

半干旱区不同围封年限对草地土壤和微生物碳氮含量的影响

张强¹, 邓军², 毛瑾¹, 朵莹¹, 程杰³, 郭梁^{4,5}

(1. 西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 宁夏云雾山国家级

自然保护区管理局, 宁夏 固原 756000; 3. 国家林业和草原局西北调查规划设计院, 陕西 西安 710048;

4. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 5. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 探究半干旱区草地根际土壤碳氮及土壤微生物量碳氮对不同封禁年限响应特征, 为半干旱草地生态系统物质循环研究以及生态系统养分限制判定等提供依据, 并为确定合理围封年限提供科学参考。[方法] 以宁夏回族自治区固原市云雾山国家级自然保护区半干旱草原为研究对象, 应用生态化学计量学方法对比分析放牧地与围封 10, 25, 35 a 样地根际土壤有机碳、全氮、硝态氮、铵态氮和土壤微生物量碳氮含量及其化学计量特征变化过程与规律。[结果] 围封显著增加了土壤碳氮含量, 其最大值出现在封育 25 a 样地, 随后下降。围封 10, 25 a 和 35 a 样地土壤有机碳含量分别是放牧样地的 1.37, 1.83 倍和 1.38 倍; 总氮含量分别是放牧样地 1.34, 1.52 倍和 1.24 倍。但土壤 C : N 随围封年限增加基本保持稳定, 其值与土壤有机碳含量存在极显著相关, 而与土壤总氮无明显相关性。与放牧样地相比, 围封样地铵态氮含量随封育年限无明显变化, 硝态氮含量和硝态氮 : 铵态氮比值则普遍下降, 在围封 25 a 时最低。围封增加了土壤微生物量碳氮含量, 围封 10, 25, 35 a 样地土壤微生物量碳含量较放牧地分别提高了 20.5%, 45.7% 和 15.1%; 微生物量氮含量分别提高了 24.7%, 60.5% 和 40.9%。而微生物量 C : N 则随围封年限延长而下降, 微生物量碳占土壤有机碳百分比对围封年限无响应。围封 10, 25 a 样地与放牧地相比, 微生物量氮占土壤总氮百分比和化学计量不平衡性(即土壤 C : N 与微生物量 C : N 比值)均无显著差异, 但其值却在围封 35 a 样地显著增加。[结论] 围封措施能够显著提高半干旱退化草地土壤碳、氮养分, 促进土壤微生物活动, 有利于退化草地恢复, 但封育时间过长则可能产生负效应, 封育 25 a 是草地长期封育措施中一个较为合理的围封年限。

关键词: 围封年限; 半干旱草地; 土壤碳氮含量; 微生物量; 生态化学计量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)01-0029-06

中图分类号: S812.2, S157.9

文献参数: 张强, 邓军, 毛瑾, 等. 半干旱区不同围封年限对草地土壤和微生物碳氮含量的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 29-34. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.01.005; Zhang Qiang, Deng Jun, Mao Jin, et al. Impacts of different enclosure ages on soil and microbial carbon and nitrogen contents in semi-arid grasslands [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 29-34.

Impacts of Different Enclosure Ages on Soil and Microbial Carbon and Nitrogen Contents in Semi-arid Grasslands

Zhang Qiang¹, Deng Jun², Mao Jin¹, Duo Ying¹, Cheng Jie³, Guo Liang^{4,5}

(1. College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi

712100, China; 2. Administration Bureau of Ningxia Yunwushan National Nature Reserve,

Guyuan, Ningxia 756000, China; 3. Northwest Surveying Planning and Designing Institute of National

Forestry and Grassland Administration, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 4. Institute of Soil and Water

Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5. Institute of Soil and Water

Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The response characteristics of carbon and nitrogen in rhizosphere soil of semiarid

收稿日期: 2020-08-21

修回日期: 2020-09-21

资助项目: 国家重点研发计划项目“北方农牧交错带草地退化机理及生态修复技术集成示范”(2016YFC0500700); 国家自然科学基金项目(41701606); 西北农林科技大学青年英才培育计划(2452020009)

第一作者: 张强(1997—), 男(汉族), 甘肃省陇西人, 硕士研究生, 主要从事气候变化与草地生态响应。Email: zhangqiang228313@163.com。

