

不同利用方式下草地土壤微生物及土壤呼吸特性

郭明英¹, 朝克图¹, 尤金成¹, 徐丽君², 王丽娟¹, 贾淑杰¹, 辛晓平^{2*}

(1. 呼伦贝尔市草原工作站, 内蒙古 呼伦贝尔 021000; 2. 农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室
呼伦贝尔国家野外站 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要:通过对呼伦贝尔羊草(*Leymus chinensis*)草甸草原土壤呼吸特性及土壤微生物的测定,研究了3种不同利用方式(围封、放牧和刈割)对天然草地土壤呼吸特性及土壤微生物的影响,为草甸草原土壤呼吸研究提供基础理论依据。结果表明:不同利用方式下土壤呼吸速率、土壤微生物量碳含量与土壤酶活性(除脲酶)均表现为草地围封比放牧和刈割呼吸速率高(含量高、活性强);土壤微生物量氮含量、脲酶活性和微生物数量表现为草地放牧和刈割比围封的含量高(活性强、数量多);土壤微生物量碳、氮含量、土壤酶活性(除脲酶)和土壤微生物数量均以表层(0~10 cm)最高(活性最强、数量最多),随着土层深度增加而降低(活性下降、数量减少)。土壤呼吸速率与微生物量碳、土壤酶活性(除过氧化氢酶)成正相关,与微生物量氮、过氧化氢酶和微生物数量成负相关,其中只与微生物量氮相关性显著,而其余之间均不显著。

关键词:草地利用方式;土壤呼吸速率;土壤微生物量碳氮;土壤酶;微生物数量

中图分类号:S154.2;S812

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2012)01-0042-07

Soil Microbial Characteristic and Soil Respiration in Grassland under Different Use Patterns

GUO Ming-ying¹, ZHAO Ke-tu¹, YOU Jin-cheng¹, XU Li-jun²,
WANG Li-juan¹, JIA Shu-jie¹, XIN Xiao-ping^{2*}

(1. Hulunber Grassland Station, Hulunber, Inner Mongolia 021000, China; 2. Key Lab of Resources Remote Sensing
and Digital Agriculture, Hulunber Grassland Ecosystem Observation and Research Station, Institute of Agricultural
Resources and Regional Planning of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Effects of three different use patterns of grassland (enclosure, grazing, mowing) on soil respiration and soil microorganism were studied at the *Leymus chinensis* meadow steppe of Hulunber in this paper. Results were that soil respiration rate, soil microbial biomass carbon and soil enzyme activities (except urease) in enclosed grassland were higher (both contents and activities) than that in grazing and mowing grassland under different use patterns. Soil microbial biomass nitrogen, urease activity and microbial biomass were higher (both activity and quantity) under grazing and mowing patterns than under enclosed pattern. The contents of microbial biomass carbon, soil enzyme activities (except urease) and soil microbial biomass were highest in surface soil (0~10 cm) then decreased (both activity and number) in deeper soil depths. Soil respiration rate had a positive correlation with soil microbial biomass carbon and soil enzyme activity (except catalase), but a negative correlation with the soil microbial biomass nitrogen, catalase and the soil microorganism quantities.

Key words: Grassland use pattern; Soil respiration rate; Microbial biomass carbon; Microbial biomass nitrogen; Microorganism quantity

土壤呼吸,是指未扰动土壤中产生 CO₂ 的所有代谢作用,包括3个生物学过程(即土壤微生物呼吸、根系呼吸、土壤动物呼吸)和一个非生物学过

程^[1]。其中土壤动物呼吸和土壤中的非生物学过程产生的 CO₂ 量只占很小比例,在实际测量或估算中常常被忽略^[2],通常所说的土壤呼吸主要指根呼吸

收稿日期:2011-09-09;修回日期:2011-11-02

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项资金;内蒙古自治区重大科技项目“草甸草原固碳减排管理技术集成与研究示范”资助

作者简介:郭明英(1982-),女,黑龙江北安人,硕士,研究方向为草地资源、生态与管理,E-mail:guomingying163@163.com; * 通信作者

