

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.04.026

朱国栋, 郭娜, 吕广一, 等. 围封对内蒙古荒漠草原土壤理化性质及稳定碳氮同位素的影响. 土壤, 2020, 52(4): 840–845.

围封对内蒙古荒漠草原土壤理化性质及稳定碳氮同位素的影响^①

朱国栋, 郭娜, 吕广一, 王成杰*

(内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 以内蒙古中西部希拉穆仁荒漠草原为研究对象, 比较分析了退化荒漠草原自由放牧、围封 3 a 和围封 5 a 土壤理化性质及稳定性碳氮同位素的差异。结果表明: ①与自由放牧相比, 围封显著增加了土壤有机碳含量、全碳含量、土壤含水量及土壤碳氮比(C/N)($P<0.05$), 土壤容重和全氮含量则显著降低($P<0.05$), 但土壤全氮含量有随围封年限增加而升高的趋势。②相比自由放牧, 围封显著降低了土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值。③土壤有机碳含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈显著负相关关系($P<0.05$), 而土壤全氮含量与 $\delta^{15}\text{N}$ 值呈极显著正相关关系($P<0.01$)。可见, 围封有利于促进退化荒漠草原土壤有机碳的积累, 减缓土壤氮循环, 改善土壤性质。

关键词: 荒漠草原; 围封; 土壤理化性质; 稳定碳氮同位素

中图分类号: S812.2 文献标志码: A

Effects of Enclosure on Soil Physiochemical Properties and Stable Carbon and Nitrogen Isotopes in Inner Mongolia Desert Steppe

ZHU Guodong, GUO Na, LÜ Guangyi, WANG Chengjie*

(College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: Soil physiochemical properties and stable carbon and nitrogen isotopes of grazing and fencing for 3 and 5 years were analyzed in the Xilamuren degraded desert steppe of the central-western Inner Mongolia. The results showed that: 1) Fencing increased the contents of soil organic carbon, total carbon and soil moisture and soil carbon-nitrogen ratio (C/N)($P<0.05$) compared to free grazing. Soil bulk density and total nitrogen content were reduced($P<0.05$), while the total nitrogen content of soil tended to increase with fencing years. 2) The values of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of enclosing treatments decreased with fencing years($P<0.05$). 3) Soil organic carbon content was negatively significantly correlated with its $\delta^{13}\text{C}$ value ($P<0.05$), while the total nitrogen content was positively significantly correlated with its $\delta^{15}\text{N}$ value($P<0.01$). In general, enclosure is beneficial to promote soil organic carbon accumulation, retard soil nitrogen cycle, and improve soil properties in degraded desert steppe.

Key words: Desert steppe; Enclosing; Soil physical and chemical properties; Stable carbon and nitrogen isotope

荒漠草原是内蒙古中西部地区的主要植被类型, 总面积约 11.2 万 km^2 , 占内蒙古草原总面积的 10.7%^[1]。尽管荒漠草原生产力较低、稳定性较差, 但它仍然是内蒙古地区重要的畜牧业养殖基地, 也是我国北方重要的生态屏障^[2]。近年来, 由于受长期的人类生产开发、超载放牧及全球气候变化的多重影响^[3-4], 导致内蒙古荒漠草原出现了不同程度的退化现象。日益凸显的草畜矛盾严重制约着内蒙古当地社

会经济和生态环境的可持续发展。

长期的过度放牧(主要是放牧家畜的采食、践踏和排泄粪便)会影响草原生态系统的营养物质循环过程, 进而使草地土壤的物理化学成分也发生变化, 导致草原退化程度加剧。而围栏封育作为当前退化草原恢复与重建的最重要措施之一, 在各类型退化草原中被广泛利用^[5-6]。大多数学者研究认为围封有利于土壤养分的增加, 对退化草地土壤有着明显的恢复作

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0500504)、国家自然科学基金项目(31460125)和内蒙古自治区应对气候变化及低碳发展专项资金项目(2016-615)资助。

* 通讯作者(nmgcjwang3@163.com)

作者简介: 朱国栋(1988—), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 博士研究生, 主要从事草地资源与管理研究。E-mail: 125626236@qq.com

