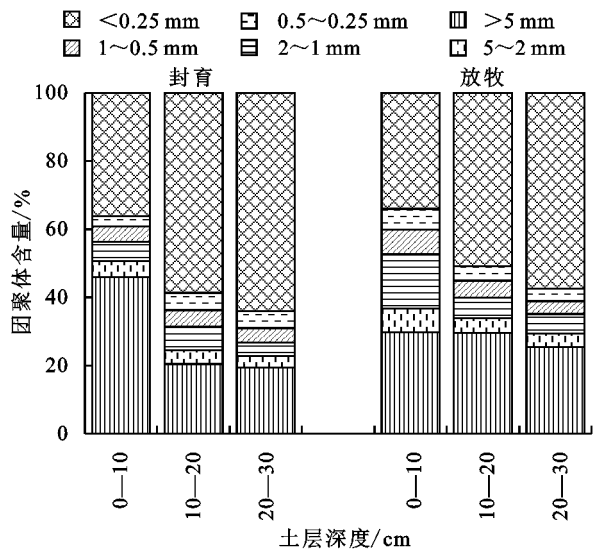


图 5 封育与放牧草地土壤水稳性团聚体分布特征

封育和放牧草地各土层除了放牧草地 0—10 cm 土层外,0.25~0.5,0.5~1,1~2,2~5 mm 团聚体占比均差异不大,在 3%~7% 范围内变动,并且这 4 级粒径团聚体占比之和均在 20% 左右。而在放牧草地 0—10 cm 土层,0.25~0.5,0.5~1,1~2,2~5 mm 团聚体占比均要高于其他土层,尤其是 1~2 mm 团聚体占比达到 16%,明显高于其他土层(图 5)。

封育草地和放牧草地 >0.25 mm 团聚体含量均为 0—10 cm 土层显著高于 10—20,20—30 cm 土层 ($P<0.05$),但封育草地各土层 >0.25 mm 团聚体含量

和放牧草地相比差异不大。封育草地和放牧草地 MWD 和 GWD 有相同的变化趋势,MWD 和 GWD 均为 0—10 cm 土层高于 10—20,20—30 cm,但只有封育草地达到显著水平($P<0.05$)。0—10 cm 土层 MWD 和 GWD 为封育草地显著高于放牧草地($P<0.05$),但其他土层之间两者差异不显著。无论是封育草地还是放牧草地,分形维数均随土壤深度的加深而逐渐增大,并且两者分形维数均为 10—20,20—30 cm 土层显著高于 0—10 cm 土层($P<0.05$)。封育草地各土层团聚体分形维数和放牧草地相比差异不大(表 1)。

表 1 封育和放牧草地土壤水稳性团聚体评价参数

处理	土层深度/cm	>0.25 mm 团聚体/g	MWD	GWD	D
封育	0—10	31.90±0.61Aa	3.78±0.14Aa	1.70±0.02Aa	2.78±0.01Ab
	10—20	20.67±6.66Ab	1.90±0.61Ab	1.43±0.09Ab	2.87±0.05Aa
	20—30	17.95±5.16Ab	2.35±0.26Ab	1.40±0.13Ab	2.90±0.03Aa
放牧	0—10	32.98±3.96Aa	2.83±0.25Ba	1.58±0.05Ba	2.73±0.08Ab
	10—20	24.58±3.76Ab	2.57±0.67Aa	1.52±0.09Aa	2.84±0.03Aa
	20—30	21.28±2.49Ab	2.25±0.36Aa	1.47±0.05Aa	2.89±0.03Aa

注:同列不同小写字母表示相同处理不同土层间差异显著($P<0.05$);同列不同大写字母表示相同土层不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.3 土壤碳氮磷含量变化

由图 6 可知,在 0—10 cm 土层中,土壤 SOC、TN 和 TP 均为封育草地高于放牧草地,其中封育草地土壤 TN 含量显著高于放牧草地($P<0.05$);在 10—20 cm 土层中,封育草地和放牧草地土壤 SOC、TN 和 TP 含量差异不大;在 20—30 cm 土层中,土壤 SOC、TN 和 TP 均为放牧草地高于封育草地。封育草地和放牧草地不同土层深度间土壤的碳、氮、磷含量以及 pH 进行差异性分析,封育草地和放牧草地土壤 SOC 含量变化趋势相反,封育和放牧草地 0—10,10—20,20—30 cm 土壤 SOC 含量平均值分别为 17.714,14.982,14.096 g/kg 和 14.217,14.766,15.496 g/kg。封育草地表现为随着土层深度的加深 SOC 逐渐降低,即表层 0—10 cm 土壤的 SOC 含量最高,并且显著高于 20—30 cm($P<0.05$);而放牧草地表现为随着土层深度的加深逐渐升高,即 20—30 cm 土