Author for correspondence, E-mail: xinxp@sina.com

和微生物呼吸。土壤呼吸是一个复杂的生物学过程,它不仅受到土壤温度、土壤湿度、土壤有机质以及土壤 C、N 含量等非生物因子的影响,而且受到叶面积指数(LAI)、植物光合作用、植被凋落物、根系生物量、土壤微生物等生物因子和人类活动的综合影响。

呼伦贝尔草原位于我国内蒙古自治区呼伦贝尔盟境内,是我国目前保存较为完整的草原之一^[3],具有典型的生态系统特征和先进的草原畜牧业生产经营方式,是我国北方草原区重要的农、牧业生产基地^[4,5]。关于羊草(*Leymus chinensis*)草原的土壤呼吸作用已经开展了大量研究,主要是放牧对羊草草原的土壤呼吸研究的较多^[6~8]。且大多为松嫩平原和锡林郭勒羊草草原等,而针对呼伦贝尔羊草草原土壤呼吸特性的研究报道较少。因此,本文从围封、放牧、刈割利用的角度对呼伦贝尔羊草草地土壤呼吸特性进行了系统研究,分析不同利用方式下土壤呼吸与土壤生物因子的关系,为全球气候变化及低碳减排的研究提供实践基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于呼伦贝尔市海拉尔区谢尔塔拉 6 队,地理位置 N49°13', E119°45', 处于大兴安岭西麓丘陵向蒙古高原的过渡区,海拔 630~760 m。属温带半干旱大陆性气候,年均气温 -2.4℃,最高气温为 36.2℃,最低气温为 -48.5℃;≥10℃ 年积温 1580~1800℃,无霜期 95~110 d;年平均降水量 350 mm,且年度间分布极不平衡。地带性土壤为黑钙土或暗栗钙土,土壤呈暗棕色,质地较粗。地带性植被为羊草草甸草原,主要优势牧草有羊草、贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)、寸草苔(*Carex duriuscula*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)和红柴胡(*Bupleurum scorzonifolium*)等。

1.2 样地选择

选择围封、放牧和刈割草地作为试验样地,代表 3 种不同的草地利用方式。围封处理:2007 年 11 月份在放牧地上进行围封。放牧处理:放牧家畜为牛,放牧强度为轻度放牧。刈割处理:每年 8 月初进行刈割,留茬 5 cm。放牧与刈割 2 种利用方式均在 10 年以上。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤呼吸测定 在采集土样地段的同一位置,利用全自动 LI-6400 进行土壤呼吸作用测定。测定时间为 2009 年 8 月初,测定时间为 8:00 至次日 6:00,从 8:00 至 18:00 为每隔 2 h 测定 1 次,从 18:00 至次日 6:00 为每隔 3 h 测定 1 次,持续测定,连续进行 3 d,求其算术平均值。

1.3.2 土壤微生物量碳、氮测定 土壤样品于 2009 年 8 月采集,在各地段随机选取 3 个土壤采样点每样点取样分 4 层,即 0~40 cm 每隔 10 cm 取一次土,从土壤中取约 100 g 土壤进行预培养,其中约 30 g 做熏蒸处理,30 g 做未熏蒸处理,30 g 测含水量。微生物量碳采用熏蒸提取-容量分析法,微生物量氮采用熏蒸提取-茚三酮比色法进行测定^[9],所用熏蒸剂均为氯仿。

1.3.3 土壤酶活性的测定 脲酶活性的测定采用奈氏比色法,以 1 g 干土 24 h 生成的 NH₃-N 量为脲酶 1 个活性单位;过氧化氢酶活性的测定采用高锰酸钾滴定法,酶活性以 1 g 干土 1 h 内消耗的 0.1 mol·L⁻¹ KMnO₄ 体积数(以 mL 计)表示;转化酶活性的测定采用 3,5-二硝基水杨酸比色法,酶活性以 24 h 后 1 g 土壤葡萄糖的 mg 数表示;蛋白酶活性的测定采用铜盐比色法,以 1 g 土壤在 24 h 内酶解蛋白质释放的质量代表蛋白酶的活性^[10]。

