

封育年限对伊犁绢蒿荒漠土壤微生物及酶活性的影响

孙宗玖^{1,2}, 李琦¹, 李培英^{1,2}, 江沙沙¹

(1. 新疆农业大学 草业与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆草地资源与生态重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: [目的] 揭示封育条件下土壤微生物及其土壤酶活性的适应机制, 为退化草地恢复提供科学依据。[方法] 采用蛇形布点法, 采集封育 0, 3 及 11 a 伊犁绢蒿荒漠 0—5, 5—10, 10—20 cm 土壤样品; 采用常规方法对土壤有机质、过氧化氢酶活性、脲酶活性及土壤微生物数量进行测定。[结果] 随封育年限增加, 0—5 cm 土层有机质含量呈增加趋势, 且封育 11 a 较对照显著提高 14.2%。土壤微生物组成中细菌数量最多, 占绝对优势, 放线菌次之, 真菌最少。0—5 cm 土层细菌、真菌数量随封育年限增加呈降低趋势, 放线菌数量呈增加趋势, 至封育 11 a 细菌、真菌较对照依次显著降低 (47.3%, 25.5%), 而放线菌则显著增加 (15.5%); 5—20 cm 土层细菌数量变化不显著, 而放线菌及真菌数量多呈增加趋势。封育对伊犁绢蒿荒漠 0—20 cm 土层过氧化氢酶活性影响不显著, 而 0—10 cm 土层脲酶活性随封育年限增加呈增加趋势, 10—20 cm 土层则呈降低趋势。[结论] 长期封育有利于土壤有机质的积累, 促进表层土壤放线菌数量及脲酶活性的增加。

关键词: 伊犁绢蒿荒漠; 土壤有机质; 土壤微生物; 酶活性; 封育

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)03-0014-05

中图分类号: S812.2

文献参数: 孙宗玖, 李琦, 李培英, 等. 封育年限对伊犁绢蒿荒漠土壤微生物及酶活性的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3):14-18. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.003. Sun Zongjiu, Li Qi, Li Peiying, et al. Effects of grazing enclosure years on soil microorganism and enzyme activities in *Seriphidium transiliense* Desert[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3):14-18.

Effects of Grazing Exclusion Years on Soil Microorganism and Enzyme Activities in *Seriphidium Transiliense* Desert

SUN Zongjiu^{1,2}, LI Qi¹, LI Peiying^{1,2}, JIANG Shasha¹

(1. Department of Grassland and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: [Objective] To explore the adaptive mechanisms of soil microorganism and soil enzyme activity under grazing enclosure conditions in order to provide scientific basis for the recovery of degraded pasture. [Methods] Soil samples were collected from different soil layers (0—5 cm, 5—10 cm and 10—20 cm) in *Seriphidium transiliense* desert under different enclosure years (0 a, 3 a and 11 a) by zigzag sampling method. Then, the soil organic matter, catalase and urease activities, and the amount of soil microorganisms were measured by the conventional methods. [Results] The organic matter content in 0—10 cm soil layer increased with the increasing enclosure years, and the soil organic matter content of 11-year enclosure was 14.2% higher than that of the control. In the composition of microorganism, the largest amount was bacteria, followed by actinomycetes, and fungi was the least. The amount of bacteria and actinomycetes in 0—5 cm soil layer decreased and the amount of fungi increased with the increase of enclosure years, and compared with the control, the amount of bacteria and fungi of 11-year enclosure were decreased by 47.3% and 25.5%, respectively, while the amount of actinomycetes increased by 15.5% ($p < 0.05$). There was no significant difference in the amount of bacteria in the 5—20 cm soil layer among different enclosure years, but

收稿日期: 2017-10-29

修回日期: 2017-11-21

资助项目: 国家自然科学基金资助项目“不同退化蒿类荒漠土壤有机碳组及其碳氮特征对禁牧的响应(31260574)”, “新疆蒿类荒漠土壤种子库萌发及其幼苗定居对增温增雨的适应策略(31760694)”