用。如李军保等^[7]的研究结果表明,随着围封年限的延长,表层土壤容重明显减小;土壤有机质、全氮含量随围封年限的延长呈增加趋势。梁潇洒等^[8]对辽西退化草地实施围封后的研究结果说明围封提高了草地碳固持能力,且随围封年限的增加植物碳储量分别提高了5倍和8.39倍,土壤碳库分别提高了43%和94%。但尹亚丽等^[9]的研究结果认为,长期围封禁牧对轻度退化草地土壤养分和土壤微生物无明显影响,且会造成牧草资源浪费,适度放牧可以保持草地资源的可持续利用。

近年来有关围封对草原生态系统的影响方面的研究主要集中在植物多样性和土壤理化性质上,而且由于土壤系统的复杂性、草地类型的多样性以及围封年限和围封前草地放牧方式、强度的不同,围封对草地土壤理化性质的影响也没有统一的结论,针对内蒙古退化荒漠草原实施围封后土壤稳定碳、氮同位素变化特征的研究也鲜有报道。稳定碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)组成能有效阐明土壤有机质的分解程度、土壤有机碳组分变化和含量的微小转化和迁移;稳定氮同位素($\delta^{15}\text{N}$)能够在一定的时间和空间上综合反映土壤氮循环特征,也是探究生态系统氮循环与评价生态系统氮效应的一个重要指标^[10-11]。因此,本研究以内蒙古高原地带的荒漠草原为研究对象,选取自由放牧为对照,探讨不同围封年限(3 a和5 a)恢复措施下土壤理化性质及稳定碳、氮同位素的变化,以期为监测草原退化提供新的微观指标,最终为退化草地的恢复治理及草地资源的可持续利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于内蒙古自治区包头市达尔罕茂明安联合旗希拉穆仁镇以南,距离镇政府大约3 km ($41^{\circ}15'15''\text{N}$, $111^{\circ}13'32''\text{E}$, 海拔1 687 m)。其气候类型属于中温带半干旱大陆性季风气候,春、秋季常表现为气候干旱,且多伴有风,降雨量少,夏季是雨季,降水量较充足,冬季则寒冷且干燥,年均年降水量为280 mm,蒸发量为降水量的8倍多,降雨主要集中在7—9月;年均温度相对较低,全年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温1 985~2 800 $^{\circ}\text{C}$,年平均日照总时数3 200 h,无霜期较短,为83 d;春、冬季寒冷皆以北风或西北风为主要风向,全年风级较高日数可达63 d。试验地土壤类型为栗钙土,土质较为粗糙。其主要植被为克氏针茅(*Stipa krylovii*)、冷蒿(*Artemisia frigide*)、羊草(*Leymus chinense*)、短花针茅(*Stipa breviflora* Griseb)、

木地肤(*Kochia prostrata* schrad)、冰草(*Agropyron desertorum*)等。试验区草疏不盛、草层低矮,大约8月为草最茂盛的时期。

1.2 试验设计

2014年与2016年选择位于内蒙古中西部希拉穆仁退化荒漠草原实行围封措施,即到试验研究采集样品时(2018年)围封的年限分别为5 a和3 a。每次围封时均设置3个平行样地,每个样地的面积为1.2 hm²。同时在围封外自由放牧草地设置3个面积相同的平行样地作为对照区。试验共9个样地。自由放牧时间从每年的6月初开始,到9月底结束,共持续4个月。自由放牧样地主要放牧家畜为成年蒙古羯羊,放牧强度约2.9只羊单位/(hm²·半年),属于重度放牧样地^[12]。

1.3 土壤取样与测定分析

于2018年9月下旬分别在每个样地随机布设3个采样点,用内径4 cm的土钻取0~10 cm深度的土壤样品,每个取样点土壤取3钻混合,作为1个重复,除去石头、根系等杂物后装入密封袋中带回实验室测定土壤理化性质和稳定碳、氮同位素值。另外用容积为100 cm³的环刀在每个样地内随机取表层土壤(0~5 cm)样品2份,测定土壤容重。

土壤理化性质的测定方法:用环刀法测定土壤容重,土壤含水量用烘干法测定。土壤全氮和全碳含量采用元素分析仪(Elementar Vario MACRO CUBE(德国))测定,样品的C/N比值为测定的全碳含量与全氮含量的比值。