壤的 SOC 含量最高,但各土层 SOC 含量无显著差异。

土壤 TN 含量变化随土层深度的变化趋势与 SOC 相似。封育草地和放牧草地 0—10,10—20,20—30 cm 土壤 TN 含量平均值分别为 2.018,1.928,1.809 g/kg 和 1.829,1.886,1.901 g/kg。封育草地表现为随着土层深度的加深逐渐降低,即表层 0—10 cm 土壤 TN 含量最高,并且显著高于 20—30 cm($P<0.05$);而放牧草地 TN 含量表现为随着土层深度的加深逐渐升高,即 20—30 cm 土壤的 TN 含量最高,各土层 TN 含量差异不显著。

封育草地和放牧草地 0—10,10—20,20—30 cm 土壤 TP 含量分别为 0.659,0.638,0.675 g/kg 和 0.648,0.666,0.678 g/kg,表现为随着土层深度的加深逐渐上升的趋势,但各土层间 TP 含量无明显的变化,两者 20—30 cm 土壤 TP 含量最高。

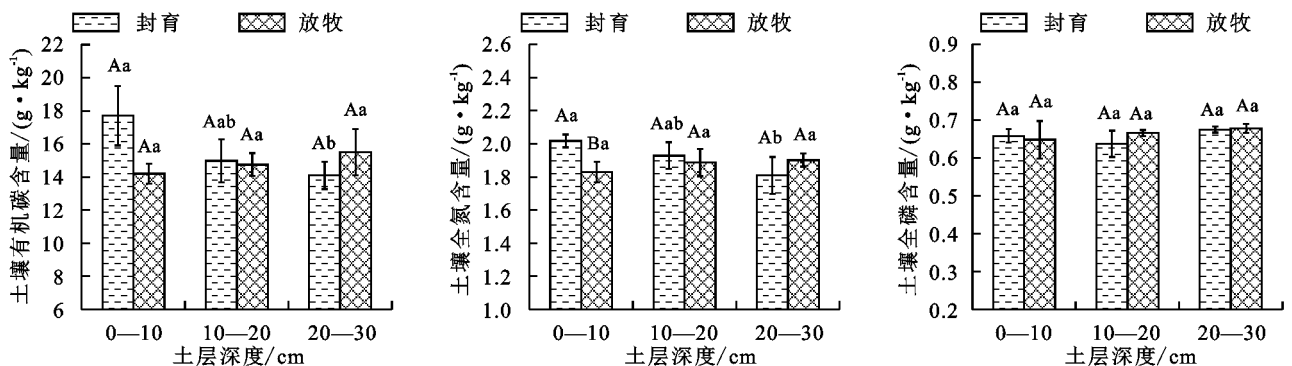


图 6 封育与放牧草地土壤碳氮磷含量

2.4 土壤碳氮磷化学计量比变化

由表 2 可知,封育草地和放牧草地各土层土壤 C/N、C/P、N/P 均无显著性差异,表层 0—20 cm 土壤 C/N、C/P、N/P 均为封育草地高于放牧草地。封

育草地和放牧草地土壤 C/N、C/P 和 N/P 平均值变化范围分别为 8.04~8.15,22.96~24.47,2.86~2.98。0—30 cm 土层土壤 C/N、C/P、N/P 平均值为封育>放牧。

对封育草地和放牧草地不同土层深度的土壤 C/N、C/P、N/P 研究表明,随着封育草地土层深度的加深,C/N、C/P、N/P 值逐渐下降,表层 0—10 cm 土壤的 C/P 显著高于 20—30 cm ($P < 0.05$)。放牧草地土壤 C/N、C/P 在不同土层的变化趋势与封育草地

相反,放牧草地土壤 C/N、C/P 随土层深度的加深逐渐上升,N/P 变化不明显。在 20—30 cm 土层中,封育草地 pH 显著高于放牧草地 ($P < 0.05$)。封育和放牧草地土壤 pH 均随土层深度的加深逐渐升高,但各土层间无显著性差异。