第一作者: 孙宗玖(1975—), 男(汉族), 内蒙古自治区敖汉旗人, 博士, 教授, 主要从事草地培育、放牧管理及草种资源评价的研究。E-mail: nmszj@21.cn.com.

the amount of fungi and actinomycetes increased with the increase of enclosure years. There was no significant difference on catalase activity in 0—20 cm soil layer among different enclosure years in *S. transiliense* desert. The urease activity in 0—10 cm soil layer increased with the increase of enclosure years, and that was decreased in 10—20 cm soil layer. [Conclusion] The long time enclosure is beneficial to the accumulation of soil organic matter, and can improve the amount of actinomycetes and urease activity in the topsoil.

Keywords: *Seriphidium transiliense* desert; soil organic carbon; soil microorganism; enzymatic activity; grazing enclosure

新疆地处亚欧大陆腹地中温带干旱荒漠区,可利用天然草地面积 $4.80 \times 10^7 \text{ hm}^2$,划分为 11 个草地类,其中荒漠草地是其重要组成部分,面积约为 $2.69 \times 10^7 \text{ hm}^2$,生产中多作为春秋场或冬场利用,在季节牧场轮换利用中具有重要的地位^[1]。以伊犁绢蒿(*Seriphidium transiliense*)为建群种的荒漠是新疆荒漠草地的典型代表,面积约为 $1.14 \times 10^6 \text{ hm}^2$,广泛分布于新疆天山北麓山前洪积扇和低山丘陵区^[2]。由于所处生态环境脆弱、放牧压力大等原因,伊犁绢蒿荒漠退化现象十分普遍,并成为新疆草地退化的重灾区,对草地生物多样性的保护、畜牧业生产和绿洲生态安全造成了严重威胁,因此恢复与治理退化的伊犁绢蒿荒漠已成为当前亟待解决的首要问题之一。

围栏封育已成为新疆退化草地恢复的重要举措,可使退化的草地的植被、土壤得到一定程度的改善^[3]。目前,围绕封育过程中退化伊犁绢蒿荒漠恢复效果已开展了大量研究^[2,4-6],主要集中在草地植被群落特征及其多样性、土壤常规养分及土壤碳组特征等方面的对比分析,相对而言对其土壤微生物组成数量特征及土壤酶活性的探讨较少。土壤微生物和土壤酶是衔接土壤有机物—无机物—生物相互作用的重要参与者与推动者,在土壤有机物分解、腐殖质的形成、养分转化等环节中具有重要作用^[7-8],因此研究封育过程中土壤微生物和土壤酶的响应机制对深入了解退化草地土壤质量的恢复具有重要指导意义。基于以上认识,本文拟以轻度退化的伊犁绢蒿荒漠为对象,通过对不同封育年限下草地土壤有机质、土壤微生物数量及土壤酶活性的测定,探讨其对封育年限的响应规律,以期为退化蒿类荒漠草地的改良、复壮以及生态系统的恢复提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市米东区芦草沟乡的博格达山北坡低山带($87^{\circ}47'—87^{\circ}46'E$, $43^{\circ}53'—43^{\circ}49'N$),海拔 840~1 110 m。试验区为典型温带大陆气候,四季明显,冬季寒冷漫长,年均温 6.4°C ;年降水量约为 236 mm,四季分配不均,春季

占全年降水量的 30%。土壤类型为灰漠土,土层较厚。该草地主要优势植物有伊犁绢蒿(*S. transiliense*)、木地肤(*Kochia prostrata*)、叉毛蓬(*Petrosimonia sibirica*)、角果藜(*Ceratocarpus arenarius*)等,每年春(3月中旬至6月中旬)、秋(9月上旬至11月中旬)两季放牧利用,且地表有一定程度的裸露,总体处于轻度退化状态。

