

DOI:10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0629

徐晓凤,牛德奎,郭晓敏,邓邦良,周桂香,王书丽,朱丛飞,罗汉东.放牧对武功山草甸土壤微生物生物量及酶活性的影响.草业科学,2018,35(7):1634-1640.

Xu X F, Niu D K, Guo X M, Deng B L, Zhou G X, Wang S L, Zhu C F, Luo H D. Effects of grazing on soil microbial and enzyme activities in Wugong Mountain, China. Pratacultural Science, 2018, 35(7): 1634-1640.

放牧对武功山草甸土壤微生物 生物量及酶活性的影响

徐晓凤¹,牛德奎¹,郭晓敏¹,邓邦良¹,周桂香²,
王书丽¹,朱丛飞¹,罗汉东¹

(1.江西省森林培育重点实验室 江西农业大学林学院,江西 南昌 330045;

2.中国科学院南京土壤研究所,江苏 南京 210000)

摘要:以武功山山地草甸为研究对象,通过分析不同放牧强度对土壤微生物生物量碳氮以及酶活性的影响,旨在为退化草甸修复提供理论依据。结果表明:1)不同土壤微生物生物量碳氮含量表现为0-20 cm 土层>20-40 cm 土层,除20-40 cm 土层轻牧和中牧的土壤微生物生物量氮无显著差异外($P>0.05$),随放牧强度增加,土壤微生物生物量碳氮含量均显著降低($P<0.05$);2)可溶性碳氮含量在0-20 和 20-40 cm 土层间无显著差异($P>0.05$),均表现为在0-20 cm 土层轻牧显著大于中牧和重牧($P<0.05$);3)碱解氮和易氧化碳含量表现为在不同土层,轻牧和中牧含量均显著高于重牧($P<0.05$);4)土壤 β -葡萄糖苷酶、 β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和脲酶活性表现为在不同土层下,轻度和中牧均显著高于重牧($P<0.05$);5)相关性分析表明,不同放牧强度土壤 β -葡萄糖苷酶、 β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和脲酶活性与微生物生物量碳氮均呈显著性正相关($P<0.05$)或极显著正相关($P<0.01$)。

关键词:放牧强度;草甸退化;土壤养分;微生物生物量碳氮;脲酶; β -葡萄糖苷酶; β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶

中图分类号:S812.8;S812.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0629(2018)07-1634-07*

Effects of grazing on soil microbial and biomass enzyme activities in Wugong Mountain, China

Xu Xiao-feng¹, Niu De-kui¹, Guo Xiao-min¹, Deng Bang-liang¹, Zhou Gui-xiang²,
Wang Shu-li¹, Zhu Cong-fei¹, Luo Han-dong¹

(1.Jiangxi Provincial Key Laboratory of Forest Cultivation. College of Forestry

Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi, China;

2.Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 21000, Jiangsu, China)

Abstract: To understand the effects of different grazing intensities on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities in Wugong Mountain meadow, we conducted a study to provide a theoretical basis for the restoration of degraded meadow. The results showed that the contents of soil microbial biomass carbon and nitrogen in the 0-20 cm soil layer were higher than that in the 20-40 cm soil layer. In addition, with increased grazing intensity, the contents of microbial biomass carbon and nitrogen were decreased significantly ($P<0.05$); however, there was no significant difference in the contents of microbial biomass nitrogen ($P>0.05$) between light and moderate grazing in the 20-40 cm soil layer. The contents of dissolved organic carbon and

* 收稿日期:2017-11-14 接受日期:2018-03-16

基金项目:武功山山地草甸退化土壤生态特征时空变异与土壤碳汇相应机制研究(31360177)

第一作者:徐晓凤(1994-),女,安徽宿州人,在读硕士生,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:824716283@qq.com

通讯作者:牛德奎(1957-),男,江西南昌人,教授,博士,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:ndk2157@sina.com

nitrogen were not significantly different in the 0–20 and 20–40 cm soil layers ($P > 0.05$). The contents of dissolved organic carbon and nitrogen with light grazing were higher than those with moderate and high grazing treatments in the 0–20 cm soil layer ($P < 0.05$). The contents of alkaline nitrogen and readily oxidizable carbon with light grazing were significantly higher than contents with moderate and high grazing in the 0–20 and 20–40 cm soil layers ($P < 0.05$). Soil β -glucosidase, β -N-acetylglucosaminoglycan, and urease activity were significantly higher with light and moderate grazing than with high grazing in the 0–20 and 20–40 cm soil layers ($P < 0.05$). Correlation analysis showed that the activities of soil β -glucosidase, β -N-acetylglucosaminidase, and urease were positively correlated with microbial biomass carbon and nitrogen at all grazing intensities ($P < 0.05$ or $P < 0.01$).