表 2 封育与放牧草地土壤化学计量比和酸碱度

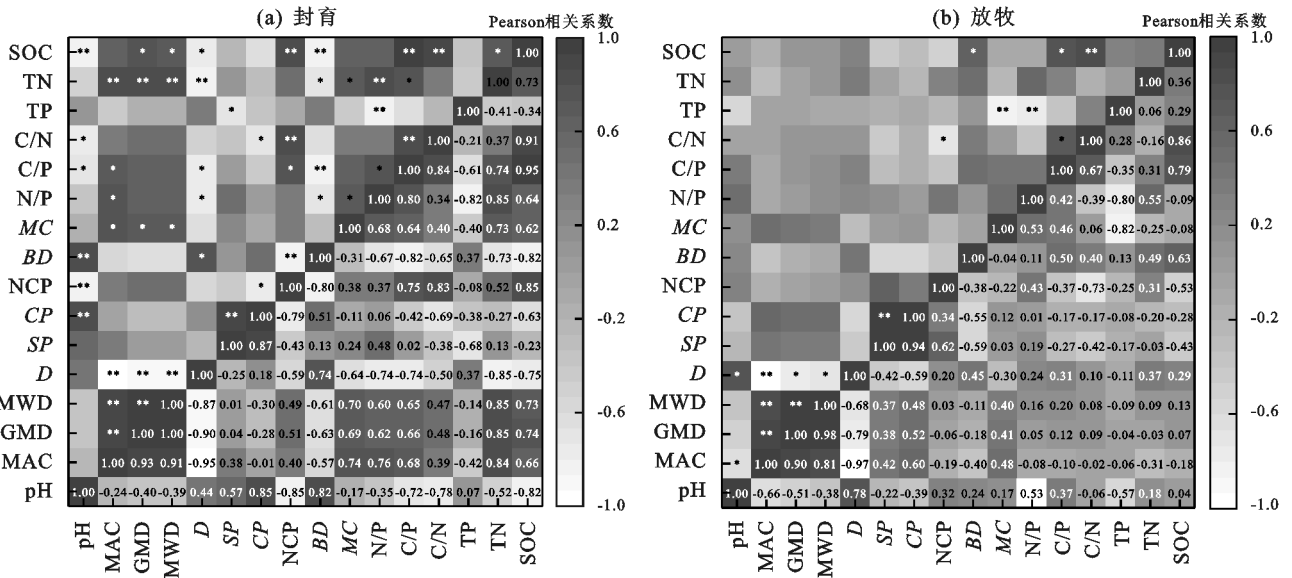
处理	土层深度/cm	C/N	C/P	N/P	pH
封育	0—10	8.77±0.65Aa	27.19±2.02Aa	3.07±0.06Aa	8.24±0.47Aa
	10—20	7.76±0.41Aa	23.59±3.02Aab	3.03±0.28Aa	8.49±0.05Aa
	20—30	7.92±0.08Aa	20.89±0.98Ab	2.68±0.12Aa	8.56±0.06Aa
放牧	0—10	7.78±0.57Aa	21.99±1.02Ba	2.84±0.27Aa	8.09±0.69Aa
	10—20	7.83±0.25Aa	22.16±1.18Aa	2.83±0.16Aa	8.47±0.04Aa
	20—30	8.42±0.43Aa	8.15±0.75Aa	2.81±0.05Aa	8.44±0.03Ba

2.5 土壤碳氮磷化学计量特征与土壤理化因子相关性分析

由图 7 可知,封育草地土壤 SOC 与 C/N、C/P、非毛管孔隙度呈极显著性正相关 ($P < 0.01$),与容重和 pH 呈极显著性负相关 ($P < 0.01$),与 TN、MWD 和 GWD 呈显著性正相关 ($P < 0.05$),与分形维数呈显著性负相关 ($P < 0.05$)。TN 与 N/P、MWD、GWD 和 > 0.25 mm 团聚体呈极显著性正相关 ($P < 0.01$),与分形维数呈极显著性负相关 ($P < 0.01$),与 C/P 和土壤含水率呈显著性正相关 ($P < 0.05$),与容重呈显著性负相关 ($P < 0.05$)。TP 与 N/P 呈极显著性负相关 ($P < 0.01$),与土壤孔隙度呈显著性负相关 ($P < 0.05$)。C/N 与 C/P 和非毛管孔隙度呈极显著性正

相关 ($P < 0.01$),与毛管孔隙度和 pH 呈显著性负相关 ($P < 0.05$)。C/P 与容重呈极显著性负相关 ($P < 0.01$),与 N/P、非毛管孔隙度和 > 0.25 mm 团聚体呈显著性正相关 ($P < 0.05$),与分形维数和 pH 呈显著性负相关 ($P < 0.05$)。N/P 与土壤含水率和 > 0.25 mm 团聚体呈显著性正相关 ($P < 0.05$),与容重和分形维数呈显著性负相关 ($P < 0.05$)。

