巴音布鲁克高寒人工草地土壤可培养微生物区系特征*

尹 伟[1,2] 胡玉昆[1**] 柳妍妍[1] 公延明[1,2] 王吉云[3] 陈爱莲[4]

([1]中国科学院新疆生态与地理研究所,乌鲁木齐 830011;[2]中国科学院研究生院,北京 100049;[3]新疆昌吉市草原站,新疆昌吉 831100;[4]新疆昌吉州草原站,新疆昌吉 831100)

摘 要 以巴音布鲁克建植期为4、8、15和20年的4种人工草地为对象,以天然草地为对照,采用平板表面涂抹法对0~20 cm、20~40 cm的土壤微生物区系特征进行了分析。结果表明:细菌数量以建植期4年的草地土壤最多,20年最少,8年、15年人工草地分别是天然草地的1.19和0.58倍;真菌数量为4年人工草地>20年人工草地>15年人工草地>8年人工草地>天然草地;放线菌数量以天然草地最多,8年人工草地次之,20年、4年、15年人工草地依次降低;细菌、真菌以及放线菌数量均在8月达到最大值,9月最小;细菌与植被盖度呈显著正相关($P<0.05$),微生物总数与植被盖度呈极显著正相关($P<0.01$),真菌与土壤含水量呈极显著正相关($P<0.01$),与电导率呈显著正相关($P<0.05$),pH值对放线菌的影响最大;影响微生物类群总数的主要生态因子是植被盖度和建植年限。

关键词 巴音布鲁克;不同建植期;土壤微生物数量;生态因子;区系特征

中图分类号 S154.37 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2010)2-0303-06

Characteristics of soil cultivable microbial flora in alpine artificial grasslands in Bayanbulak. YIN Wei[1,2], HU Yu-kun[1], LIU Yan-yan[1], GONG Yan-ming[1,2], WANG Ji-yun[3], CHEN Ai-lian[4] ([1]*Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *China*; [2]*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; [3]*Changji Grassland Station of Xinjiang, Changji* 831100, *Xinjiang, China*; [4]*Changji Hui Autonomous Prefecture Grassland Station of Xinjiang, Changji* 831100, *Xinjiang, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2010, **29**(2): 303-308.

Abstract: By using dilute plate counting method, the characteristics of microbial flora in 0-20 cm and 20-40 cm soil layers of alpine artificial grasslands established for 4, 8, 15, and 20 years in Bayanbulak were studied, with related ecological affecting factors analyzed. The amount of soil bacteria was the highest in 4-year old grassland and the lowest in 20-year old grassland, and was 2.19 and 1.58 times higher in 8-year old and 15-year old grasslands than in natural grassland, respectively. The amount of soil fungi was in order of 4-year old grassland > 20-year old grassland > 15-year old grassland > 8-year old grassland > natural grassland; and the amount of soil actinomyces was the highest in natural grassland, followed by in 8-, 20-, 4-, and 15-year old grasslands. The three soil microbial groups reached the maximum in August and the minimum in September. The total amount of soil microbes and the amount of soil bacteria had significant positive correlations with vegetation coverage, and the amount of soil fungi was significantly positively correlated with soil moisture content and soil conductivity. Soil pH had the greatest effects on the amount of soil actinomyces, and the main ecological factors affecting the total amount of soil microbes were vegetation coverage and the time of grassland establishment.

Key words: Bayanbulak; artificial grassland with different establishment years; soil microbial amount; ecological factor; flora characteristics.

* 全球环境基金项目(GEF)和新疆草地资助项目(095F021)。

** 通讯作者 E-mail: huyk@ms.xjb.ac.cn

收稿日期:2009-06-12 接受日期:2009-09-20

土壤微生物是陆地生态系统中最活跃的成分，担负着分解动植物残体的重要使命，推动着生态系统的能量流动和物质循环（张萍等，1999）。微生物参与矿化-同化、氧化-还原等多种反应过程，能矿化有机物，也能将植物不能直接吸收的难溶性无机物变为可溶性的，对土壤的质量和肥力很重要，在土壤有机质分解和营养元素矿化中起主要作用（Balloniw & Favilli，1987；Brussaard，1994；陈珊等，1995）。因此，土壤中微生物总量，是有机物质矿化程度的一种衡量标志（邵玉琴等，2001）。微生物的生长与土壤酶活性、环境因子密切相关，生态分布受土壤理化性质、土层深度等多种因素的影响（单娜娜等，2001；周智彬和李培军，2003；靳正忠等，2009）。土壤微生物数量的减少意味着生态系统物质转换和能量循环过程受阻（曹成有等，2007）。