通讯作者: 郭梁(1984—), 男(汉族), 山东省泰安市人, 博士, 研究员, 主要从事气候变化与林草生态响应。Email: guoliang2014@nwsuaf.edu.cn。

grasslands and soil microbial biomass to different years of grazing exclusion were studied to provide basic information for the study of the material cycle of semi-arid grassland ecosystems and the determination of ecosystem nutrient limits, and to determine reasonable grazing exclusion periods. [Methods] Taking the typical semi-arid grassland of Yunwushan National Nature Reserve in Guyuan City, Ningxia Hui Autonomous Region, as the research object, the ecological stoichiometric method was used to compare and analyze the variation process and rule of rhizosphere soil organic carbon, total nitrogen, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, and soil microbial biomass carbon and nitrogen content, as well as the stoichiometric characteristics of the grazing land and the sampled land enclosed for 10, 25, and 35 years. [Results] Enclosure treatment significantly increased the soil carbon and nitrogen content. The maximum values appeared in the plot enclosed for 25 years, after which the values declined. The soil organic carbon contents of the plots enclosed for 10, 25, and 35 years were 1.37, 1.83 times and 1.38 times of that of the grazing plot, and the total nitrogen contents were 1.34, 1.52, and 1.24 times of that of the grazing land, respectively. However, soil C : N remained stable with the increase in enclosure years. It was significantly correlated with soil organic carbon content but had no evident correlation with soil total nitrogen. Compared with that of the grazing plot, the ammonium nitrogen content of enclosed plots did not change significantly with the enclosure years, but the nitrate nitrogen content and the nitrate : ammonium nitrogen ratio generally decreased, with the lowest values at 25-year grazing exclusion. Enclosure significantly increased the soil microbial biomass carbon and nitrogen content. The soil microbial biomass carbon contents of the sample plots enclosed for 10, 25, and 35-years increased by 20.5%, 45.7%, and 15.1% compared with grazing land, while the microbial biomass nitrogen contents increased 24.7%, 60.5%, and 40.9%, respectively. The microbial biomass C : N value decreased with the extension of the enclosure period. The percentage of microbial biomass carbon in soil organic carbon did not respond to the enclosure period. Compared with grazing land, 10-year and 25-year grazing exclusion had no significant difference in the percentage of microbial biomass nitrogen in total soil nitrogen and the stoichiometric imbalance (i. e., the ratio of soil C : N to microbial biomass C : N), but the value significantly increased in 35-year grazing exclusion. [Conclusion] Enclosure measures can significantly improve soil carbon and nitrogen nutrients in semi-arid degraded grasslands, promote soil microbial activities, and facilitate the restoration of degraded grassland. However, a too long enclosure treatment may have a negative effect. Twenty-five years of enclosure is a reasonable enclosure period in long-term enclosure measures of degraded grasslands.

Keywords: enclosure years; semiarid grassland; soil carbon and nitrogen; microbial biomass; ecological stoichiometry

围栏封育作为一种有效且简便易行的促进退化草地自然恢复的方法,通过人为降低或完全排除家畜对草地生态系统影响,使草地生态系统在自身弹性下得以恢复和重建,在干旱半干旱区,特别是黄土高原植被恢复重建中广泛应用^[1]。但有关退化草地适宜的围封面积和围封年限等关键问题却一直存在较大争议^[2]。相比大量的以植物物种多样性和生产力等地上指标变化来确定最佳封育年限研究^[3-5],植被恢复过程中土壤养分、土壤微生物量碳和氮含量变化趋势明显,其作为评价土壤肥力、土壤质量早期变化及植被恢复演替的有效性亟待加强^[6]。

生态化学计量学通过分析多重元素(主要是 C, N, P)质量平衡对生态交互作用的影响来探讨生态系统结构与功能^[7]。土壤 C : N 是表征土壤碳氮元素动态平衡的指标,其往往被用来检测土壤质量,能够调控土壤微生物对有机物的分解作用及碳的释放

与吸收^[8]。目前,生态化学计量学研究主要集中在植物叶片及土壤养分方面,而分析围封年限对根际土养分影响的报道较少。因此,本研究选取中国西部半干旱地区草原植被恢复的成功典范—宁夏云雾山国家级自然保护区的试验区,对不同封育年限样地中根际土壤和微生物量碳、氮含量及其化学计量特征进行研究,探讨其对封育年限的响应规律,以期在半干旱草地生态系统物质循环研究以及生态系统养分限制判定等提供依据,并为确定合理围封年限提供科学参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

选取宁夏回族自治区固原市的云雾山国家级自然保护区试验区为研究点(106°21'—106°27'E, 36°10'—36°17'N)。保护区自 1982 年以来一直定位

监测退化草原恢复情况,至今已近 40 a,积累了丰富的草地群落变化资料。研究区地处黄土高原西南部,具有典型的半干旱气候特征,年平均降水量为 425 mm,其中 7—9 月降水量占全年 60%以上;年平均气温 7 ℃,1 月份温度最低,平均最低气温 -8.2 ℃,8 月平均最高气温 25.2°。土壤主要类型为山地灰褐土。目前研究区物种数为 313 种,优势物种包括长芒草(*Stipa bungeana*)、大针茅(*Stipa grandis*)、甘青针茅(*Stipa przewalskyi*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、白莲蒿(*Artemisia sacrorum*)以及星毛委陵菜(*Potentilla acaulis*)等。