放牧草地土壤 SOC 与 C/N 呈极显著性正相关 ($P < 0.01$),与 C/P 和容重呈显著性正相关 ($P < 0.05$)。土壤 TP 与土壤含水率和 N/P 呈极显著性负相关 ($P < 0.01$)。C/N 与 C/P 呈显著性正相关 ($P < 0.05$),与非毛管孔隙度呈显著性负相关 ($P < 0.05$)。此外,土壤 TP 与 pH 有一定的负相关关系,而 N/P 与 pH 有一定的正相关关系。



注:MAC为大团聚体含量;SP为土壤孔隙度;CP为毛管孔隙度;NCP为非毛管孔隙度;BD为容重;MC为含水量;*表示显著相关($P < 0.05$);**表示极显著相关($P < 0.01$)。

图 7 封育和放牧草地土壤化学计量与土壤物理性质、团聚体评价参数的相关分析

3 讨论

3.1 不同草地利用方式对土壤物理特性的影响

本研究表明,同一土层土壤,封育草地除了 20—30 cm 土层总孔隙度和毛管孔隙度显著高于放牧草

地外,两者土壤容重、孔隙度、含水量、 > 0.25 mm 团聚体含量和分形维数均相差不大,放牧草地土壤紧实度大于封育草地。GMD 和 MWD 能够反映土壤团聚体分布总体状况,GMD 和 MWD 的值越大则表示

团聚体的平均粒径团聚度和稳定性也越强^[12]。本研究表明,封育草地 0—10 cm 土层 MWD 和 GWD 显著高于放牧草地,并且 >5 mm 团聚体含量也明显高于放牧草地,这说明围栏封育有利于植被恢复,植被覆盖的增加可以减少风蚀,有利于抵抗土壤侵蚀,进而增加土壤团聚体的稳定性。践踏是家畜放牧对草原生态系统的直接作用,会导致土壤理化性质的变化^[13]。通常情况下,围栏封育减少了牲畜采食和践踏作用,会使土壤容重减少,含水量增加。但在本研究中,封育草地较放牧草地相比容重减少,但并不显著,这可能是由于放牧草地正确的放牧管理措施及较低的放牧强度,牲畜的践踏作用并不会显著影响土壤容重;而封育草地土壤含水率的微弱减少可能是由于长期封育形成的土壤结皮阻碍了水分的入渗,从而使土壤含水量相对较低。因此,封育和放牧 2 种草地利用方式下容重和含水率等土壤物理特征的变化,可能与封育和放牧年限,以及放牧压强度有很大的关系,需进一步的研究。

在 0—30 cm 土层,无论是封育草地还是放牧草地,随着土层深度的增加,土壤紧实度和容重增加,含水率降低,这与赵妮等^[14] 研究结果一致。封育和放牧草地 >0.25 mm 团聚体含量、MWD 和 GWD 均为表层 0—10 cm 最高,而分形维数相反,这与赵艳云等^[15] 研究结果一致。这可能是因为该地区植被丰富度较高,0—10 cm 土层具有较为密集的植物根系,对土壤的缠绕固结作用和向土壤释放有机物质较多,更有利于大团聚体的形成。有学者^[16] 在对荒漠草原土壤水稳性团聚体的研究中表明,>0.25 mm 大团聚体含量在 0—10 cm 土层最少,这是由于荒漠草原草地严重退化,土壤遭受侵蚀,表层土壤结构破坏严重,稳定性差,>0.25 mm 团聚体含量低。相关性分析表明,土壤结构稳定性与土壤物理性质有很强的联系,封育草地植被恢复后,不仅改善了土壤物理性质与稳定性,而且能加强二者相互之间的联系。

3.2 不同草地利用方式对化学计量特征的影响

草地采取围栏封育措施后,地上生物量和凋落物增多使植被不断向良性发展,同时增加了土壤对有机碳、氮的截存,改善了土壤理化性质^[17]。但也有研究^[18] 提出,人为围封禁牧对放牧草地没有显著影响,甚至草地养分有所减少。本研究表明,封育草地 0—10 cm 土层 SOC 和 TN 含量最高,并且明显高于放牧草地。这是因为长期围封可以减少营养和能量从土壤到植物再到家畜的流出,这将把大量的养分固定在表层土壤中^[19]。由于 P 是一种沉积性矿物,在土壤中的迁移率较低,因此 TP 在整个空间中分布较为均匀,本研究结果符合这一规律^[20]。另外值得注意