1.2 样地选择

试验设置 2 个封育处理,即封育 3 a 和 11 a,分别在 2013,2005 年采用网围栏进行封育,面积均为 2 000 m^2 ,且封育区内全年禁止放牧利用。封育区基本相连(小于 10 m),且土壤状况、地形地貌、降水、温度等生态因子基本保持一致;同时封育区外围设为对照区(CK),为传统的自由放牧区,放牧畜种多为新疆细毛羊。

1.3 土壤样品采集

2016 年 5 月,每个围栏样地沿坡向平均分为 3 个条带区,每个条带区内沿对角线采用蛇形取样(Z 字型),每隔 10 m 设置 1 个土样取样点,共 5 处。每处用直径为 7 cm 的土钻,按土层深度 0—5,5—10,10—20 cm 分层钻取 2 钻,同层混匀形成混合样,放入做好标签的自封袋冷藏带回室内。对照区则在封育区附近随机设置样地 3 处,按相同方法获取土样。室内,剔除植物根系、石砾等杂物后,将混合样分成 2 部分,1 部分放置 4°C 冰箱贮存,用于土壤微生物数量的测定,另 1 部分置于室内自然风干,磨碎,过 0.25,1,2 mm 筛后保存,用于土壤有机质及酶活性的测定。

1.4 测定方法

土壤有机质采用重铬酸钾外加热法^[9]。过氧化氢酶活性测定采用高锰酸钾滴定法,脲酶活性测定采用苯酚钠比色法^[10]。土壤微生物数量测定采用稀释平板法,细菌用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基,真菌用马丁氏孟加拉红琼脂培养基,放线菌用淀粉铵盐琼脂培养基培养法^[11]。

1.5 数据分析

利用 SPSS 17.0 数据统计软件的 one-way

ANOVA 及 Duncan 法进行相关数据的统计分析,结果以“均值±标准误”的形式表示;利用 Microsoft Excel 2013 进行相关表格的制作。

2 结果与分析

2.1 封育对土壤有机质的影响

表 1 看出,随封育年限增加,0—5 cm 土层有机质含量呈上升趋势,5—10 cm,10—20 cm 土层则呈先降后升趋势,封育 3 a 最低。与对照比,封育 3 a 和 11 a 的 0—5 cm 土层有机质含量分别增加 7.7%,14.2% ($p < 0.05$),而封育 3 与 11 a 间差异不显著;5—10 cm 土层封育 3 a 有机质含量下降了 6.6% ($p > 0.05$),至封育 11 a 则时增加 15.4% ($p < 0.05$);10—20 cm 土层有机质增降不明显。随土层深度增加(表 1),0—20 cm 土层有机质含量呈逐渐下降趋势,且 0—5 cm 土层显著高于 5—20 cm 土层,且至封育 11 a 时,5—10 cm 土层有机质才显著高于 10—20 cm 土层 ($p < 0.05$)。

表 1 封育年限对伊犁绢蒿荒漠土壤有机质的影响 g/kg

土层深度/cm	对照	封育 3 a	封育 11 a
0—5	34.26±0.48 ^{Ab}	36.89±0.76 ^{Aa}	39.11±1.88 ^{Aa}
5—10	24.65±1.60 ^{Bab}	23.03±1.17 ^{Bb}	28.44±1.10 ^{Ba}
10—20	22.46±1.81 ^{Ba}	20.94±0.62 ^{Ba}	23.21±3.53 ^{Ca}