1.2 试验设计

2017 年 8 月底,对不同封育年限的草地生态系统进行了全面的群落调查及土壤样品采集,分别为放牧样地(GE₀)、封育 10 a 样地(GE₁₀)、封育 25 a (GE₂₅)和 35 a(GE₃₅)样地。其中,放牧样地为全年连续放牧(4 只羊/hm²)。每个样地随机设置有代表性的试验小区 3 个,小区面积 50 m×100 m,每个小区间隔 80~100 m。在每个小区内随机选取 10 个采样点进行土壤样品采集,齐地去植物地上部分后,用直径 10 cm 的根钻采集 0—20 cm 深度土样,将根系与土壤一齐取出,利用抖落法^[9]采集根际土壤,用毛刷收集入无菌自封袋后将 10 个样点土样均匀混合为一个土壤样品。过 2 mm 筛后将每份土样分为两部分:一部分在 4 ℃条件下保存,用于微生物量碳、微生物量氮含量测定,另一部分阴干后在实验室测定土壤养分有关指标。

1.3 测定项目与方法

土壤养分测定指标主要包括土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)、土壤全氮(total nitrogen, TN)、硝态氮(nitrate nitrogen, NO₃⁻-N)和铵态氮(ammonium nitrogen, NH₄⁺-N)含量。具体测定方法如下:采用重铬酸钾氧化法测定土壤有机碳(SOC)含量^[10]。使用 FOSS 全自动凯氏定氮仪(Kjeltec 8 400, 丹麦)测量土壤总氮(TN)含量^[11]。将土壤以

2 mol/L KCl 溶液浸提后利用连续流动分析仪(OI Analytical, 美国)测定土壤硝态氮(NH₄⁺-N)和铵态氮(NO₃⁻-N)含量^[12]。

土壤微生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)和微生物量氮(microbial biomass nitrogen, MBN)的测定采用氯仿熏蒸浸提法^[13]。即称取 25 g 相当于烘干土重的新鲜土壤在 25.8 ℃下用 CHCl₃ 熏蒸 24 h,然后将 100 ml 0.5 mol/L K₂ SO₄ 加入土壤中,震荡 1 h(200 r/min)后过滤去除熏蒸剂,同时另外提取 25 g 未熏蒸土壤。使用 Elementar Liqui TOCII 分析仪测定提取物的有机碳和氮含量。

1.4 数据统计分析

采用 Excel 2016 进行数据整理,共采集土样 120 个,表中数据为平均值±标准差。采用 SPSS 25.0 软件对不同围封年限的土壤数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)检验并运用 LSD 法进行多重比较,显著性水平为 0.05。采用 Pearson 相关分析法对不同围封年限下土壤和微生物量 C、N 含量及其化学计量的相关性进行检验。

2 结果与分析

2.1 不同封育年限对土壤及微生物量碳、氮含量的影响

从表 1 可以看出,除 NH₄⁺-N 含量无明显变化外,土壤其他养分指标在放牧和不同封育年限样地间差异显著。围栏封育显著提高了土壤有机碳含量,GE₁₀,GE₂₅ 和 GE₃₅ 样地土壤有机碳含量分别是放牧样地(GE₀)的 1.37,1.83,1.38 倍,在 25 a 封育样地(GE₂₅)达到最大值(38.11 g/kg)。土壤全氮含量的变化规律与土壤有机碳相似,GE₁₀,GE₂₅ 和 GE₃₅ 与 GE₀ 相比,土壤总氮含量分别提高了 35%,52% 和 23%,而围栏封育草地相较于放牧草地 NO₃⁻-N 含量普遍下降,在 GE₂₅ 时含量最低。封育草地微生物量 C 和 N 含量均高于放牧草地,均在 GE₂₅ 时达到峰值,而后下降。