土壤样品有机碳含量及其碳、氮同位素值的测定:风干研磨过筛后的土壤样品,加入0.5 mol/L HCl酸化6 h以去除无机碳,再用去离子水反复淋洗样品直至滤液呈中性,然后在65 $^{\circ}\text{C}$ 条件下干燥。完成处理后的样品送到内蒙古农业大学草地资源教育部重点实验室稳定性同位素分析室进行分析,用元素分析仪(Elementar Vario MACRO CUBE)和同位素质谱仪(Isoprime 100(德国))联用测定有机碳含量及稳定碳、氮同位素组成,计算公式为:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = [(R_{\text{C 样品}} - R_{\text{C 标准}}) / R_{\text{C 标准}}] \times 1\,000 \quad (1)$$

$$R_{\text{C}} = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C} \quad (2)$$

$$\delta^{15}\text{N}(\text{‰}) = [(R_{\text{N 样品}} - R_{\text{N 标准}}) / R_{\text{N 标准}}] \times 1\,000 \quad (3)$$

$$R_{\text{N}} = {}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N} \quad (4)$$

式中: R 为同位素比值, R 下标中的C、N和“样品”“标准”为测定的同位素“碳”“氮”和测定的“待测样品”“标准样品”。 ${}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$ 和 ${}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}$ 分别对应于国际标准ViennaPDB与大气中的氮标准,分析误差为 $\leq \pm 0.2\text{‰}$,测定的稳定碳、氮同位素值用标准样

品校正即可。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2007 对数据进行录入和整理。采用 SPSS 21.0 统计软件对不同围封年限的土壤数据进行 One-way ANOVA 分析, 并采用 Duncan 法检验显著性; 采用 Pearson 相关方法分别检验土壤有机碳、全氮与其对应的稳定碳、氮同位素的相关关系。

2 结果

2.1 不同围封年限对荒漠草原土壤理化性质的影响

由表 1 可以看出, 不同围封年限对内蒙古退化荒漠草原的土壤理化性质产生了显著的影响。围封 3、5 a 和自由放牧样地的土壤容重(单位为 g/cm^3)分别为 1.30 ± 0.04 、 1.22 ± 0.08 和 1.37 ± 0.03 。与自由放牧样地相比, 围封 3 a 和围封 5 a 的样地土壤容重显著降低了 5.1% ($P < 0.05$) 和 10.9% ($P < 0.01$)。说明围封显著降低了内蒙古退化荒漠草原土壤容重, 且随围封年限的增加, 土壤容重逐渐降低。不同围封年限内, 土壤含水量(以质量分数计)的大小顺序为围封 5 a ($19.20\% \pm 0.19\%$) > 围封 3 a ($18.50\% \pm 0.82\%$) > 自由

放牧 ($17.74\% \pm 0.28\%$), 表明围封显著增加了土壤的含水量 ($P < 0.05$)。

围封 3 a 和 5 a 后, 土壤表层 (0 ~ 10 cm) 有机碳含量显著增加 ($P < 0.05$), 并且与自由放牧样地相比, 在围封 5 a 后表现出极显著差异 ($P < 0.01$)。土壤全碳含量(单位为 g/kg)与土壤有机碳含量(单位为 g/kg)的变化规律一致, 即围封 5 a (17.57 ± 0.88) > 围封 3 a (16.33 ± 0.66) > 自由放牧 (15.59 ± 0.80)。围封 5 a 样地相比围封 3 a 和自由放牧样地显著增大 ($P < 0.01$)。围封 3 a 与自由放牧样地相比, 土壤全碳含量差异不显著 ($P > 0.05$)。与两种不同年限围封样地相比, 自由放牧样地土壤全氮含量分别显著升高 7.6% 和 5.1% ($P < 0.01$), 而围封 5 a 样地土壤全氮含量略高于围封 3 a 样地, 但并未表现出显著性差异 ($P > 0.05$)。围封 3 a 和围封 5 a 样地的土壤碳氮比 (C/N) 均显著高于自由放牧样地 ($P < 0.01$), 并且围封 5 a 样地土壤 C/N 显著大于围封 3 a 样地 ($P < 0.05$)。以上结果表明, 围封虽然在一定年限内降低了土壤的肥力, 但是随着围封年限的增长, 土壤的肥力表现出增大的趋势; 并且围封显著增加了草地的固碳能力, 在一定程度上也促进了草地的生长。