Key words: grazing intensity; meadow degradation; soil nutrient; microbial biomass carbon and nitrogen; urease activity; β -glucosidase activity; β -N-acetylglucosaminidase activity

Corresponding author: Niu De-kui E-mail:ndk2157@sina.com

草地是陆地生态系统的重要组成部分^[1],是巨大的碳(C)、氮(N)库^[2]。放牧作为草地的一种土地利用方式,会改变草地的空间异质性、生态系统进程和土壤养分循环^[3],是导致生物多样性减少^[4-5]和植被覆盖率减少的主要驱动者^[6]。然而,过度放牧使草地退化现象日趋严重^[7-10],导致土壤 C、N 含量降低^[10],减少土壤有机碳的存储^[11],显著影响土壤物理、化学和微生物学特性^[10,12-14]。土壤微生物是土壤有机物质中最活跃且易变化的部分,微生物量的多少以及酶活性等对土壤 C、N、P 等循环至关重要^[15]。土壤微生物是土壤中的活性碳库,微生物的残体经分解可供植物吸收利用,酶活性是土壤肥力、土壤质量和土壤生产力的重要指示剂^[16-17],可以反映生物代谢功能强弱、凋落物的腐殖化速度以及微生物、植物对养分的间接利用效率^[18]。土壤酶主要来源于土壤中的微生物,其主要作用是参与物质的分解与转化,与土壤养分循环有密切关系。土壤 β -葡萄糖苷酶可以分解植物残体的纤维素和高级碳水化合物,影响土壤有机物质的形态结构^[14]。土壤 β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性可以把 C、N、P 等组成的土壤有机物质的化合物转化成供植物直接利用的有效态养分^[19]。土壤脲酶参与 N 素转化,能为植物提供吸收利用的有效态 N^[20]。江西武功山山地草甸是南方草地生态系统的重要组成部分,在华东地区具有代表性,然而当地农民常年偷牧,导致草甸受到不同程度的破坏。目前已有许多学者对在不同海拔、不同植被类型等条件下对武功山山地草甸土壤理化性质及微生物生物量碳分布进行了研究,然而对于不同放牧强度下,山地草甸区域土壤理化性质和微生物功能的研究鲜有报道。因此,本研究通过对武功山不同放牧强度的山地草甸进行理化性质和微生物的相关性研究,旨在为退化草甸修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

江西武功山(114° 10' – 114° 17' E, 27° 25' – 27° 35' N)属于亚热带季风湿润型气候。该地区气候温和,四季分明,年均降水量 1 350~1 570 mm,年平均气温 14~16 °C,夏季最高温度为 23 °C^[21]。本试验样地主要位于武功山九龙山自然保护区,海拔约 1 600 m,土壤为亚热带山地草地土,厚度约 40 cm,物种数目约 108 种,草甸优势种主要为野古草(*Arundinella anomala*)、芒草(*Miscanthus*),另外还有少量的十字花科(Brassicaceae)、唇形科(Labiatae)和蔷薇科(Rosaceae)植物^[21]。九龙山草甸区是典型的牧民偷牧区域,草地破坏严重,植被覆盖率低。

1.2 试验设计与样品采集

试验以牧民自由放牧利用草地为研究对象,采用随机区组设计,每个区组包含 3 个处理,分别为轻度放牧(植被覆盖率 > 80%)、中度放牧(植被覆盖率为 40%~80%)和重度放牧(植被覆盖率 < 40%),共 3 个区组。

2017 年 7 月,根据每个处理分别随机设置 1 m × 1 m 的样方,在样方内采用直径 5 cm 的土钻按照五点取样法采集 0–20 和 20–40 cm 土层的土壤。土壤混匀,装入保鲜袋,冷藏处理后,带回实验室。用镊子挑出根、石子及其他碎屑物,过 2 mm 孔径筛,装入自封袋放在 4 °C 冰箱里,用于测定土壤微生物生物量碳氮和酶活性。

1.3 试验方法

土壤微生物生物量碳、氮采用氯仿熏蒸浸提法^[22]测定,换算系数分别为 0.38、0.45。可溶性碳、氮使用 TOC(multi 3 100)仪器测定。脲酶采用靛酚比色法^[23]测定。碱解氮采用碱解扩散法^[22], β -葡萄糖苷酶