注:同一列不同大写字母表示 $p = 0.05$ 水平差异,同一行不同小写字母表示 $p = 0.05$ 水平差异。下同。

2.2 封育对土壤微生物数量的影响

表 2 看出,随封育年限的增加,伊犁绢蒿荒漠 0—20 cm 土层微生物总数量均呈降低趋势,但各封育处理间差异不显著,且无论封育与否,土壤微生物数量构成上均以细菌最高,放线菌次之,真菌最低,如封育 3 a 样地,0—5 cm 土层中细菌、放线菌依次占其微生物总数的 85.1%,14.7%,而真菌仅为 0.02%。进一步对土层中不同微生物种类组成的分析发现(表 2),封育年限对不同土层的细菌、放线菌、真菌数量的影响并不一致,需要区别对待。0—5 cm 土层,随封育年限的增加,细菌、真菌数量呈降低趋势,放线菌数量呈增加趋势,且至封育 11 a 细菌、真菌较对照依次显著降低 47.3%,25.5%,而放线菌则显著增加 15.5% ($p < 0.05$);5—10 cm 土层,放线菌数量封育 3 a 显著高于对照和封育 11 a,而真菌数量则对照、封育 3 a 显著高于封育 11 a ($p < 0.05$),但封育对细菌数量影响不显著;10—20 cm 土层,放线菌、真菌数量随封育年限增加呈增加趋势,封育 3,11 a 间差异不显著,且均显著高于对照 ($p < 0.05$),而封育对细菌数量影响仍不显著 ($p > 0.05$)。随土层深度的增加(表 2),封育 3 a 及 11 a 的 5—10,10—20 cm 土层细菌、放线菌、真菌数量及其微生物总量均显著高于 0—5 cm 土层,而 5—10,10—20 cm 土层间差异不显著;对照区 5—10 cm 土层放线菌、真菌数量则显著高于 0—5,10—20 cm 土层 ($p < 0.05$),而细菌及微生物总数则各土层间差异不显著 ($p > 0.05$)。

表 2 封育年限对伊犁绢蒿荒漠土壤微生物数量的影响

微生物类群	土层深度/cm	对照	封育 3 a	封育 11 a
细菌/ (10^5 CFU · g ⁻¹)	0—5	9.024±2.33 ^{Aa}	5.129±0.49 ^{Bab}	4.756±0.13 ^{Bb}
	5—10	10.180±1.27 ^{Aa}	9.512±0.47 ^{Aa}	8.610±0.79 ^{Aa}
	10—20	8.817±0.24 ^{Aa}	8.217±0.81 ^{Aa}	7.489±0.57 ^{Aa}
放线菌/ (10^5 CFU · g ⁻¹)	0—5	1.560±0.02 ^{Cb}	1.787±0.01 ^{Ba}	1.802±0.03 ^{Ba}
	5—10	1.968±0.03 ^{Ab}	2.438±0.11 ^{Aa}	2.073±0.07 ^{Ab}
	10—20	1.807±0.05 ^{Bb}	2.276±0.04 ^{Aa}	2.261±0.09 ^{Aa}
真菌/ (10^3 CFU · g ⁻¹)	0—5	1.860±0.07 ^{Ba}	1.279±0.08 ^{Eb}	1.385±0.02 ^{Cb}
	5—10	2.154±0.08 ^{Aa}	2.109±0.03 ^{Aa}	1.858±0.04 ^{Bb}
	10—20	1.189±0.05 ^{Cb}	1.794±0.16 ^{Aa}	1.979±0.03 ^{Aa}
微生物整体/ (10^5 CFU · g ⁻¹)	0—5	10.603±2.34 ^{Aa}	6.929±0.50 ^{Ba}	6.572±0.15 ^{Ba}
	5—10	12.170±1.26 ^{Aa}	11.971±0.55 ^{Aa}	10.702±0.81 ^{Aa}
	10—20	10.637±0.24 ^{Aa}	10.512±0.85 ^{Aa}	9.770±0.58 ^{Aa}

2.3 封育对土壤酶活性的影响

表 3 看出,随封育年限增加,0—20 cm 土层过氧化氢酶活性呈下降趋势,但仅封育 11 a 的 10—20 cm 土层过氧化氢酶活性较对照显著降低,降幅为 26.1%

($p < 0.05$),而封育 3 a 处理则介于两者之间;0—10 cm 土层脲酶活性呈增加趋势,且封育 11 a 较对照显著增加 15.9%~41.5%,而 10—20 cm 土层脲酶活性呈现降低,且封育 11 a 较对照显著降低 39.7%。随

土层深度增加,过氧化氢酶活性呈上升趋势,且 10—20 cm 土层高于 0—5 cm 土层 ($p < 0.05$),而封育后脲酶活性则呈现降低,且 10—20 cm 土层基本低于 0—5 cm 土层 ($p < 0.05$)。