1.3.4 土壤微生物数量的测定 土壤微生物数量测定采用平板涂抹接种法,以牛肉膏蛋白胨培养基培养细菌(bacteria);高氏 1 号培养基加重铬酸钾(3.30 mL·L⁻¹)培养放线菌(actinomycetes);马丁氏培养基加链霉素(3.30 mL·L⁻¹)培养真菌(fungi)。培养 3~6 d 观察计数^[11]。

1.3.5 数据分析 采用 Excel 2003 软件进行绘图,应用 SAS 9.13 软件进行数据的统计分析,其中运用单因子方差分析与相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同利用方式对草地土壤呼吸速率的影响

由图 1 可知,3 种利用方式下土壤呼吸在昼夜的波动幅度不大,均呈现出“上升-下降”变化趋势。土壤呼吸的最高值均出现在 12:00—14:00 之间,其值分别为 4.664, 4.388 和 3.179 mg·m⁻²·h⁻¹,从土壤呼吸速率平均值变化的趋势看,围封土壤呼吸速率高于放牧,刈割土壤呼吸速率最低,其值分别为 3.713, 3.447 和 2.468 mg·m⁻²·h⁻¹。对 3 种

利用方式土壤呼吸速率进行方差分析,结果表明:
18:00 时围封与刈割之间存在显著性差异($P <$

0.05),放牧与这2种利用方式之间均无显著差异。
其他时间3种利用方式之间均无显著性差异。

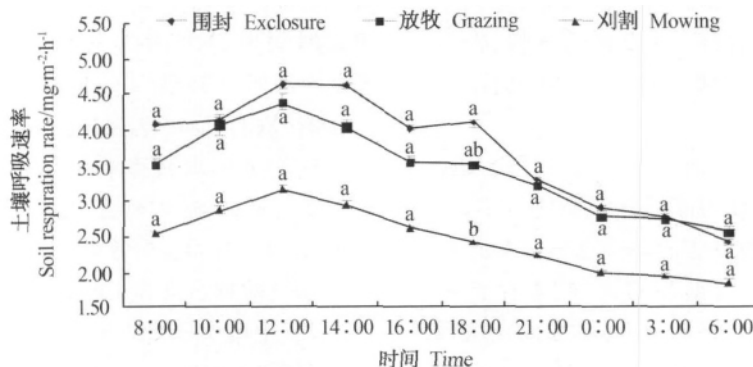


图1 不同利用方式草地土壤呼吸速率的变化

Fig. 1 Changes of soil respiration in grassland under different use patterns

2.2 不同利用方式草地土壤微生物量碳氮

2.2.1 土壤微生物量碳 由图2可知,3种利用方式下土壤微生物量碳含量的变化规律一致,均随土壤深度的增加含量降低。3种利用方式下均为表层0~10 cm含量最高,且呈现出围封>放牧>刈割的变化趋势,其值分别为514.737,445.263,273.684 mg·kg⁻¹。对3种利用方式下土壤微生物量碳进

行方差分析,结果表明:0~10 cm和10~20 cm土层围封与刈割之间存在显著性差异($P < 0.05$),放牧与这2种利用方式之间均无差异;20~30 cm土层3种利用方式之间无显著性差异;30~40 cm土层围封与放牧之间存在显著性差异($P < 0.05$),刈割与这2种利用方式之间均无显著差异。