活性参考文献[24]的方法测定。 β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性参考文献[25]的方法测定。易氧化碳采用 $333 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 高锰酸钾氧化,分光光度计比色法[26]测定。

1.4 数据处理

采用双因素方差法分析不同土层和不同放牧强度对土壤微生物生物量碳氮和酶活性的影响,用 Duncan 法进行多重比较,对不同放牧强度下,酶活性与土壤微生物生物量、可溶性碳氮、碱解氮和易氧化碳进行相关性分析。采用 SPSS 20.0 软件进行数据统计分析,使用 Origin 8.1 制图。

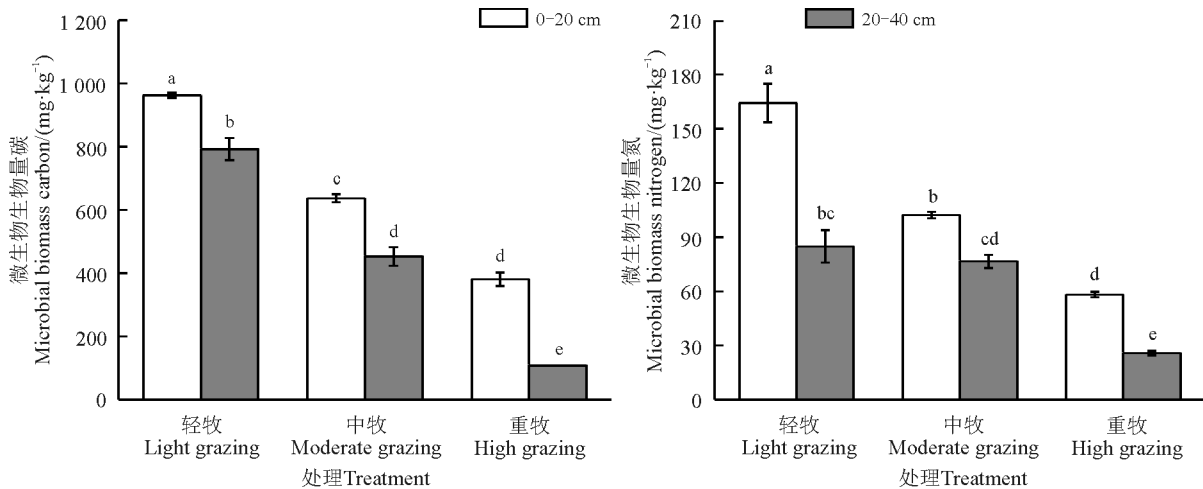


图1 放牧强度对土壤微生物生物量碳氮的影响

Fig. 1 Effect of different grazing intensity on soil microbial biomass carbon and nitrogen

不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments at the 0.05 level; similarly for the following figures.

2.2 不同放牧强度对可溶性碳氮的影响

不同放牧强度下 0—20 cm 土层可溶性碳含量表现为轻牧显著大于中牧和重牧($P < 0.05$), 20—40 cm 土层放牧强度间无显著差异($P > 0.05$)(图 2)。0—20 cm 土层可溶性氮含量轻牧显著高于中牧和重牧,中牧和重牧间无显著差异, 20—40 cm 土层重牧显著低于轻牧($P < 0.05$)。在 0—40 cm 土层,与轻牧相比较,中牧和重牧可溶性碳的均下降了 26%,可溶性氮分别下降了 18%和 30%。

2.3 不同放牧强度对碱解氮和易氧化碳的影响

重牧碱解氮含量显著低于轻牧和中牧($P < 0.05$),且轻牧和中牧间无显著差异($P > 0.05$),同一放牧强度下,0—20 和 20—40 cm 土层间无显著差异($P > 0.05$)(图 3)。重牧易氧化碳含量显著低于中牧和轻牧($P < 0.05$),且 0—20 cm 土层轻牧和中牧碱解氮含量无显著差异($P > 0.05$)。在 0—40 cm 土层,与

2 结果

2.1 不同放牧强度对土壤微生物生物量碳氮的影响

0—20 cm 土层土壤微生物生物量碳氮含量均显著高于 20—40 cm 土层($P < 0.05$)(图 1)。除 20—40 cm 土层轻牧和中牧的微生物生物量氮无显著差异($P > 0.05$)外,随放牧强度增加,微生物生物量碳氮含量显著降低($P < 0.05$)。较之轻牧,在 0—40 cm 土层,中牧和重牧微生物生物量碳下降幅度为 38%、72%,微生物生物量氮下降幅度为 28%、66%。