表3 封育年限对伊犁绢蒿荒漠土壤酶活性的影响

土壤酶类	土层深度/cm	对照	封育 3 a	封育 11 a
过氧化氢酶/ [ml · g ⁻¹ · (20 min) ⁻¹]	0—5	0.92 ± 0.07 ^{Ba}	0.76 ± 0.04 ^{Ba}	0.77 ± 0.05 ^{Ba}
	5—10	1.10 ± 0.09 ^{Ba}	0.98 ± 0.15 ^{ABa}	0.77 ± 0.08 ^{Ba}
	10—20	1.34 ± 0.15 ^{Aa}	1.10 ± 0.08 ^{Ab}	0.99 ± 0.06 ^{Ab}
脲酶/ [mg · g ⁻¹ · (24 h) ⁻¹]	0—5	22.19 ± 0.90 ^{Ab}	24.30 ± 0.57 ^{Ab}	25.72 ± 0.74 ^{Aa}
	5—10	16.98 ± 0.97 ^{Bb}	18.90 ± 1.20 ^{Bb}	24.02 ± 1.17 ^{Aa}
	10—20	23.65 ± 0.69 ^{Aa}	16.39 ± 0.67 ^{Bb}	14.27 ± 1.03 ^{Bb}

3 讨论

退化草地封育后可显著提高草地植物群落的高度、盖度,并在封育 5~10 a 后达到最高,但土壤质量恢复较为缓慢,短期内变化不明显,只有经过长时间封育才会得以显著恢复,且其恢复效果与封育区域所处环境及封育前草地的本底直接相关^[12]。Hu 等^[13]整合分析了中国 326 个封育样地的监测数据,认为封育后 92% 的退化草地土壤有机碳出现增加,8% 土壤有机碳出现降低或变化不明显。如李丽君等^[14]指出,草地封育 26 a 后天山中部高寒草甸、高寒草甸、高寒草原表层土壤有机碳分别提高 11.37%, 3.26% 和 2.21%,但仅在高寒草甸出现显著增加,而杨新国等^[15]认为,短期封育条件下荒漠草原沙化灰钙土有机碳含量变化不显著。本研究结果表明,退化草地不同土层有机质对封育的恢复响应存在一定的差异。与对照比,退化伊犁绢蒿荒漠封育 3 a 后 0—5 cm 土层有机质呈现显著增加,而 5—10 cm 土层则出现不明显降低,且封育 3 a 样地的有机质显著低于封育 11 a 样地,但 10—20 cm 土层则至封育 11 a 土壤有机质仍增加不显著。初步说明退化草地土壤有机质的恢复可能按照先表层后深层的顺序逐步有序恢复,且长期封育均利于土壤有机质的积累。同时本研究结果也与杨合龙等对轻度退化蒿类荒漠^[16]、董乙强等^[5]对中度退化蒿类荒漠及杨静等^[17]对重度退化的沙质荒漠的研究结果“封育早期(1~4 a)草地土壤有机质含量均会出现不同程度的降低,后期才逐渐增加”基本吻合,说明退化荒漠草地植被初期恢复过程中地上植被的快速复壮,净生产力增加过多,可能会导致植物对土壤养分的吸收量远远高于其返还量,同时干旱环境下返还的凋落物并不能及时分解所致,封育后期土壤有机质的提高可能通过逐年地上植被净生产力(凋落物、死的根系)的积累,及外界小环境尤其是土壤水分条件的改善加速了土壤有机质输入所