表 1 云雾山自然保护区不同封育年限下土壤及微生物量碳、氮含量变化

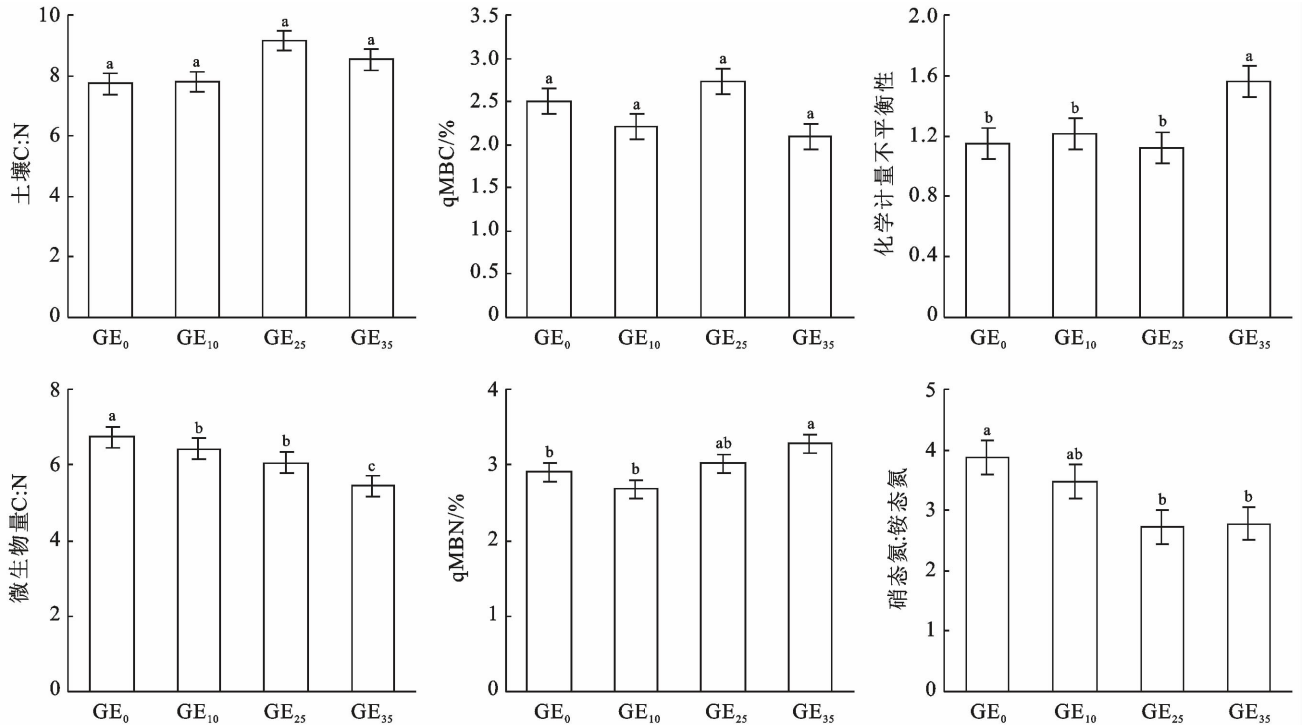
处理	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	铵态氮/ (mg·kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg·kg ⁻¹)	微生物量碳/ (mg·kg ⁻¹)	微生物量氮/ (mg·kg ⁻¹)
GE ₀	20.85±0.92 ^c	2.73±0.15 ^c	3.64±0.24 ^a	14.07±0.63 ^a	522.79±45.18 ^b	78.59±9.89 ^b
GE ₁₀	28.54±0.88 ^b	3.67±0.13 ^b	3.79±0.11 ^a	13.17±0.96 ^a	629.99±5.89 ^{ab}	97.99±0.64 ^{ab}
GE ₂₅	38.11±1.13 ^a	4.16±0.13 ^a	3.74±0.38 ^a	10.18±0.24 ^b	761.63±84.23 ^a	126.13±13.71 ^a
GE ₃₅	28.67±0.46 ^b	3.38±0.20 ^b	4.26±0.77 ^a	11.84±0.60 ^{ab}	601.29±18.23 ^b	110.81±11.02 ^a
F	64.19	15.35	0.38	6.62	4.16	4.97
P	0.001	0.001	0.771	0.015	0.047	0.031

注:①GE₀,GE₁₀,GE₂₅,GE₃₅ 分别表示放牧地,封育 10 a,封育 25 a,封育 35 a 样地;②表中数据为平均数±标准差,不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著($p<0.05$)。下同。

2.2 土壤及微生物量碳、氮化学计量关系对封育年限的响应

土壤碳氮比(C:N)为 SOC 与 TN 比值。由图 1 可知,研究区放牧和不同封育年限草地土壤 C:N 的变化范围为 7.72~9.16,平均值为 8.31,变异系数为 9%,不同封育年限土壤 C:N 较为稳定,放牧样地最低,GE₂₅样地最高,但未达显著差异水平。封育年限对微生物量 C:N 则有显著影响,随封育年限延长,微生物量 C:N 逐渐下降,GE₃₅ 最低。qMBC 为 MBC 与

SOC 的比值,qMBN 为 MBN 与 TN 的比值,qMBC 和 qMBN 常被用作评价土壤肥力和土壤质量变化的有效指标,本研究 LSD 分析表明封育年限对 qMBC 影响差异不显著;qMBN 在 GE₁₀ 时最低,GE₃₅ 最高,显著高于其他处理。化学计量不平衡性是指土壤碳氮比与微生物量碳氮比的比值,其分析结果表明,GE₀,GE₁₀ 和 GE₂₅ 之间差异均不显著,GE₃₅ 最高,且与前 3 个阶段差异显著。硝态氮:铵态氮的变化规律与微生物量 C:N 较为相似,随封育年限增加,其值呈下降趋势。