轻牧相比较,中牧和重牧碱解氮和易氧化碳分别下降了 10%、42%和 14%、51%。

2.4 不同放牧强度对土壤酶活性的影响

重牧土壤 β -葡萄糖苷酶和 β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性显著低于轻牧和中牧($P < 0.05$)(图 4)。20—40 cm 土层轻牧和中牧的 β -葡萄糖苷酶和 β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性显著低于 0—20 cm 土层($P < 0.05$)。同一土层下,重牧脲酶活性显著低于轻牧和中牧($P < 0.05$),且轻牧和中牧间无显著差异($P > 0.05$)。在 0—40 cm 土层,与轻牧相比,中牧和重牧 β -葡萄糖苷酶分别下降了 2%、73%, β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和脲酶分别下降了 23%、65%和 17%、55%。

2.5 不同放牧强度土壤酶活性与土壤微生物生物量碳氮及其他理化性质相关性分析

轻度放牧下,土壤 β -葡萄糖苷酶和 β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性与土壤微生物生物量碳氮、碱解氮和

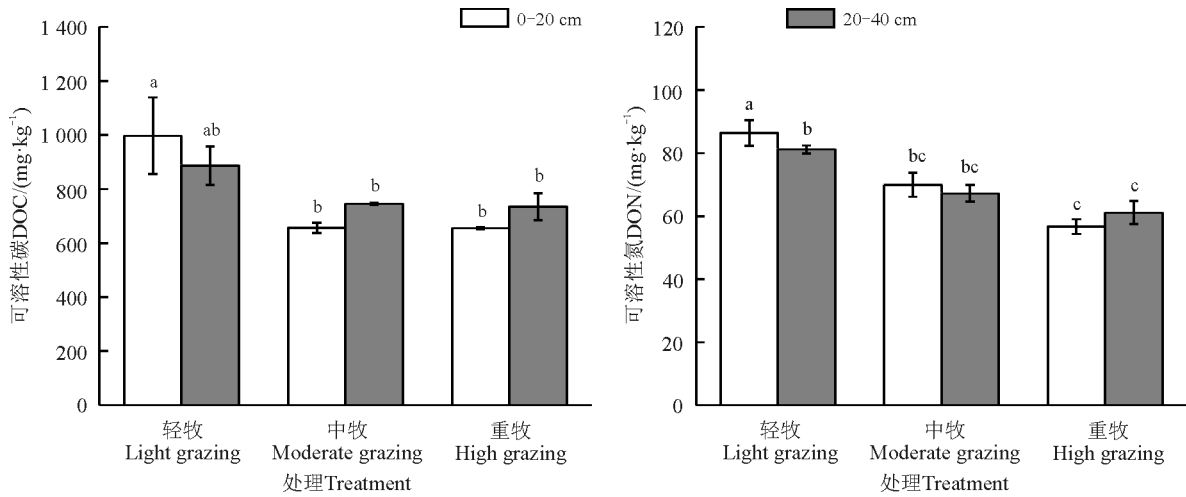


图 2 放牧强度对可溶性碳氮的影响

Fig. 2 Effect of grazing intensity on soluble carbon and nitrogen

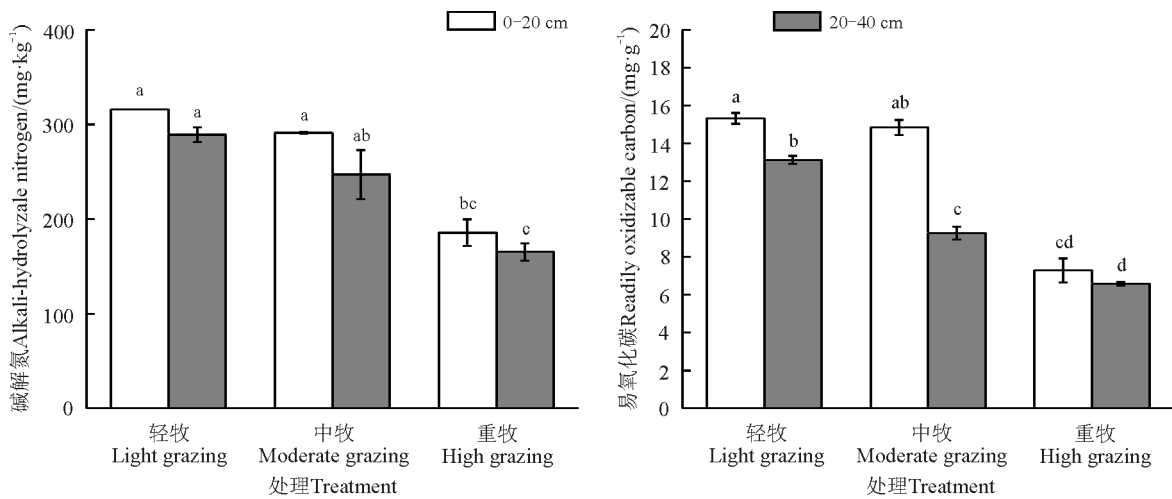


图 3 放牧强度对土壤碱解氮和易氧化碳的影响

Fig. 3 Effect of grazing intensity on soil alkali-hydrolyzable nitrogen and readily oxidizable carbon