的是,在本研究中,放牧草地土壤 SOC、TN、TP 出现向深层转移的趋势,这可能是由于与封育草地相比,放牧草地植被相对稀疏,地表较为裸露,土壤表层有机质分解快,并且连续放牧使得根系向深层土层转移,这些根系死亡后使得深层土壤养分含量升高。

在化学计量比特征方面,草地封育 8 年后表层 0—20 cm 土壤 C/N、C/P、N/P 明显提高,并且随着土层的加深逐渐降低,但各土层之间均无显著性差异,尹亚丽等^[21] 也得出了相似的结论。C/N 被认为是土壤氮矿化能力的重要指标,有学者^[22] 认为,土壤 C/N 在 25~30 以下时可促进有机质的矿化。在本研究中,封育草地和放牧草地 0—30 cm 土层 C/N 平均值分别为 8.15 和 8.01,土壤有机质矿化均处于加速分解阶段。草地封育 8 年并不会显著影响草地的 C/N 值,这是由于 C、N 作为生态系统的结构性成分,虽然 C 和 N 含量具有较大的空间变异性,但二者的积累和损耗过程紧密相关,比值较为稳定^[23]。本研究表明,2 种草地利用方式土壤 SOC 和 TN 分别与 C/P 和 N/P 呈正相关关系,其中封育草地呈极显著正相关性,符合生态化学计量特征。

3.3 不同草地利用方式下化学计量特征与土壤物理特性的相关性

本研究表明,封育和放牧 2 种草地利用方式土壤化学计量特征与土壤物理特性的相关性有较大的差异。封育草地化学计量特征与土壤物理特性有很强的相关性,其土壤容重与土壤 SOC、TN、C/P 和 N/P 均具有显著负相关性,这是因为草地围栏封育减少了家畜的践踏,增加了地下根系,这些因素都会使土壤团聚体结构和物理特性得到改善。土壤容重的降低可能会使养分进一步增加,在 P 元素稳定的情况下,C/P 和 N/P 呈现上升趋势^[13]。MWD 和 GWD 作为土壤稳定性的指数,与土壤 SOC 和 TN 呈显著正相关关系,而分形维数与两者呈显著负相关关系,这也进一步说明了封育草地植被恢复后,土壤的结构与功能的稳定性有所提高,起到了减少土壤养分流失的作用。此外,封育改变了土壤结构,导致土壤团聚体重新分配和土壤大团聚体形成^[24],本研究中封育草地 C/P 和 N/P 与 >0.25 mm 团聚体含量的正相关关系也印证了这一点。

放牧草地土壤化学计量特征与土壤物理特性的相关性较小。土壤 SOC 与容重呈显著正相关,土壤 TP 与土壤含水率呈极显著负相关,土壤 C/P 与非毛管孔隙度呈显著负相关,土壤化学计量特征与其他土壤性质没有相关性。这可能是由于家畜在放牧草地行走时,其重量不仅会对土壤产生压力,增加土壤容重,降低土壤含水率和孔隙度,畜蹄践踏也会使草地表面的土壤产生位

移与滑动^[25],对土壤 SOC、TN 和 TP 的垂直分布产生影响。由此可以推论放牧草地家畜践踏在影响土壤物理性质的同时,也是土壤化学计量特征的影响因素,但放牧草地家畜种类,放牧时间,及放牧强度等因素对其影响需进一步的研究。

4 结论

(1)随着土层深度的增加,封育草地和放牧草地的土壤紧实度和容重增大,含水率减小,两者各土层均以粒径 $<0.25, >5$ mm 水稳性团聚体为主。草地封育相比于放牧,土壤容重和含水率减小,总孔隙度增加,0—10 cm 土层 MWD 和 GWD 显著增加,分形维数无显著性差异,土壤物理性质和团聚体稳定性有所提高。

(2)封育草地土壤 SOC 和 TN 含量随土层深度的增加逐渐下降,放牧草地相反,TP 含量在 2 种草地利用方式下各土层差异不大,土壤 C/N 和 C/P 与土壤 SOC 变化相似。草地封育相比于放牧,提高了表层 0—20 cm 土壤养分含量和化学计量比。