注:①图中不同小写字母表示差异显著;②GE₀,GE₁₀,GE₂₅,GE₃₅分别表示放牧地,围封 10 a,围封 25 a,围封 35 a。

图 1 土壤不同化学计量指标随封育年限变化规律

2.3 土壤及微生物量碳氮和化学计量特征的耦合关系

相关性分析结果(表 2)表明土壤有机碳与总氮和微生物量氮以及 MBC:MBN 具有显著相关性($p < 0.05$),与土壤 C:N,微生物量碳和 qMBC 之间具有极显著相关性($p < 0.01$),特别是与 qMBC 的相关系数达到 0.8,而与 qMBN 相关性较弱。土壤总氮与

微生物量碳、微生物量氮和 qMBC 之间均存在极显著的线性相关,但土壤 C:N 却与微生物量碳、氮和 qMBC,qMBN 以及 MBC:MBN 之间均无显著相关性。微生物量碳与微生物量氮之间具有极显著相关性,此外,qMBN 与 MBC:MBN 之间也存在显著的相关关系。

表 2 土壤和微生物量 C,N 含量及化学计量的相关性

项目	土壤有机碳	土壤总氮	土壤 C:N	微生物量碳	微生物量氮	qMBC	qMBN
土壤总氮	0.48*						
土壤 C:N	0.76**	Ns					
微生物量碳	0.662**	0.54**	Ns				
微生物量氮	0.42*	0.60**	Ns	0.79**			
qMBC	0.80**	0.62**	Ns	Ns	0.37*		
qMBN	Ns	Ns	Ns	0.38*	0.66**	Ns	
MBC:MBN	0.35*	Ns	Ns	Ns	0.42*	Ns	0.504*

注:*为显著相关($p < 0.05$),**为极显著相关($p < 0.01$),Ns表示二者无显著相关性。

3 讨论

3.1 土壤碳、氮及其化学计量关系随封育年限变化规律

研究表明,在植被演替过程中磷含量相对稳定^[14],而土壤有机碳和氮含量作为除磷之外表征土壤质量状况的主要生态因子,其含量对地上植被生长发育影响较大,因此在封育植被演替过程中,探讨土壤碳、氮及其化学计量关系变化对于准确评价封育后植被恢复情况具有重要意义。本研究中,封育后土壤碳、氮含量较放牧地相比,均显著升高,这与前人研究类似^[15-16]。土壤氮和有机碳主要来源于生物死亡后分解形成的稳定有机质^[17],围封后家畜(主要是绵羊)采食植物被限制,从而极大增加了地上生物量的积累,进而使围封样地碳、氮含量较放牧地相比显著提高^[18]。值得注意的是,尽管围封后土壤有机碳和总氮含量均高于放牧地,但二者值却在 GE_{25} 达到峰值后急剧下降,这可能与演替进程中地上群落变化有关,之前研究表明物种多样性的峰值通常出现在演替中后期^[19],Zhang 等^[20] 研究发现半干旱草原封育 25 a 后地上物种多样性和地上生物量最高,随后下降,与本研究土壤中有机碳和总氮含量变化趋势一致。因此,演替后期地上生物量减少导致土壤有机质输入量降低是造成土壤有机碳和总氮含量在 GE_{25} 后急剧下降的主要原因。土壤铵态氮和硝态氮可被植物较快吸收用于自身生长发育,所以本研究中围封地和放牧地相比,土壤铵态氮与硝态氮含量变化不大,甚至随着封育演替后期植物对养分需求的增大,硝态氮含量有所下降。

土壤生态化学计量作为表征土壤内部养分循环状况的重要指标,对于揭示元素的可获得性和平衡机制及生态恢复过程具有重要意义^[21]。本研究中土壤 C:N 随围封年限变化保持稳定,与周正虎和王传宽^[17] 整合分析全球生态系统演替过程中土壤碳、氮动态变化结果相一致,说明土壤碳、氮含量在生态系统演替过程中具有同步性,这也解释了土壤碳、氮在封育时间上具有显著的相关性。然而,也有一些研究发现土壤 C:N 在演替中是可变的,例如张增可等^[22] 对海岛森林不同演替阶段土壤和植物碳、氮、磷化学计量特征的研究指出土壤 C:N 随演替进行呈增加趋势。造成这种差异的原因可能是不同生态系统所提供的养分含量和质量不同,与林地地上部分和根系分解可提供给土壤丰富养分相比,地上生物量和根系相对较低的草地向土壤中添加的 C 和 N 较少。研究进一步指出,有机体往往具有较稳定的 C:N 比例,即