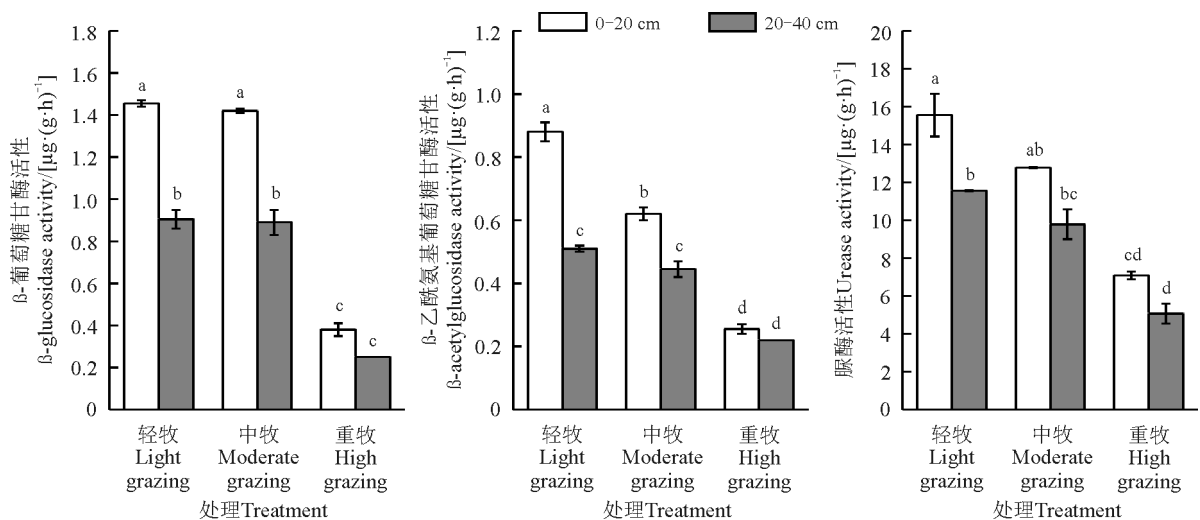


图 4 放牧强度对酶活性的影响

Fig. 4 Effect of grazing intensity on enzyme activity

表1 不同放牧强度土壤酶活性与土壤微生物生物量碳氮及其他理化性质的相关性分析
Table 1 Correlation analysis of soil enzyme activities and soil microbial biomass C and N and other soil physicochemical properties under different grazing intensities

放牧强度 Grazing intensity	指标 Indicator	MBC	MBN	DOC	DON	ROC	AN
轻度放牧 Light grazing	β -葡萄糖苷酶 β -glucosidase	0.981**	0.953*	0.517	0.709	0.989**	0.962*
	β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶 β -N-acetylglucosidase	0.935*	0.990**	0.516	0.728	0.984**	0.904*
	脲酶 urease	0.918*	0.832	0.123	0.353	0.841	0.866
中度放牧 Moderate grazing	β -葡萄糖苷酶 β -glucosidase	0.996**	0.992**	-0.924*	0.478	0.989**	0.659
	β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶 β -N-acetylglucosidase	0.968*	0.998**	-0.956*	0.352	0.992**	0.617
	脲酶 Urease	0.985**	0.984**	-0.874	0.532	0.960*	0.497
重度放牧 High grazing	β -葡萄糖苷酶 β -glucosidase	0.912*	0.926*	-0.73	-0.691	0.338	0.422
	β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶 β -N-acetylglucosidase	0.906*	0.887	-0.616	-0.272	0.929*	0.887
	脲酶 urease	0.909*	0.935*	-0.932*	-0.365	0.499	0.662

*, 显著性相关($P < 0.05$), **, 极显著相关($P < 0.01$); MBC, 微生物生物量碳; MBN, 微生物生物量氮; DOC, 可溶性碳; DON, 可溶性氮; ROC, 易氧化碳; AN, 碱解氮。

* and ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively; MBC, soil microbial biomass carbon; MBN, soil microbial biomass nitrogen; DOC, soluble carbon; DON, soluble nitrogen; ROC, readily oxidizable carbon; AN, alkali-hydrolyzable nitrogen.