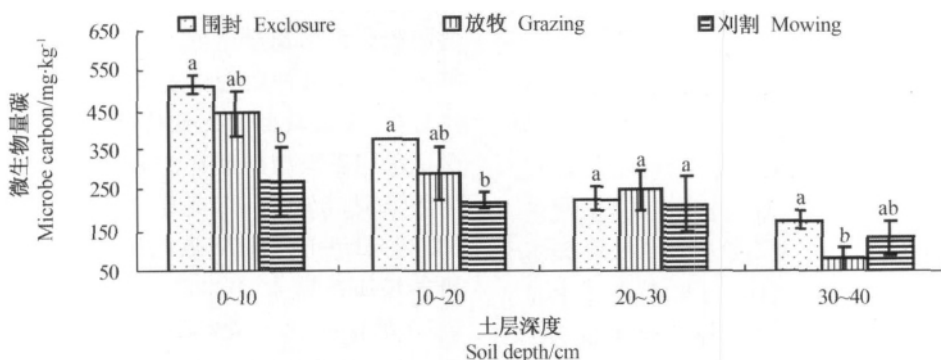


图2 不同利用方式草地土壤微生物量碳的变化

Fig. 2 Change of soil microbial biomass carbon under different use patterns

2.2.2 土壤微生物量氮 由图3可知,3种利用方式下不同土层土壤微生物量氮含量变化趋势不同。围封呈现出“增加-下降”的变化趋势,10~20 cm土壤微生物量氮含量最高;放牧呈现出“下降-增加-下降”的变化趋势;而刈割土壤微生物量氮含量随着土层深度增加而降低。土壤微生物量氮含量表层0~10 cm最高(除围封),呈现出刈割>放牧>围封,其值分别为41.077,39.663,24.378 mg·kg⁻¹。对3种利用方式下土壤微生物量氮进行方差分析,结果表明:0~10 cm,10~20 cm与30~40 cm土层3种利用方式之间无显著性差异;20~30 cm土层放牧

与刈割之间存在显著性差异($P < 0.05$),围封与这2种利用方式之间均无显著差异。

2.3 不同利用方式草地土壤酶活性

本试验对不同利用方式下草地土壤酶活性进行分析,结果如表1所示。蛋白酶、转化酶与过氧化氢酶,这3种酶活性变化规律一致,均随土壤深度的增加而减弱,其表层0~10 cm酶活性最高,而且酶活性是围封>刈割>放牧;而脲酶活性与之相反,总体表现为随土壤深度的增加而增强。其中围封与放牧方式下脲酶活性呈现出“增加-降低”的变化趋势,放

牧各土层脲酶活性均比围封与刈割处理高。对 4 种酶进行统计分析结果表明,蛋白酶在 20~30 cm 土层围封与刈割之间存在显著性差异($P<0.05$),其他各土层 3 种利用方式间差异不显著;转化酶在 10~20 cm 土层围封和放牧与刈割之间存在显著性差

异($P<0.05$),其他各土层 3 种利用方式差异不显著;过氧化氢酶在各土层之间均没有显著性差异;脲酶在 20~30 cm 土层围封和刈割与放牧之间存在显著性差异($P<0.05$),其他各土层 3 种利用方式间差异不显著。