使在植物枯枝落叶进入土壤后也存在紧密的 C-N 耦合^[23]。Zeng 等^[24] 对云雾山草原保护区的研究表明,在 30 a 的封育禁牧期间,凋落物 C:N 和根系 C:N 没有明显变化。因此,稳定的 C:N 可能与碳、氮含量紧密耦合的地上凋落物和植物根系相关。同时,稳定的 C:N 比也表明,放牧禁牧对该半干旱退化草地土壤 C,N 平衡影响不大。

3.2 土壤微生物量及其化学计量关系随封育年限变化规律

土壤微生物是土壤有机质和养分循环转化的动力,是土壤养分转化过程中一个重要的活性库或源,能够有效促进土壤养分有效性和其在陆地生态系统的循环^[25]。面对土壤碳、氮资源变化,微生物会通过调节自身生物量碳和氮以适应土壤资源的变异^[26]。本研究显示,围封后微生物量碳、氮含量与土壤碳、氮含量的变化趋势一致,均呈现先增加至 GE_{25} 达到最高后再下降趋势,但因其变化程度大小不同,引起微生物量 C:N 随封育时间的延长而显著下降,这一点与土壤 C:N 差异较大。本研究的相关性分析也显示,土壤 C:N 与微生物量 C:N 之间不存在显著相关关系。Xu 等^[27] 对陆地生态系统研究也未发现微生物 C:N 与土壤 C:N 具有相关关系,支持了本研究的结论。微生物量 C:N 产生这种变化的原因可能与微生物群落结构的改变有关,Mooshammer 等^[28] 通过整合分析微生物对其资源的适应机制后提出微生物可以通过调整群落结构以非稳态的方式使其生物量组成适应其资源。Nicolas 等^[29] 研究发现微生物量 C:N 与真菌:细菌的比值成正相关,表明随围封时间的延长,研究区真菌:细菌比值有所下降,亟待开展不同封育年限草地微生物群落特征研究。

3.3 化学计量不平衡性与微生物熵随封育年限变化规律

化学计量不平衡性值的高低可以表征资源质量水平和微生物的生长效率,化学计量不平衡性越高就表示资源质量越差,微生物的生长效率也就越低^[28]。本研究发现,长期封育(GE_{35})能够显著影响化学计量不平衡性,相较放牧地和其他封育年限的化学计量不平衡性,其值在 GE_{35} 显著增高,这是微生物调整其比例适应演替后期的结果,表明过长时间封育会降低资源质量水平及有效性。对于封育后的草地,其微生物的许多特性并不能完全由微生物量展现出来,因此,除分析其绝对量之外,微生物熵(即微生物量 C,N 分别与土壤 C,N 的比例)的变化能够较好地反映土壤中活性有机碳、氮所占的比例,从微生物学的角度揭示土壤肥力的差异。Zhou 等^[30] 发现 qMBC 会随土

壤 C : N 增加而减少,而本研究却发现与放牧地相比,围封处理对 qMBC 和 qMBN 无显著影响,这可能是封育后草地受外界条件干扰较少,微环境相对稳定所致。

4 结论

围封能够显著影响土壤有机碳和全氮的含量。随着封育年限的延长,其含量均呈现出先增加后下降的趋势,二者值都在 GE_{25} 时达到峰值。但封育对 C : N 影响却不大,草地在封育后的演替中,土壤有机碳和总氮之间有显著的相关性,二者具有同步性。

围封对土壤微生物量碳、氮及其化学计量特征也具有显著的影响,微生物量碳和氮对封育时间的响应与土壤有氮和有机碳对封育时间响应趋势相一致。封育后,微生物量 C : N 显著下降至 GE_{35} 最低。 GE_{10} , GE_{25} 与放牧地相比 qMBN 和化学计量不平衡性不显著,但 GE_{35} 样地此值却显著增加,qMBN 与微生物量 C 具有极显著的相关关系。qMBC 对围封时间无显著响应。

适当的围封时间(GE_{25})对于草地恢复具有积极作用,但围封时间过久(GE_{35})就会对草地恢复产生负面影响,造成资源浪费,因此退化草地在适当围封后应该解封放牧或适当刈去地表植物进行结构调整。

[参 考 文 献]