易氧化碳均呈显著正相关($P < 0.05$)或极显著正相关($P < 0.01$), 脲酶与土壤微生物生物量碳呈显著性正相关($P < 0.05$) (表1)。中度放牧下, β -葡萄糖苷酶和 β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性与土壤微生物生物量碳氮和易氧化碳呈显著正相关($P < 0.05$)或极显著正相关($P < 0.01$), 与可溶性碳呈显著性负相关($P < 0.05$), 脲酶与土壤微生物生物量碳氮和易氧化碳呈显著正相关($P < 0.05$)或极显著正相关($P < 0.01$)。重度放牧下, β -葡萄糖苷酶与土壤微生物生物量碳氮呈显著正相关($P < 0.05$), β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶与土壤微生物生物量碳呈显著正相关($P < 0.05$), 脲酶与土壤微生物生物量碳氮呈显著正相关($P < 0.05$), 与可溶性碳呈显著负相关($P < 0.05$)。

3 讨论与结论

3.1 放牧强度增加降低土壤微生物生物量碳氮、可溶性碳氮、碱解氮、易氧化碳的含量

土壤有机物^[27]对微生物活动有明显的影 响, 根据 Talore 等^[11]和 Panayiotou 等^[14]的研究表明, 放牧强度的增加会导致土壤沙化, 有机物含量降低, 从而抑制微生物繁殖^[28], 且放牧导致土壤地上地下生物量减少, 会引起植物残体回馈给土壤的养分含量减少^[11], 使得微生物可利用的碳源减少, 而微生物可利

用的碳源主要来自植物残体以及凋落物, 进而导致微生物生物量碳氮随着放牧程度的增加呈下降趋势 (图1), 表层微生物生物量碳氮较深层多, 是因为表层土壤微生物比较活跃^[29], 根系分泌物一般能够促进微生物的生长, 但是由于牲畜长期对草地进行啃食, 导致地上地下生物量降低, 根系相对减少, 从而降低了微生物量^[29]。微生物量碳氮与可溶性碳氮对放牧强度的响应有一定相似性^[14], 但可溶性碳氮下降趋势小于微生物量碳氮 (图1, 图2), 这是因为微生物是土壤中活体有机碳, 微生物对环境变化非常敏感。土壤易氧化碳是土壤活性有机碳的组成部分, 其来源于植物残体、微生物残体以及根系分泌等, 地上地下生物量、土壤微生物生物量会随着放牧强度的增强而降低 (图1), 进而降低易氧化碳的含量 (图3)。碱解氮作为速效氮可在短时间内供植物吸收利用, 曹丽华等^[30]研究表明, 植被减少导致碱解氮含量降低, 而放牧导致植被破坏, 土壤裸露, 直接导致碱解氮含量降低 (图3), 同时长期的过度放牧带走了大量的氮素也会导致其含量降低。

3.2 放牧强度增加降低土壤酶活性

土壤酶活性主要来源于土壤微生物和植物的分泌, 与土壤生态系统功能具有直接的关系^[14], 连接土壤养分与植被, 参与土壤的养分循环^[31]。 β -葡萄糖甘

酶、 β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶和脲酶活性随着深度和放牧强度的增加显著减少(图 4),与 Mastrogianni 等^[32]和 Monokrousos 等^[33]的研究结果一致,这是因为酶活性与土壤微生物碳氮等指标有关(表 2)。首先随着放牧强度的增加,微生物可利用的碳源和氮源减少,降低了微生物活性(图 1),进而降低酶活性(图 4)。而深层土壤酶活性低于表层(图 4),是因为表层植物残体较多,碳氮含量高,且表层土壤通透性较好,有利于微生物呼吸和生长,从而使表层酶活性大于深层。其次易氧化碳和酶活性呈显著相关性(表 2),易氧化碳作为活体有机碳为微生物提供碳源,放牧强度增加

导致其含量降低(图 3),进而降低了酶活性(图 4)。在轻牧和中牧下, β -葡萄糖苷酶和 β -N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性无显著性变化,可能是因为在一定放牧范围内草地生态系统具有缓冲性。

综上所述,武功山九龙山放牧区随着放牧强度增加,土壤养分呈下降趋势,微生物碳氮和酶活性显著下降,土壤加剧贫瘠,水土流失严重。因此,相关部门要加强管理,禁止牧民偷牧,保护山地草甸生态系统。本文只研究了微生物生物量碳氮和酶活性与养分之间的关系,放牧强度到底是怎样通过对微生物群落结构的影响来影响养分的机制,还有待于进一步研究。