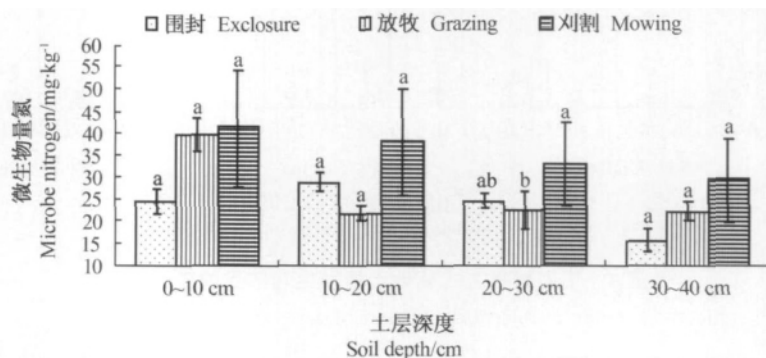


图 3 不同利用方式草地土壤微生物量氮的变化

Fig. 3 Change of soil microbial biomass nitrogen under different use patterns

表 1 不同利用方式草地土壤酶活性的变化

Table 1 Change of soil enzyme under different use patterns

土层 Depth/cm	利用方式 Use pattern	蛋白酶 Protease	转化酶 Invertase	过氧化氢酶 Catalase	脲酶 Urease
0~10	围封	1.229±0.472 ^a	9.662±0.489 ^a	2.240±0.223 ^a	0.146±0.039 ^a
	放牧	0.908±0.095 ^a	8.076±2.512 ^a	1.958±0.461 ^a	0.210±0.129 ^a
	刈割	0.984±0.253 ^a	9.613±0.419 ^a	2.148±0.172 ^a	0.114±0.023 ^a
10~20	围封	0.739±0.123 ^a	9.194±0.871 ^a	1.915±0.221 ^a	0.207±0.085 ^a
	放牧	0.736±0.096 ^a	9.479±0.630 ^a	1.640±0.229 ^a	0.288±0.099 ^a
	刈割	0.672±0.516 ^a	7.192±0.594 ^b	1.912±0.642 ^a	0.195±0.106 ^a
20~30	围封	0.501±0.069 ^a	7.037±2.432 ^a	1.598±0.274 ^a	0.277±0.058 ^b
	放牧	0.217±0.199 ^{ab}	6.639±1.600 ^a	1.615±0.426 ^a	0.389±0.024 ^a
	刈割	0.147±0.015 ^b	6.679±0.873 ^a	1.802±0.401 ^a	0.269±0.054 ^b
30~40	围封	0.415±0.330 ^a	6.426±1.107 ^a	1.793±0.113 ^a	0.243±0.125 ^a
	放牧	0.208±0.085 ^a	6.284±1.180 ^a	1.620±0.479 ^a	0.338±0.123 ^a
	刈割	0.147±0.033 ^a	6.435±1.122 ^a	1.655±0.347 ^a	0.314±0.059 ^a

注:表中同一列中标有不同字母的均值间差异显著($P<0.05$)

Note: Different letters in the same column mean significant difference at the 0.05 level

2.4 不同利用方式草地土壤微生物数量

细菌、放线菌和真菌是草原土壤微生物中数量最大的 3 大类群^[12]。不同利用方式下各类群土壤微生物垂直分布是不同的,具有一定的规律性。由图 4 可知,3 种利用方式下微生物数量变化规律基本一致,均是表层(0~10 cm)土壤中的微生物数量最高,随着土层深度增加而微生物数量减少。细菌与放线菌在 3 种利用方式下,各土层的数量大小均为刈割>放牧>围封;而真菌其数量大小则为刈割>放牧>围封。在土壤表层放牧地微生物数量大小依次为放线菌>细菌>真菌;而其他 2 种利用方式下微生物数量大小均为细菌>放线菌>真菌。刈割地的 10~20 cm 土层微生物数量大小依次为放线菌

>细菌>真菌;而其他 2 种利用方式下的该土层微生物数量大小均为细菌>放线菌>真菌。而 20~30 cm 和 30~40 cm 土层的微生物数量大小变化趋势相同,依次为放线菌>细菌>真菌;从土壤微生物总数来看,在不同利用方式下草地中细菌和放线菌数量多,真菌数量最少。对 3 种利用方式下土壤微生物数量进行方差分析,结果表明:细菌数表现出 0~10 cm 土层围封与刈割之间差异显著($P<0.05$),真菌数为 30~40 cm 放牧与刈割之间差异显著($P<0.05$),而放线菌 20~30 cm 土层围封与刈割之间差异显著($P<0.05$),其他土层 3 种利用方式下各土层之间无显著性差异。