表 1 不同围封年限对荒漠草原土壤理化性质的影响
Table 1 Effects of enclosure on soil physiochemical properties in desert steppe

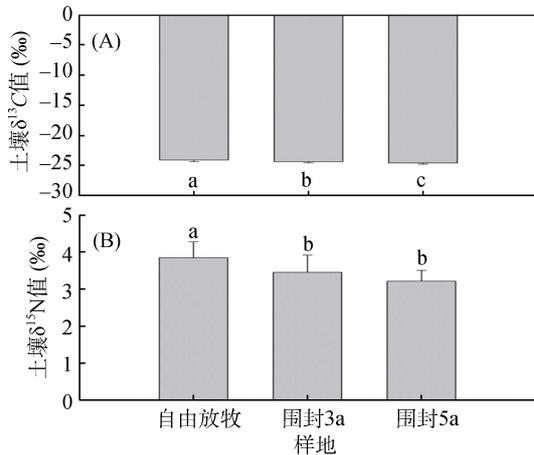
指标	处理		
	自由放牧	围封 3 a	围封 5 a
容重 (g/cm^3)	1.37 ± 0.03 aA	1.30 ± 0.04 bAB	1.22 ± 0.08 cB
含水量 (%)	17.74 ± 0.28 cB	18.50 ± 0.82 bAB	19.20 ± 0.19 aA
有机碳 (g/kg)	12.58 ± 1.02 bB	13.80 ± 0.92 aAB	14.51 ± 1.64 aA
全碳 (g/kg)	15.59 ± 0.80 bB	16.33 ± 0.66 bB	17.57 ± 0.88 aA
全氮 (g/kg)	1.85 ± 0.05 aA	1.72 ± 0.07 bB	1.76 ± 0.06 bB
C/N	8.46 ± 0.55 cB	9.50 ± 0.19 bA	10.01 ± 0.61 aA

注: 表中同行数据后不同大、小写字母分别表示不同处理间差异达极显著 ($P < 0.01$) 和显著 ($P < 0.05$) 水平。

2.2 不同围封年限对荒漠草原土壤碳、氮同位素组成的影响

围封对内蒙古退化荒漠草原土壤碳、氮同位素组成的影响较大。自由放牧的样地土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化范围为 -24.47% ~ -23.79% , 平均值为 $-24.1\% \pm 0.25\%$, 围封 3 a 和 5 a 后土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值分别为 $-24.36\% \pm 0.21\%$ 和 $-24.59\% \pm 0.21\%$ 。与自由放牧样地相比, 围封 3 a 后土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值降低 1.1%, 经方差分析差异显著 ($P < 0.05$); 围封 5 a 后土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值降低 2.0%, 并表现出极显著差异 ($P < 0.01$)。围封 5 a 后土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著低于围

封 3 a 的样地 ($P < 0.05$) (图 1A)。这表明在一定围封年限内, 随着围封年限的增加, 土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值逐渐减小。土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值表现出与土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值一样的变化趋势, 即自由放牧 ($3.85\% \pm 0.43\%$) > 围封 3 a ($3.46\% \pm 0.46\%$) > 围封 5 a ($3.22\% \pm 0.29\%$) (图 1B)。与自由放牧样地相比, 围封 3 a 后土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值降低 10.1%, 差异达显著水平 ($P < 0.05$); 围封 5 a 后土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值降低 16.4%, 差异达到极显著水平 ($P < 0.01$)。围封 5 a 土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值相比围封 3 a 土壤降低 6.9%, 但差异不显著 ($P > 0.05$)。说明土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值随围封年限的增加显著降低。



(图中不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$))

图1 不同围封年限对荒漠草原土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的影响

Fig. 1 Effects of enclosure on soil $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in desert steppe

2.3 土壤碳、氮同位素与其对应有机碳、全氮含量的关系

将不同围封年限与自由放牧条件下全部土壤的有机碳与全氮含量与其对应的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值进行线性回归,结果表明,土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值与有机碳含量存在显著的线性负相关关系($P < 0.05$, $R^2 = 0.18$, 图2A),土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值与有机碳含量的回归方程为 $y = -0.0883x - 23.149$,说明土壤有机碳含量越高,土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值越小。而土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值与全氮含量存在极显著的线性正相关关系($P < 0.01$, $R^2 = 0.31$)(图2B)。土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值与