参考文献 References:

- [1] Saggarr S, Jha N, Deslippe J, Bolan N S, Luo J, Giltrap D L, Kim D G, Zaman M, Tillman R W. Denitrification and $N_2O:N_2$ production in temperate grasslands: Processes, measurements modelling and mitigating negative impacts. *Science of The Total Environment*, 2013, 465: 173-195.
- [2] 邓邦良. 增温和氮沉降对武功山修复草甸土壤碳氮过程的影响研究. 南昌: 江西农业大学硕士学位论文, 2016.
Deng B L. Effect of warming and nitrogen deposition on soil carbon and nitrogen in meadow restoration by Wugong Mountain. Master Thesis. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [3] Prieto L H, Bertiller M B, Carrera A L, Olivera N L. Soil enzyme and microbial activities in a grazing ecosystem of Patagonian Monte, Argentina. *Geoderma*, 2011, 162(3): 281-287.
- [4] Adler P, Raff D, Lauenroth W. The effect of grazing on the spatial heterogeneity of vegetation. *Oecologia*, 2001, 128(4): 465-479.
- [5] Chillo V, Ojeda R A, Anand M, Reynolds J F. A novel approach to assess livestock management effects on biodiversity of drylands. *Ecological Indicators*, 2015, 50: 69-78.
- [6] Xu M, Xie F, Wang K. Response of vegetation and soil carbon and nitrogen storage to grazing intensity in semi-arid grasslands in the agro-pastoral zone of northern China. *PloS One*, 2014, 9(5): 96604.
- [7] 邓邦良, 袁知洋, 郭晓敏. 武功山草甸土壤微量元素分布及对人为干扰的响应. *草业科学*, 2015, 32(10): 1555-1560.
Deng B L, Yuan Z Y, Guo X M. Distribution of trace elements in the soil of meadow in Wugong Mountain and its response to human disturbance. *Pratacultural Science*, 2015, 32(10): 1555-1560. (in Chinese)
- [8] Wei W, Chen L, Zhang H, Chen J. Effect of rainfall variation and land-scape change on runoff and sediment yield from a loess hilly catchment in China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(3): 1005-1016.
- [9] Deng L, Sweeney S, Shangguan Z P. Grassland responses to grazing disturbance: Plant diversity changes with grazing intensity in a desert steppe. *Grass and Forage Science*, 2014, 69(3): 524-533.
- [10] Zhu G, Deng L, Zhang X, Shangguan Z. Effects of grazing exclusion on plant community and soil physicochemical properties in a desert steppe on the Loess Plateau, China. *Ecological Engineering*, 2016, 90: 372-381.
- [11] Talore D G, Tesfamariam E H, Hassen A, Toit J C O D, Klumpp K, Soussana J F. Long-term impacts of season of grazing on soil carbon sequestration and selected soil properties in the arid Eastern Cape, South Africa. *Plant and Soil*, 2015, 397(1-2): 317-329.
- [12] Stephens S E, Walker J A, Blunck D R, Jayaraman A, Naugle D E, Ringelman J K, Smith A J. Predicting risk of habitat conversion in native temperate grasslands. *Conservation Biology*, 2008, 22(5): 1320-1330.
- [13] Chartier M P, Rostagno C M, Videla L S. Selective erosion of clay, organic carbon and total nitrogen in grazed semiarid rangelands of north eastern Patagonia, Argentina. *Journal of Arid Environments*, 2013, 88: 43-49.
- [14] Panayiotou E, Dimou M, Monokrousos N. The effects of grazing intensity on soil processes in a Mediterranean protected area. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(9): 441.
- [15] Liu N, Kan H, Yang G, Zhang Y. Changes in plant, soil, and microbes in a typical steppe from simulated grazing: Explaining potential change in soil C. *Ecological Monographs*, 2015, 85(2): 269-286.
- [16] Bandick A K, Dick R P. Field management effects on soil enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(11): 1471-1479.