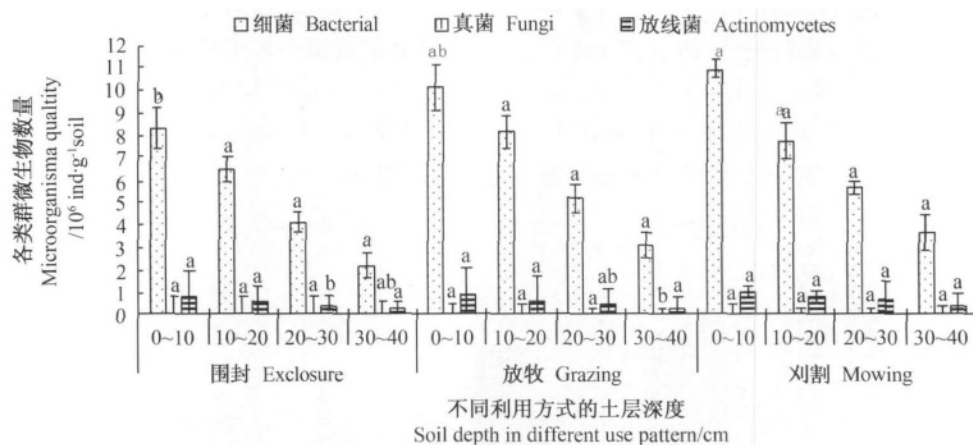


图 4 不同利用方式草地土壤微生物数量的变化

Fig. 4 Change of microbial amount under different use patterns

2.5 土壤呼吸速率与土壤微生物特性相关性

通过对草地不同利用方式下的土壤呼吸速率与微生物特性相关关系进行分析(表 2),结果表明,土壤呼吸速率与微生物量碳、蛋白酶、转化酶和脲酶成

正相关,与微生物量氮、过氧化氢酶和微生物数量成负相关。其中只与微生物量氮的相关性达到显著水平($P < 0.05$),而其余之间均未达显著水平。

表 2 土壤呼吸速率与微生物特性相关分析

Table 2 Correlation analysis between soil respiration rate and microbial characteristics

内容 Content	微生物量碳 Microbe carbon	微生物量氮 Microbe nitrogen	蛋白酶 Protease	转化酶 Invertase	脲酶 Urease	过氧化氢酶 Catalase	微生物数量 Microorganisms quantity
土壤呼吸 Soil respiration							
相关系数(R) Correlation coefficient	0.943	-0.999	0.746	0.815	0.266	-0.276	-0.993
显著水平(P) Significant	0.2159	0.0319	0.4638	0.3935	0.8289	0.8219	0.0773

3 讨论与结论

3.1 不同利用方式下草地土壤呼吸速率的昼夜变化

目前国内外许多学者对土壤呼吸的日动态已经作了大量研究,通过对土壤呼吸进行全天动态变化观测,土壤呼吸速率的日变化均呈单峰型,峰值一般出现在 12:00—14:00^[13~15]。本试验的土壤呼吸速率在 12:00—14:00 达到最大值,这与前人的研究结果基本一致。从土壤呼吸速率总体变化趋势来看为围封>刈割>放牧,放牧与刈割使土壤呼吸速率的变化趋于平缓,其变化幅度小于围封。在内蒙古锡林河流域放牧使羊草群落土壤呼吸年总量下降了约 33.95%^[6];贾丙瑞等^[8]对内蒙古典型羊草草原研究的结果表明放牧样地土壤呼吸作用较围栏样地偏低;美国高草草原,放牧将减少土壤年呼吸总量的 17.5%^[16];在亚马逊河流域,相对科学管理、合理放牧的草原,过度放牧减少土壤年呼吸总量的 33%^[17]。本试验与其结果一致,说明放牧与刈割行为均对草

地土壤—植物系统土壤呼吸具有较大的影响,放牧通过家畜采食、践踏以及排泄直接地和间接地影响草原生态系统的土壤环境,从而影响草地土壤呼吸。刈割对植物根系生长造成影响,进而影响根系的呼吸;还有可能是减少了地表枯落物的积累,枯落物的减少会影响到土壤微生物的数量,从而降低微生物的活动并影响土壤微生物的呼吸。但也有研究表明,过度放牧可促进草原土壤呼吸作用,释放更多 CO₂^[18],这可能与研究地点的地理位置、气候、植物群落类型、环境条件、放牧与刈割管理措施等之间的差异有关,仍需进一步研究。

3.2 不同利用方式下草地土壤微生物量碳、氮

本试验结果表明,土壤微生物量碳、氮含量的变化规律基本一致,均是随土层深度的增加呈下降趋势,尤以表层(0~10 cm)最高,这反映了土壤表层微生物活动强烈。这可能是因为随着土层的加深,土壤有机质含量急剧下降,地下生物量也随着减少^[19],

该结果与郭明英等^[20]的研究结果一致。由于放牧与刈割的长期利用使其能量和氮源相对匮乏,导致微生物生物量较低,而且水气状况不佳也制约了土壤微生物碳、氮的含量^[21]。同时放牧与刈割行为改变了地被覆盖、土壤微环境,从而改变了土壤微生物氮含量,使其含量高于围封草地。土壤微生物量与土壤温湿度及通气状况和养分状况都有关系,土壤表层根系相对丰富,其分泌物促进微生物大量繁殖;同时将更多的植物汁液输送到土壤中,导致更多的可利用氮进入土壤,增强了微生物活性。一般认为,放牧使微生物C降低。也有些试验证明,放牧使高原草原土壤微生物量C、N显著增加^[22]。由于放牧与刈割利用草地土壤微生物量碳、氮的研究较少,其影响因素还有待进一步研究探讨。