致,同时也与封育后截留了放牧条件下家畜将植物碳向系统外的输出有关。

土壤微生物是土壤养分循环和转化过程中的重要组成部分,影响着植物对养分的吸收与利用^[18]。目前,有关草地土壤微生物的研究已有较多研究,多集中在微生物种类组成及其数量特征方面^[19-22],但研究结果存在一定争议。如姚拓等^[19]、柴晓红等^[22]分别对天祝高寒草地、夏河县桑科高寒草地土壤微生物数量的研究均表明,细菌最多,放线菌次之,真菌最少,且封育地大于放牧地。郭继勋等^[21]认为吉林省长岭县羊草草原上羊草群落、杂类草群落、碱茅群落、碱蓬群落的土壤微生物均以放线菌数量最多,而榆树疏林群落以真菌数量最多,但赵吉等^[23]则认为锡林河流域羊草草原土壤微生物数量以细菌最多,放线菌次之。本研究结果表明,无论封育与否,伊犁绢蒿荒漠土壤微生物数量以细菌最多,放线菌次之,真菌最少,这与前人的研究结果相一致^[19,22-23],同时也验证了范燕敏等^[20]认为,退化伊犁绢蒿荒漠土壤微生物数量以细菌为主的研究结果,但与郭继勋等^[21]研究结果不一致。可能是由于研究区所处生境条件及植被群落类型的差异导致其生土壤理化性质的差异所致,伊犁绢蒿荒漠气温相对较高,而生境土壤 pH 值为微碱性(8.5~8.7),均有利于细菌及放线菌的生长繁育。伊犁绢蒿荒漠 0—20 cm 土层微生物总量虽然随封育年限增加呈不显著性降低,但封育显著影响了细菌、放线菌及真菌的数量组成比例。如封育 11 a 0—5 cm 土层细菌、真菌较对照显著降低 25.5%~47.3%,而放线菌却显著增加 15.5%;5—20 cm 土层封育对细菌数量影响不显著,而对真菌、放线菌数量影响显著。这可能与土层温度变化密切相关,封育后伊犁绢蒿荒漠植被盖度增加,表层土壤温度出现一定程度的降低,而真菌、细菌及放线菌生长繁育所需最适温度并不一致,导致其种群消长存在较大差异所致。高寒草原的研究表明^[19],封育后细菌、放线菌及

真菌数量均出现不同程度的增加,这与本研究结果存在一定差异,可能与其研究区域所处生境条件及土壤有机质含量的高低相关。从土层垂直变化看,无论封育与否,5—10 cm 土层细菌、放线菌、真菌数量及其微生物总量均显著高于 0—5 cm 土层,可能是表层土温相对较高,土壤含水量少,抑制了微生物正常生长发育所致。

土壤酶是土壤的组成部分,可作为生物催化剂,在土壤物质循环和能量转化过程中起着重要作用。一般认为,土壤酶在很大程度上起源于土壤微生物,也可能来源于植物和土壤动物^[24]。与对照比,封育后伊犁绢蒿荒漠 0—20 cm 土层过氧化氢酶活性呈下降趋势,且仅封育 11 a 的 10—20 cm 土层呈现显著降低,而 0—10 cm 土层脲酶活性呈现增加,封育 11 a 增加显著。其原因可能是:①封育后引起土壤理化性质的变化,如土壤温度、水分、pH 值等,导致土壤微生物数量及种类的变化,进而引起其分泌酶类的差异。②封育后伊犁绢蒿草地组成植物种类成分、结构和生物量变化引起其向土壤输入的凋落物及植物残体的化学计量学特征发生变化,导致土壤酶的种类及活性可能也会产生差异。

4 结论

长期封育有利于退化伊犁绢蒿荒漠土壤有机质的积累,且封育后 0—5 cm 土层有机质的增加速率高于 5—20 cm 土层,封育 3 a 的 0—5 cm 土层有机质含量就呈现显著增加。

伊犁绢蒿荒漠土壤微生物数量以细菌最多,放线菌次之,真菌最少,且封育对 3 种微生物数量的影响并不一致。随封育年限的增加,0—5 cm 土层细菌、真菌数量呈降低趋势,放线菌数量呈增加趋势,5—20 cm 土层细菌数量变化不显著,而放线菌及真菌数量多呈增加趋势。从整体看,封育对土壤细菌、放线菌、真菌的总体数量影响不显著。

封育对伊犁绢蒿 0—20 cm 土层过氧化氢酶活性影响不显著,而 0—10 cm 土层脲酶活性随封育年限增加呈增加趋势,10—20 cm 土层则呈降低趋势。

[参 考 文 献]

[1] 许鹏. 新疆草地资源及其利用[M]. 乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社,1993.