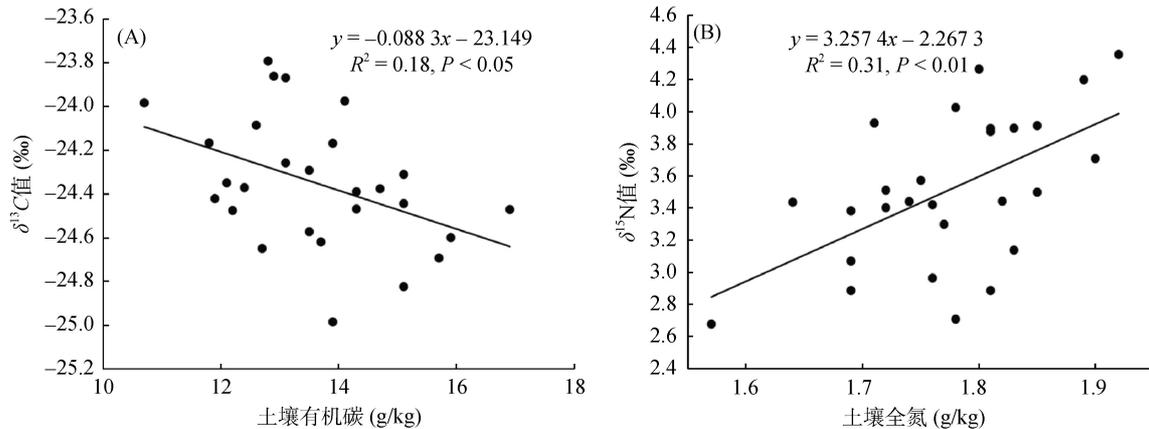


图2 土壤有机碳和全氮含量与其对应的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的相关关系

Fig. 2 Correlation between contents of soil organic carbon and total nitrogen with corresponding values of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$

3.2 不同围封年限对荒漠草原土壤有机碳及其碳同位素组成的影响

土壤有机碳是影响土壤质量的重要因素,其含量变化是土壤质量和营养状况演变的重要标志,也是判断草原退化的敏感指标。而土壤稳定碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)组成能有效阐明土壤有机质的分解程度、土壤有机碳

全氮含量的回归方程为 $y = 3.2574x - 2.2673$,说明随着土壤全氮含量的增加土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值增大。

3 讨论

3.1 不同围封年限对荒漠草原土壤物理性质的影响

土壤容重不仅是判断土壤紧实度的重要指标,还能够表明土壤的退化趋势。本研究发现,围封显著改变了退化荒漠草地的土壤容重和含水量。围封样地的土壤容重显著小于自由放牧样地,并且随着围封年限的增长逐渐减小。而土壤含水量则表现出与土壤容重相反的变化趋势,即随围封年限的增长逐渐增加。这是因为一方面围封直接消除了家畜对草地表面土层的践踏,降低了土壤紧实度,使土壤空隙度增大^[13],土壤渗透性增加,导致土壤容重变小,土壤含水量增加。另一方面因为围封排除了家畜对植被的采食,为植被的生长提供了有利环境,植物根系生长也能降低土壤容重^[14],同时围封导致样地内植被的盖度、高度、密度、生物量以及地表凋落物的数量增大,减少了地表的裸露程度,从而减弱了表层土壤水分的蒸发,使得土壤含水量增加。此结果表明,围封改善了退化荒漠草原土壤的物理性质。这与李洋等^[15]对青海省围封2a的高寒草甸和刘建等^[16]对宁夏盐池县不同围封类型19a和围封8a的沙化草地的研究结果相一致。

组分变化和含量的微小转化和迁移。本研究中,与自由放牧样地相比,不同围封年限处理表层土壤有机碳含量和全碳含量均显著增加,说明围封促进了退化荒漠草原有机质的积累。这主要是因为围封减少了放牧干扰,增加了样地内地表植被生物量和植被盖度^[17],提高了草地初级生产力及凋落物的积累,使输入土壤