3.3 不同利用方式下草地土壤酶活性

有研究表明,土壤中酶活性的分布状况是有规律的。随土壤深度的增加而减弱,本试验中除脲酶外,其他3种酶均反映这一特点。脲酶活性变化规律与戴伟等^[23]的研究结果相反,而过氧化氢酶活性变化规律与戴伟研究结果一致。脲酶和过氧化氢酶活性变化规律与鲁萍^[24]研究结果不一致。蛋白酶、转化酶与过氧化氢酶,这3种酶活性变化规律一致,均随土壤深度的增加其活性降低,在表层0~10 cm酶活性最高,而且酶活性是围封>刈割>放牧;而脲酶活性与之相反。由于草地围封的时间较短,而放牧与刈割利用的时间较长,在短时间内围封样地内土壤表层累积了较多的枯枝落叶和腐殖质,有机质含量高,有充分的营养源以利于土壤微生物的生长,加之水热条件和通气状况良好,微生物生长旺盛,代谢活跃,呼吸强度加大而使表层积聚了较高的土壤酶活性^[19]。由于围封利用时间较短,对于围封长期利用的影响结果还有待进一步研究。

3.4 不同利用方式下草地土壤微生物数量

不同利用方式下草地土壤微生物的数量及其组成比例均有差异。邵玉琴等^[25]认为土壤微生物数量随着土壤深度的加深而逐渐减少。刘世贵等^[26]报道,土壤微生物数量有明显的垂直分布规律,表土层数量大于深土层,土壤微生物最活跃的土层是表土层。罗明等^[27]报道,平原荒漠盐渍草地土壤中各类群微生物的分布均集中在0~20 cm和20~40 cm土层中,且微生物数量随土层加深而减少,本研究结果与其基本一致。从土壤微生物总量来看在不同利

用方式草地中细菌和放线菌数量多,而真菌数量最少。这与陈海军等^[28]研究结果基本一致。微生物数量分布特征与土壤水热条件、肥力状况及植物群落特征相联系,不同生境之间微生物各类群的数量存在一定差异,而且微生物的活动和植物根系生物量及有机质含量分布也密切相关^[12,17,29,30]。由于表层地表聚积大量枯枝落叶,土壤中含有丰富的有机质和大量植物根系,且水热、通气状况良好,因此有利于微生物生长和繁殖。

3.5 土壤呼吸与土壤微生物特性相关性分析

不同利用方式均对温度产生直接或间接的影响,温度的变化又对土壤微生物呼吸产生影响,由于围封利用年限较短,其与放牧、刈割对土壤微生物活动的影响进行比较的结果尚未形成明显的梯度变化。放牧与刈割对草地土壤呼吸作用的影响主要在于对土壤微生物数量、植物根系生长和土壤理化性质等方面的改变,因此土壤呼吸作用与植物群落生长状况及土壤环境条件密切相关,受多方面因素共同控制。本试验不同利用方式下的土壤呼吸与微生物相关分析结果显示,土壤呼吸速率与微生物量碳、蛋白酶、转化酶和脲酶成正相关,与微生物量氮、过氧化氢酶和微生物数量成负相关。其中只与微生物量氮显著相关,而其他均不显著。土壤呼吸速率由于受当地水热条件的影响很大,水热条件的变化会对土壤微生物碳、氮、土壤酶和微生物数量产生影响,进而对土壤呼吸产生影响。由于本试验没有对水热条件进行考虑、根系呼吸也没进行研究,因此,关于根系、根系与土壤微生物代谢共同作用对土壤呼吸昼夜变化的影响还有待于进一步研究。