[2] 朱进忠,靳瑰丽,孙宗玖,等. 伊犁绢蒿荒漠草地退化生态系统研究[M]. 北京:中国农业出版社,2013.

[3] 吴彤,汪海霞,方江平. 2004—2013 年我国有关围栏封育研究文献分析[J]. 黑龙江畜牧兽医,2015(5):123-125.

[4] 杨合龙,孙宗玖,陈玉萍. 封育年限对伊犁绢蒿荒漠群落特

征及草场质量的影响[J]. 草地学报,2015,23(2):252-257.

[5] 董乙强,孙宗玖,安沙舟,等. 禁牧对中度退化伊犁绢蒿荒漠草地土壤养分的影响[J]. 草业科学,2016,33(8):1460-1468.

[6] 杨静,孙宗玖,杨合龙,等. 封育年限对蒿类荒漠土壤有机碳组分及其碳、氮特征的影响[J]. 草业科学,2016,33(4):564-572.

[7] Clark F E, Pawl E A. The microflora of grassland [J]. *Advance in Agronomy*, 1970,22:375-435.

[8] 邵玉琴,敖晓兰,宋国宝,等. 皇甫川流域退化草地和恢复草地土壤微生物生物量的研究[J]. 生态学杂志,2005,24(5):578-580.

[9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2005.

[10] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986.

[11] 李振高. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京:科学出版社,2008.

[12] 汪海霞,吴彤,禄树晖. 我国围栏封育的研究进展[J]. 黑龙江畜牧兽医,2016(9):89-92.

[13] Hu Zhongmin, Li Shengong, Guo Qun, et al. A synthesis of the effect of grazing exclusion on carbon dynamics in grasslands in China [J]. *Global Change Biology*, 2016,22(4):1385-1393.

[14] 李丽君,朱新萍,贾宏涛,等. 长期围栏封育对天山中部草地土壤有机碳及微生物量碳的影响[J]. 农业环境科学学报,2012,31(8):1554-1559.

[15] 杨新国,宋乃平,李学斌,等. 短期围栏封育对荒漠草原沙化灰钙土有机碳组分及物理稳定性的影响[J]. 应用生态学报,2012,23(12):3325-3330.

[16] 杨合龙,孙宗玖,管光玉,等. 封育对伊犁绢蒿荒漠草地土壤养分的影响[J]. 中国草地学报,2015,37(2):107-111.

[17] 杨静. 封育对沙质荒漠草地植被及土壤有机碳氮组分特征的影响[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2017.

[18] 闫钟清,齐玉春,李素俭,等. 降水和氮沉降增加对草地土壤微生物与酶活性的影响研究进展[J]. 微生物学通报,2017,44(6):1481-1490.

[19] 姚拓,龙瑞军. 天祝高寒草地不同扰动生境土壤三大类微生物数量动态研究[J]. 草业学报,2006,15(2):93-99.

[20] 范燕敏,朱进忠,武红旗,等. 伊犁绢蒿荒漠退草地土壤微生物和酶活性的研究[J]. 新疆农业科学,2009,46(6):1288-1293.

[21] 郭继勋,祝廷成. 羊草草原土壤微生物的数量和生物量[J]. 生态学报,1997,17(1):78-82.

[22] 柴晓虹,姚拓,王理德,等. 围栏封育对高寒草地土壤微生物特性的影响[J]. 草原与草坪,2014,34(5):26-31.

[23] 赵吉,廖仰南,张桂枝,等. 草原生态系统的土壤微生物生态[J]. 中国草地,1999(3):57-67.

[24] 向泽宇,王长庭,宋文彪,等. 草地生态系统土壤酶活性研究进展[J]. 草业科学,2011,28(10):1801-1806.