中的有机碳数量增加,同时也提高了富含 ^{12}C 的新近形成有机碳对富含 ^{13}C 的老土有机碳的“稀释”程度^[18]。自由放牧样地相比围封样地,放牧家畜对植被茎干以上部分(主要是植物叶片和部分茎)的采食更为严重,导致最后输入土壤的有机质主要来自植被的茎干部分。而 Badeck 等^[19]的研究结果表明,叶片平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值比茎干低 0.96‰,本课题之前对该研究区植被不同器官的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的测定也表明,植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值平均比植物茎的 $\delta^{13}\text{C}$ 值低 0.87‰。这表明与围封相比,自由放牧样地土壤中输入了富集 $\delta^{13}\text{C}$ 值的有机物质,进一步增加了自由放牧样地土壤有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。所以围封 3 a 和 5 a 样地相比自由放牧样地,表层土壤(0~10 cm)有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别偏负 0.26‰ 和 0.49‰。另外,围封增加土壤中有有机物质输入的同时有效减少了水、风等的侵蚀,也消除了家畜的践踏行为使表层土壤有机碳的分解速率减缓,提高了土壤碳固持能力,从而使土壤有机质含量升高^[8,20]。在土壤有机碳分解过程中微生物优先利用 ^{12}C ^[21],使残留的有机质富集 ^{13}C ,因为围封减缓了这一分解过程,所以使得围封样地土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值比自由放牧样地更低。此研究结果与旦增塔庆等^[22]对西藏高寒草甸实施围封(5、7、11 a)和赵云飞等^[23]对若尔盖退化草甸的研究结果相一致。本研究区域土壤有机碳含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈显著负相关关系($P<0.05$),说明土壤有机碳含量越高,土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值越小,这与王毛兰等^[24]的研究结果相似。

3.3 不同围封年限对荒漠草原土壤全氮及其氮同位素组成的影响

土壤全氮是评价土壤质量的重要指标之一,不仅直接影响着土壤肥力和植物生长,而且在全球气候变化及氮循环中发挥重要作用^[25]。针对围封对退化草地土壤全氮含量影响的研究结果并不一致。多数学者的研究结果均表明,围封提高了土壤全氮等养分的含量^[26]。而张云舒等^[27]对新疆博格达山北坡围栏封育 7 a 的荒漠草地土壤养分研究结果表明,围栏封育后土壤全氮含量几乎没有变化。本研究中,围封样地的土壤全氮含量显著低于自由放牧样地。一方面是由于自由放牧有利于提高氮的循环速率及可利用性,例如牧草被家畜采食后的再生促进氮素向地上植物幼嫩器官重新运输分配,结合自由放牧样地家畜的粪便较多,提供了大量的有机氮源,逐渐增加土壤全氮含量。此外,牲畜排泄物增加了可利用氮的同时由于氮挥发发生比较强烈的分馏效应,使较多含轻氮(^{14}N)的物质流失,重氮(^{15}N)物质剩余,从而也会造成土壤

表层 ^{15}N 的斑块化分布和 $\delta^{15}\text{N}$ 显著增加^[28]。另一方面,围封降低了土壤容重,使土壤呼吸提高,凋落物氮固持和地上立枯生物量增加,同时使土壤微生物转化率和净氮矿化下降,进而导致封育后土壤氮素降低。相反地,放牧提高了土壤的净氮矿化速率,促进淋溶、挥发和反硝化等过程,增加贫化 ^{15}N 的流失,形成一个开放的氮系统,从而引起土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值的增加^[29]。因此,本研究中自由放牧样地经过围封处理后土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值显著降低,并且有随围封年限增加逐渐减低的趋势,而土壤全氮随围封年限的增长有增加的趋势,说明围封有利于减缓土壤氮循环过程。此研究结果与前人的研究结果一致^[30]。但也有研究认为长期的放牧导致氮循环速率降低,土壤的 $\delta^{15}\text{N}$ 值也随之降低。例如,吴田乡等^[31]对内蒙古典型草原生态系统的研究也发现,放牧显著降低了 0~20 cm 土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值。本研究中土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值与全氮含量存在极显著的线性正相关关系($P<0.01$)。张青青等^[32]在天山北坡山地草原的研究中发现,无论在放牧还是围封条件下,随着土壤全氮含量的增加土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值均表现为先降低后增加的变化趋势。当土壤全氮含量大约低于 1 g/kg 时,土壤全氮含量与土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值成负相关关系,而当土壤全氮含量高于 1 g/kg 时则表现出正相关关系。本研究中不管是自由放牧样地还是围封样地土壤全氮含量均大于 1.5 g/kg,因此本研究与其有相似的结果。