参考文献

- [1] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems[J]. Botany Review, 1997, 43: 449-528
- [2] 齐志勇,王宏燕,王江丽,等. 陆地生态系统土壤呼吸的研究进展[J]. 农业系统科学与综合研究, 2003, 19(2): 116-119
- [3] 潘学清. 中国呼伦贝尔草地[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1992: 82-96
- [4] 李博. 中国北方草地退化及其防治对策[J]. 中国农业科学, 1999, 30(6): 1-6
- [5] 卢欣石,刘起,李守德,等. 中国草情[M]. 北京: 开明出版社, 2002: 16-25
- [6] 马涛,董云社,齐玉春,等. 放牧对内蒙古羊草群落土壤呼吸的影响[J]. 地理研究, 2009, 28(4): 1041-1046
- [7] 马涛. 放牧对内蒙古锡林河流域羊草草原土壤呼吸的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008: 23-27

- [8] 贾丙瑞,周广胜,王风玉,等.放牧与围栏羊草草原土壤呼吸作用及其影响因子[J].环境科学,2005,26(6):1-7
- [9] 吴金水.土壤微生物生物量测定方法及其应用[M].北京:气象出版社,2006:54-78
- [10] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986:320-344
- [11] 许光辉,郑洪元.土壤微生物分析手册[M].北京:农业出版社,1986:287-289
- [12] 李玉强,赵哈林,赵学勇,等.不同强度放牧后自然恢复的沙质草地土壤呼吸、碳平衡与碳储量[J].草业学报,2006,15(5):25-31
- [13] 刘颖,韩士杰,胡艳玲,等.土壤温度和湿度对长白松林土壤呼吸速率的影响[J].应用生态学报,2005,16(9):1581-1585
- [14] 李凌浩,韩兴国,王其兵,等.锡林河流域一个放牧草原群落中根系呼吸占土壤总呼吸比例的初步估计[J].植物生态学报,2002,26(1):29-32
- [15] 王妮,周晓梅,郭继勋.东北羊草草原两种主要群落环境因素对土壤呼吸贡献量的影响[J].草业学报,2002,11(1):12-16
- [16] Bremer D J, Ham J M, Owensby C E, *et al.* Responses of soil respiration to clipping and grazing in a tallgrass prairie[J]. Journal of Environmental Quality, 1998, 27: 1539-1548
- [17] Davidson E A, Verchot L V, Cattaneo J H, *et al.* Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia [J]. Biogeochemistry, 2000, 48: 53-69
- [18] Risser P G, Birney E C, Blocker H D, *et al.* The true prairie eco-system[M]. Stroudsburg, Pennsylvania: Hutchinson Ross Publishing Company, 1981: 244-246
- [19] 文都日乐,张静妮,李刚,等.放牧干扰对贝加尔针茅草原土壤微生物与土壤酶活性的影响[J].草地学报,2010,18(4):517-522
- [20] 郭明英,卫智军,徐丽君.不同刈割年限天然草地土壤呼吸特性研究[J].草地学报,2011,19(1):51-57
- [21] 张蕴薇,韩建国,韩永伟,等.不同放牧强度下人工草地土壤微生物碳、氮的含量[J].草地学报,2003,11(4):343-346
- [22] Bardgett R D, leemans D K. The short-term effects of cessation of fertilizer applications, liming and grazing on microbial biomass and activity in a reseeded upland grassland soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 1995, 19: 148-154
- [23] 戴伟,陈晓东.北京低山地区土壤酶活性与土壤理化性质的关系[J].河北林学院学报,1995,10(1):14-18
- [24] 鲁萍.东北羊草草原主要植物群落土壤酶活性的研究[D].哈尔滨:东北师范大学,2002:9-26
- [25] 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
- [26] 刘世贵,葛绍荣,龙富章.川西北退化草地土壤微生物数量与区系研究[J].草业学报,1994,3(4):70-76
- [27] 罗明,邱沃.新疆平原荒漠盐渍草地土壤微生物生态分布的研究[J].中国草地,1995,17(5):29-33
- [28] 陈海军,王明玖,韩国栋,等.不同强度放牧对贝加尔针茅草原土壤微生物和土壤呼吸的影响[J].干旱区资源与环境,2008,22(4):165-160
- [29] 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
- [30] 周萍,刘国彬,薛莲.草地生态系统土壤呼吸及其影响因素研究进展[J].草业学报,2009,18(2):184-193

(责任编辑 李美娟)