- [1] 赵凌平,白欣,谭世图,等.不同年限封育对黄土高原典型草原地上植被的影响[J].草业科学,2018,35(1):27-35.
- [2] 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.
- [3] 叶柳欣,库伟鹏,刘军,等.封育年限对毛竹林群落结构和林下植物多样性影响[J].生态学报,2020,40(3):921-930.
- [4] 李慧,钱金平,陈辉,等.围栏封育对红松洼自然保护区草原植物群落特征及多样性的影响[J].水土保持研究,2017,24(4):274-278,283.
- [5] 丁磊磊,王普昶,杨胜林,等.不同围封年限贵州中部暖性草丛草地的特征变化[J].贵州农业科学,2014,42(5):171-175.
- [6] 张帆,黄凤球,肖小平,等.冬季作物对稻田土壤微生物量碳、氮和微生物熵的短期影响[J].生态学报,2009,29(2):734-739.
- [7] 杨惠敏,王冬梅.草—环境系统植物碳氮磷生态化学计量学及其对环境因子的响应研究进展[J].草业学报,2011,20(2):244-252.
- [8] 罗由林,李启权,王昌全,等.川中丘陵区土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素[J].应用生态学报,2015,26(1):177-185.
- [9] 丁令智,满秀玲,肖瑞晗.大兴安岭北部主要树种生长季根际土壤氮素含量特征[J].中南林业科技大学学报,2019,39(2):65-71,92.
- [10] 耿暖,唐玉霞,王慧敏,等.烘箱加热法测定土壤有机质的研究[J].华北农学报,2017,32(S1):343-346.
- [11] 黎冬容,张世庆,甘世端,等.全自动凯氏定氮仪测定土壤全氮含量[J].南方国土资源,2015(8):38-39.
- [12] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [13] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1987,19(6):703-707.
- [14] 由政,张鹏,薛菱,等.退耕地植被演替过程对土壤化学计量特征的影响[J].草地学报,2017,25(3):657-661.
- [15] An H, Li G Q. Effects of grazing on carbon and nitrogen in plants and soils in a semiarid desert grassland, China [J]. Journal of Arid Land, 2015,7(3):341-349.
- [16] Su Y Z, Li Y L, Cui J Y, et al. Influences of continuous grazing and livestock exclusion on soil properties in a degraded sandy grassland, Inner Mongolia, Northern China [J]. Catena, 2005,59(3):267-278.
- [17] 周正虎,王传宽.生态系统演替过程中土壤与微生物碳氮磷化学计量关系的变化[J].植物生态学报,2016,40(12):1257-1266.
- [18] Xu Xia, Li Dejun, Cheng Xiaoli, et al. Carbon; nitrogen stoichiometry following afforestation: a global synthesis [J]. Scientific Reports, 2016,6(1):1-8.
- [19] Wardle D A, Peltzer D A. Linking Restoration and Ecological Succession [M]. New York: Springer, 2007.
- [20] Zhang Chao, Liu Guobin, Song Zilin, et al. Interactions of soil bacteria and fungi with plants during long-term grazing exclusion in semiarid grasslands [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018,124:47-58.
- [21] 吴昊,邹梦茹,王思芊,等.秦岭松栎林土壤生态化学计量特征及其对海拔梯度的响应[J].生态环境学报,2019,28(12):2323-2331.
- [22] 张增可,吴雅华,黄柳菁,等.海岛森林不同演替阶段土壤和植物的碳、氮、磷化学计量特征[J].西北植物学报,2019,39(5):925-934.
- [23] Mcgroddy M E, Daufresne T, Hedin L O. Scaling of C : N : P stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial Redfield-type ratios [J]. Ecology, 2004,85(9):2390-2401.
- [24] Zeng Quanchao, Liu Yang, Fang Ying, et al. Impact of vegetation restoration on plants and soil C : N : P stoichiometry on the Yunwu Mountain Reserve of China [J]. Ecological Engineering, 2017,109:92-100.