3.4 不同围封年限对荒漠草原土壤碳氮比的影响

土壤碳氮比(C/N)可以反映土壤有机质在分解过程中的矿化效率,较低的C/N有利于土壤的矿化作用,土壤C/N与有机质的分解速率呈反比。一般情况下,C/N低的土壤有机碳的分解速率较快^[33],会有更多的 $^{12}\text{CO}_2$ 从土壤中释放,导致剩余土壤碳库富集 ^{13}C ,所以相比围封样地,自由放牧样地土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值更大。本研究中不同围封年限土壤C/N均显著高于自由放牧样地($P<0.01$),并且围封 5 a 后土壤C/N显著大于围封 3a 样地($P<0.05$)。退化荒漠草原实施围封后,植物群落盖度和地上生物量增加,导致有机物输入量增加,土壤有机质分解速率减慢,有机碳含量消耗减少,同时放牧家畜粪便增加了自由放牧样地的全氮含量,因此围封样地土壤C/N较高,这与刘忆轩等^[34]的研究结论一致。说明围封在一定程度上不利于土壤的矿化作用,有机质分解速率降低,从而有利于有机碳的积累。

4 结论

1)与自由放牧相比,围封显著增加了土壤含水量、有机碳含量、全碳含量以及C/N($P<0.05$),并且

随围封年限的增长而增大。而土壤容重则表现出相反的变化，即随围封年限的增长而显著减小($P<0.05$)。土壤全氮含量则是自由放牧样地显著高于围封样地($P<0.05$)，表明放牧显著增加了土壤的全氮含量。总体来说，围封改善了内蒙古荒漠草原土壤状况。

2) 内蒙古荒漠草原土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值表现出一致的变化规律：相比自由放牧样地，围封显著降低了土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值，且随围封年限的增加逐渐减小($P<0.05$)。研究区域土壤有机碳、全氮含量与其稳定同位素相互间有显著的相关性。