(3)封育草地土壤物理性质与土壤化学计量特征具有显著相关关系,其中,土壤含水率与 TN、N/P 显著相关,土壤容重与 SOC、C/N 极显著相关,总孔隙度与 TP 显著相关,分形维数与 SOC、TN、C/P、N/P 显著相关,MWD 和 GMD 与 SOC、TN 显著相关,土壤物理结构影响土壤化学计量及养分特征。

参考文献:

- [1] 易浪,任志远,张翀,等.黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系[J].资源科学,2014,36(1):166-174.
- [2] 陈婧,王誉陶,张娟,等.黄土高原半干旱区不同土地利用方式下土壤结构特征[J].农业科学研究,2019,40(3):27-31.
- [3] Li J P, Zheng Z R, Xie H T, et al. Increased soil nutrition and decreased light intensity drive species loss after eight years grassland enclosures[J].Scientific Reports, 2017,7:e44525.
- [4] 吴雨晴,田赟,周建琴,等.不同放牧制度草地土壤碳氮磷化学计量特征[J].应用与环境生物学报,2019,25(4):801-807.
- [5] 陶冶,刘耀斌,吴甘霖,等.准噶尔荒漠区域尺度浅层土壤化学计量特征及其空间分布格局[J].草业学报,2016,25(7):13-23.
- [6] Dise N B, Matzner E, Forsius M. Evaluation of organic horizon C : N ratio as an indicator of nitrate leaching in conifer forests across Europe[J].Environmental Pollution,1998,102(1):453-456.
- [7] 张海鑫,曾全超,安韶山,等.子午岭典型植被凋落叶—土壤养分与酶活性特征[J].生态学报,2018,38(7):2262-2270.
- [8] 刘旭阳,陈晓旋,陈优阳,等.福州不同农田土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J].水土保持学报,2019,33(6):348-355.
- [9] 曾全超,李鑫,董扬红,等.黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征[J].自然资源学报,2016,31(11):1881-1891.
- [10] 李建平,谢应忠.封育对黄土高原天然草地深层土壤碳、氮储量的影响[J].草业科学,2016,33(10):1981-1988.
- [11] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,1999:30-74.
- [12] 王婷,李建平,张翼,等.不同降水下天然草地土壤水稳定性团聚体分布特征[J].草业科学,2019,36(8):1935-1943.
- [13] Bai W M, Fang Y, Zhou M, et al. Heavily intensified grazing reduces root production in an Inner Mongolia temperate steppe[J].Agriculture, Ecosystems & Environment,2015,200:143-150.
- [14] 赵妮,金晶炜,程光庆,等.渭北旱塬区不同坡向土地利用类型对土壤性质的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):271-279,288.
- [15] 赵艳云,胡相明,程积民,等.自然封育对云雾山草地群落的影响[J].水土保持通报,2008,28(5):95-98.
- [16] 李侠.封育对宁夏荒漠草原土壤有机碳及团聚体稳定性的影响[D].银川:宁夏大学,2014.
- [17] Keesstra S, Pereira P, Novara A, et al. Effects of soil management techniques on soil water erosion in apricot orchards[J].Science of the Total Environment,2016,551/552:357-366.
- [18] Hafner S, Unteregelsbacher S, Seeber E, et al. Effect of grazing on carbon stocks and assimilate partitioning in a Tibetan montane pasture revealed by ¹³CO₂ pulse labeling[J].Global Change Biology,2012,18(2):528-538.
- [19] Harris W N, Moretto A S, Distel R A, et al. Fire and grazing in grasslands of the Argentine Caudal:Effects on plant and soil carbon and nitrogen[J].Acta Oecologica,2007,32(2):207-214.
- [20] 赵如梦,张炳学,王晓霞,等.黄土高原不同种植年限苜蓿草地土壤与植物化学计量特征[J].草业科学,2019,36(5):1189-1199.
- [21] 尹亚丽,王玉琴,李世雄,等.围封对退化高寒草甸土壤微生物群落多样性及土壤化学计量特征的影响[J].应用生态学报,2019,30(1):127-136.
- [22] Prescott C E, Chappell H N, Vesterdal L. Nitrogen turnover in forest floors of coastal douglas-fir at sites differing in soil nitrogen capital[J].Ecology,2000,81(7):1878-1886.
- [23] Agren G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities[J].Annual Review of Ecology Evolution and Systematics,2008,39:153-170.
- [24] 杨宁,邹冬生,付美云,等.紫色土丘陵坡地恢复中土壤团聚体特征及其与土壤性质的关系[J].生态学杂志,2016,35(9):2361-2368.
- [25] 曹叶飞.长期围封对山地草原生物多样性及土壤酶活性的影响[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2008.