- 1-13.
- [2] 刘玉楨, 曹文侠, 王金兰, 等. 祁连山东段不同类型灌丛斑块土壤特征对围封的响应[J]. 草业学报, 2019, 28(11):32-45.
- [3] 梁士楚, 苑晓霞, 卢晓明, 等. 漓江水陆交错带土壤理化性质及其分布特征[J]. 生态学报, 2019, 39(8):2752-2761.
- [4] 谭学进, 穆兴民, 高鹏, 等. 黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39(2):713-722.
- [5] Hale R, Reich P, Daniel T, et al. Scales that matter: Guiding effective monitoring of soil properties in restored riparian zones[J]. *Geoderma*, 2014, 228/229:173-181.
- [6] 赵锦梅, 赵晶忠, 耿妍, 等. 祁连山东段不同高寒灌丛草地土壤性状特征变化[J]. 草地学报, 2014, 22(5):991-997.
- [7] 张德罡, 胡自治. 东祁连山杜鹃灌丛草地灌木种群分布格局研究[J]. 草地学报, 2003, 11(3):234-239.
- [8] 唐志红, 尉秋实, 刘虎俊, 等. 祁连山东段高寒植被群落特征及其与地形气候因子关系研究[J]. 生态学报, 2020, 40(1):223-232.
- [9] 马瑞, 赵锦梅. 东祁连山河谷高寒草地植被群落特征及其与土壤性状的关系[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2):374-381.
- [10] 姚喜喜, 宫旭胤, 白滨, 等. 祁连山高寒牧区不同类型草地植被特征与土壤养分及其相关性研究[J]. 草地学报, 2018, 26(2):371-379.
- [11] 曹文侠, 张德罡, 洪绂曾. 祁连山高寒灌丛草地杜鹃属植物的水分动态及生态适应[J]. 草地学报, 2006, 14(1):67-71.
- [12] 张桐. 六盘山林区四种植被类型对土壤物理性质的影响研究[J]. 山西水土保持科技, 2019(3):11-13, 20.
- [13] 文晶, 王一博, 高泽永, 等. 北麓河流域多年冻土区退化草甸的土壤水文特征分析[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4):929-937.
- [14] 彭舜磊, 由文辉, 沈会涛. 植被群落演替对土壤饱和和导水率的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11):78-84.
- [15] 王玮璐, 贺康宁, 张潭, 等. 青海高寒区水源涵养林土壤机械组成和理化性质对其饱和和导水率和持水能力的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2020, 29(2):69-77.
- [16] 文晶. 黑河中游扁都口地区高山草甸草地的土壤水文特征变化研究[D]. 甘肃 兰州:兰州大学, 2014.
- [17] 朱德雯. 川西高寒山地不同海拔梯度土壤水文特性与抗蚀性特征[D]. 四川 成都:四川农业大学, 2018.
- [18] 伍玉容, 王洁, 郭建英, 等. 黄土丘陵植被恢复区不同植被类型对土壤物理性质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(3):96-98.
- [19] 张昌顺, 范少辉, 官凤英, 等. 闽北毛竹林的土壤渗透性及其影响因子[J]. 林业科学, 2009, 45(1):36-42.
- [20] 王轶浩, 王彦辉, 谢双喜, 等. 六盘山分水岭沟土壤水文物理性质空间变异[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(4):33-40.
- [21] 朱万泽, 盛哲良, 舒树森. 川西亚高山次生林恢复过程中土壤物理性质及水源涵养效应[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6):205-212.
- [22] 胡健, 吕一河, 张琨, 等. 祁连山排露沟流域典型植被类型的水源涵养功能差异[J]. 生态学报, 2016, 36(11):3338-3349.
- [23] 徐明, 张健, 刘国彬, 等. 植被类型和降雨量对沟谷地土壤水分和温度空间分布的影响[J]. 草地学报, 2017, 25(3):499-507.
- [24] 赵锦梅, 王彦辉, 王紫, 等. 祁连山东段金强河河谷高寒草地土壤的水文特征[J]. 草业科学, 2020, 37(2):256-265.
- [25] 李民义. 晋西黄土区不同植被类型植物多样性及土壤水文物理特征研究[D]. 北京, 北京林业大学, 2013.
- [26] Blanco-Canqui H, Lal R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2004, 23(6):481-504.
- [27] 王意锟, 金爱武, 方升佐. 浙西南毛竹林覆盖对土壤渗透性及生物特征的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5):1431-1440.
- [28] 马海霞, 张德罡, 陈瑾, 等. 祁连山东段高寒草甸土壤持水能力在小尺度不同坡面位置的分异特征. 草业学报, 2020, 29(1):28-37.

(上接第 34 页)

- [25] 赛牙热木·哈力甫, 艾克拜尔·伊拉洪, 宋瑞清, 等. 察布查尔县草原土壤微生物量与土壤理化性质相关性研究[J]. 草业学报, 2017, 26(9):36-44.
- [26] 周正虎, 王传宽. 帽儿山地区不同土地利用方式下土壤—微生物—矿化碳氮化学计量特征[J]. 生态学报, 2017, 37(7):2428-2436.
- [27] Xu X F, Thornton P E, Post W M. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems [J]. *Global Ecology & Biogeography*, 2013, 22(6):737-749.
- [28] Mooshammer M, Wanek W, Zechmeister-Boltenstern S, et al. Stoichiometric imbalances between terrestrial decomposer communities and their resources: Mechanisms and implications of microbial adaptations to their resources [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2014, 5:22.
- [29] Nicolas F, Nathalie F, Bruno B, et al. An experimental test of the hypothesis of non-homeostatic consumer stoichiometry in a plant litter-microbe system [J]. *Ecology Letters*, 2013, 16(6):764-772.
- [30] Zhou Zhenhu, Wang C K. Soil resources and climate jointly drive variations in microbial biomass carbon and nitrogen in China's forest ecosystems [J]. *Biogeosciences Discussions*, 2015, 12(14):11191-11216.