- [17] Ge G, Li Z, Fan F, Chu G, Hou Z, Liang Y. Soil biological activity and their seasonal variations in response to long-term application of organic and inorganic fertilizers. *Plant and Soil*, 2010, 326: 31-44.
- [18] Garclagil J C, Plaza C, Solerrovira P, Polo A. Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(13): 1907-1913.
- [19] Zhou X, Zhang Y, Downing A. Non-linear response of microbial activity across a gradient of nitrogen addition to a soil from the Gurbantunggut Desert, northwestern China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 47: 67-77.
- [20] Craine J M, Ballantyne F, Peel M, Zambatis N, Morrow C, Stock W D. Grazing and landscape controls on nitrogen availability across 330 South African savanna sites. *Austral Ecology*, 2009, 34: 731-740.
- [21] 李志, 袁颖丹, 胡耀文, 孟文武, 张学玲, 郭晓敏, 张文元, 胡冬南, 牛德奎. 海拔及旅游干扰对武功山山地草甸土壤渗透性的影响. *生态学报*, 2018, 32(2): 634-645.
Li Z, Yuan Y D, Hu Y W, Meng W W, Zhang X L, Guo X M, Zhang W Y, Hu D N, Niu D K. Effects of altitude and tourism disturbance on soil permeability of mountainous meadow in Wugong Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 32(2): 634-645. (in Chinese)
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)
- [23] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 中国农业出版社, 1986.
Guan S Y. *Soil enzymes and the research methods*. Beijing: China Agriculture Press, 1986. (in Chinese)
- [24] Allison S D, Jastrow J D. Activities of extracellular enzymes in physically isolated fractions of restored grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(11): 3245-3256.
- [25] DeForest J L, Smemo K A, Burke D J, Elliott H L, Becker J C. Soil microbial responses to elevated phosphorus and pH in acidic temperate deciduous forests. *Biogeochemistry*, 2012, 109: 189-202.
- [26] 王国兵, 赵小龙, 王明慧, 阮宏华, 徐长柏, 徐亚明. 苏北沿海土地利用变化对土壤易氧化碳含量的影响. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 921-926.
Wang G B, Zhao X L, Wang M H, Ruan H H, Xu C B, Xu Y M. Effect of land use change on soil easy oxidation carbon content along North Jiangsu coast. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(4): 921-926. (in Chinese)
- [27] 刘振国, 李镇清, Ivan Nijs, Jan Bogaert. 糙隐子草种群在不同放牧强度下的小尺度空间格局. *草业学报*, 2005, 14(1): 11-17.
Liu Z G, Li Z Q, Nijs I, Bogaert J. Fine-scale spatial pattern of *Cleistogenes squarrosa* population under different grazing intensities. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, 14(1): 11-17. (in Chinese)
- [28] 马晓霞, 王莲莲, 黎青慧, 李花, 张树兰, 孙本华, 杨学云. 长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响. *生态学报*, 2012, 32(17): 5502-5511.
Ma X X, Wang L L, Li Q H, Li H, Zhang S L, Sun B H, Yang X X. Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities in maize growth stages. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(17): 5502-5511. (in Chinese)
- [29] 王向涛, 张世虎, 陈懂懂, 谈嫣蓉, 孙大帅, 杜国祯. 不同放牧强度下高寒草甸植被特征和土壤养分变化研究. *草地学报*, 2010, 18(4): 510-516.
Wang X T, Zhang S H, Chen D D, Tan Y R, Sun D S, Du G Z. Study on vegetation characteristics and soil nutrient variation of alpine meadow under different grazing intensities. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(4): 510-516. (in Chinese)
- [30] 曹丽华, 刘合满, 赵世伟. 当雄退化草甸土壤有机碳分布特征及其与土壤主要养分的关系. *中国农学通报*, 2011, 27(24): 69-73.
Cao L H, Liu H M, Zhao S W. Distribution characteristics of soil organic carbon and its relationship with soil nutrient in DaXiong degraded meadow. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 27(24): 69-73. (in Chinese)
- [31] 焦婷, 常根柱, 周学辉, 侯彦会, 杨红善, 苗小林, 刘荣堂. 温性荒漠化草原不同放牧强度下土壤酶与肥力的关系. *草地学报*, 2009, 17(5): 581-587.
Jiao T, Chang G Z, Zhou X H, Hou Y H, Yang H S, Miao X L, Liu R T. Relationship between soil enzyme and fertility under different grazing intensities of temperate desert grassland. *Acta Agrestia Sinica*, 2009, 17(5): 581-587. (in Chinese)
- [32] Mastrogianni A, Papatheodorou E M, Monokrousos N, Menkissoglu-Spiroudi U, Stamou G P. Reclamation of lignite mine areas with *Triticum aestivum*: The dynamics of soil functions and microbial communities. *Applied Soil Ecology*, 2014, 80: 51-59.
- [33] Monokrousos N, Boutsis G, Diamantopoulos J D. Development of soil chemical and biological properties in the initial stages of post-mining deposition sites. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(12): 9065-9074.

(执行编辑 苟燕妮)