3) 围封有利于促进退化荒漠草原土壤有机碳的积累，减缓土壤氮循环，改善土壤性质。但其恢复的具体过程和机理，还需要更全面深入的研究来揭示。

参考文献：

- [1] 刘瑞国, 王美珍, 郭淑晶, 等. 内蒙古自治区草地资源的基况介绍[J]. 内蒙古草原, 2012 (3): 2-6.
- [2] 单玉梅, 温超, 常虹, 等. 不同放牧强度下荒漠草原土壤氮矿化季节性动态研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(4): 723-731.
- [3] 展鹏飞, 刘振亚, 郭玉静, 等. 不同放牧方式下高寒草甸土壤碳组分的对比研究[J]. 土壤, 2018, 50(3): 543-551.
- [4] 韩芳, 李丹. 内蒙古荒漠草原不同等级降水时空变化特征[J]. 中国草地学报, 2019, 41(3): 90-99.
- [5] 闫宝龙, 王忠武, 屈志强, 等. 围封对内蒙古典型草原与荒漠草原植被-土壤系统碳密度的影响[J]. 植物生态学报, 2018, 42(3): 327-336.
- [6] 薛会英, 罗大庆, 王鸿源, 等. 藏北高寒草甸土壤线虫群落对围封及自由放牧的响应[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 480-492.
- [7] 李军保, 曹庆喜, 吐尔逊娜依·热依木江, 等. 围封对伊犁河谷春秋草场土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 中国草地学报, 2014, 36(1): 84-89.
- [8] 梁潇洒, 张立奇, 闫庆忠, 等. 围栏封育恢复和提升辽西退化草地的碳固持功能[J]. 中国草地学报, 2019, 41(2): 65-70.
- [9] 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.
- [10] 张月鲜, 李素艳, 孙向阳, 等. 荒漠草原土壤有机质碳稳定同位素特征研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 164-168.
- [11] Templer P H, Arthur M A, Lovett G M, et al. Plant and soil natural abundance $\delta^{15}\text{N}$: indicators of relative rates of nitrogen cycling in temperate forest ecosystems[J]. *Oecologia*, 2007, 153(2): 399-406.
- [12] 古琛, 赵天启, 王亚婷, 等. 短花针茅生长和繁殖策略对载畜率的响应[J]. 生态环境学报, 2017, 26(1): 36-42.
- [13] 乔荣. 围封对希拉穆仁草原植被及土壤理化性质的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- [14] 苏永中, 赵哈林. 持续放牧和围封对科尔沁退化沙地草地碳截存的影响[J]. 环境科学, 2003, 24(4): 23-28.
- [15] 李洋, 严振英, 郭丁, 等. 围封对青海湖流域高寒草甸植被特征和土壤理化性质的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(10): 33-39.
- [16] 刘建, 张克斌, 程中秋, 等. 围栏封育对沙化草地植被及土壤特性的影响[J]. 水土保持通报, 2011, 31(4): 180-184.
- [17] 李春莉, 赵萌莉, 韩国栋, 等. 不同放牧压力下荒漠草原土壤有机碳特征及其与植被之间关系的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(5): 134-138.
- [18] 张林, 孙向阳, 乔永, 等. 不同放牧强度下荒漠草原土壤有机碳及其 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布特征[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 149-153.
- [19] Badeck F W, Tcherkez G, Nogués S, et al. Post-photosynthetic fractionation of stable carbon isotopes between plant organs—a widespread phenomenon[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2005, 19(11): 1381-1391.
- [20] 王宗明, 张柏, 宋开山, 等. 不同利用方式对松嫩平原典型县耕地土壤养分状况的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 704-707.
- [21] 朱书法, 刘丛强, 陶发祥, 等. 贵州喀斯特地区棕色石灰土与黄壤有机质剖面分布及稳定碳同位素组成差异[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 169-173.
- [22] 旦增塔庆, 白玛嘎翁, 多吉顿珠, 等. 围封年限对西藏高寒草甸植被特征与土壤养分的影响[J]. 草业科学, 2018, 35(1): 10-17.
- [23] 赵云飞, 汪霞, 欧延升, 等. 若尔盖草甸退化对土壤碳、氮和碳稳定同位素的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1405-1411.
- [24] 王毛兰, 赖建平, 胡珂图, 等. 鄱阳湖湿地土壤有机碳氮同位素特征及其环境意义[J]. 中国环境科学, 2016, 36(2): 500-505.
- [25] 孙益权, 张忠启, 于东升, 等. 采样点空间集聚度对揭示区域土壤全氮变异性的影响[J]. 土壤, 2018, 50(4): 787-794.
- [26] 周天阳, 高景, 王金牛, 等. 基于群落结构及土壤理化性质对围封7年青藏高原东南缘高山草地的综合评价[J]. 草业学报, 2018, 27(12): 1-11.
- [27] 张云舒, 范燕敏, 武红旗, 等. 封育对山地荒漠土壤微生物量碳及养分的影响[J]. 草业科学, 2014, 31(5): 797-802.
- [28] Frank D A, Evans R D, Tracy B F. The role of ammonia volatilization in controlling the natural $\delta^{15}\text{N}$ abundance of a grazed grassland[J]. *Biogeochemistry*, 2004, 68(2): 169-178.
- [29] Evans R D, Belnap J. Long-term consequences of disturbance on nitrogen dynamics in an arid ecosystem[J]. *Ecology*, 1999, 80(1): 150-160.
- [30] 赫凤彩, 张婧斌, 邢鹏飞, 等. 围封对晋北赖草草地土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响及其与植被多样性的关系[J]. 草地学报, 2019, 27(3): 644-650.
- [31] 吴田乡, 黄建辉. 放牧对内蒙古典型草原生态系统植物及土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 的影响[J]. 植物生态学报, 2010, 34(2): 160-169.
- [32] 张青青, 安沙舟, 于辉, 等. 放牧对天山北坡山地草原生态系统土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 的影响[J]. 草业科学, 2016, 33(7): 1260-1266.
- [33] Sinsabaugh R L, Carreiro M M, Repert D A. Allocation of extracellular enzymatic activity in relation to litter composition, N deposition, and mass loss[J]. *Biogeochemistry*, 2002, 60(1): 1-24.
- [34] 刘忆轩, 李多才, 侯扶江. 甘肃马鹿春秋放牧对高寒草原土壤理化性质的影响[J]. 草业科学, 2019, 36(2): 273-283.