巴音布鲁克草原位于开都河源流区，拥有高寒草甸、高寒草原化草甸、高寒草甸化草原、高寒草原、山地灌丛草甸和沼泽化高寒草甸等草地类型，这些草地类型不仅是该地区畜牧业发展的物质基础，同时在涵养水源、保持水土等方面起着重要作用。然而，由于自然条件和经营管理问题，巴音布鲁克草原退化极其严重，退化草场占可利用草场的49.2%（巴音布鲁克草原实验站，1989），早在20世纪80年代初就在该地区建立了人工草地，并在退化地区采取补播、施肥等措施进行恢复。目前国内对土壤微生物的区系、数量、生物量动态以及多样性的报道多集中于科尔沁沙地（吕桂芬，1999；邵玉琴等，2004，2005）、江河源区（王启兰等，2004；尚占环等，2007）、林区（王艳超等，2008；何容等，2009；周焱等，2009）等地，开展开都河源区不同建植期高寒草地的土壤微生物区系特征研究，进一步分析不同建植年代高寒人工草地土壤微生物区系特征与环境因子的关系，为高寒草地生态系统分解者亚系统功能的维持以及科学管理草地提供参考依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

新疆巴音布鲁克草原（42°18′N—43°34′N，82°27′E—86°17′E）位于天山中段大尤尔都斯盆地西部，海拔2340～4618 m，年均气温－4.8 ℃，1月最低气温可达－48 ℃，7月最高气温30.5 ℃，年降水量平均276.2 mm，年蒸发量高达1022.9～1247.5 mm，年日照2466～2616 h，全年积雪日达150～180 d，无绝对无霜期，属典型的高寒气候，土壤为亚高山高寒草原土。人工草地主要建植在高寒草原附近，属于同一海拔高度。而紫花针茅（*Stipa purpurea*）+羊茅（*Festuca ovina*）草原是研究区域内典型的高寒草原类型，分布在海拔2460～2760 m，群落种类组成简单，分属7科12属，一般7～10种（胡玉昆等，2007），群落总盖度约50%，紫花针茅在群落中占绝对优势，相对盖度为40%～70%。其他禾草，如羊茅、冰草（*Agropyron cristatum*）、草地早熟禾（*Poa pratensis*）等盖度相对较低，杂类草以多裂委陵菜（*Potentilla multifida*）、二裂委陵菜（*Potentilla bifurca*）和棘豆属（*Oxytropis* sp.）等为主。

1.2 研究方法

1.2.1 样地调查设置 在巴音布鲁克草原生态站附近，选择位于同一海拔高度的4种不同建植期的人工草地（4、8、15和20年）作为试验样地，以典型的天然草地作为对照，样地面积为10 m×10 m，其生境基本情况见表1。研究区人工草地主要采取松土补播的方式，补播垂穗披碱草（*Elymus nutans*）和老芒麦（*E. sibiricus*），播量均为75 kg·hm^{-2}。调查样地选择植物生长均匀、微地形差异较小、集中连片分布的群落，分别取样。调查时间在植物生长期2007年6—9月，样地内按对角线法做1 m×1 m的

表1 巴音布鲁克地区不同生境样地概况

Tab.1 Characteristics of grasslands in Bayanbulak region

生境	主要植物	平均盖度（%）	平均高度（cm）	生物量（g·m^{-2}）	pH值	土壤含水量（%）
4年人工草地	垂穗披碱草、老芒麦	92.83	31.90	147.22	8.00	35.86
8年人工草地	垂穗披碱草、老芒麦、多裂委陵菜、棘豆	83.35	31.90	96.46	8.04	24.68
15年人工草地	垂穗披碱草、老芒麦、棘豆、二裂委陵菜	41.42	10.32	56.51	8.01	24.97
20年人工草地	垂穗披碱草、老芒麦、鹅绒委陵菜（*Potentilla anserina*）、天山赖草（*Leymus tianschanicus*）	44.85	9.61	57.34	8.07	23.84
天然草地	紫花针茅、天山赖草、多裂委陵菜、棘豆、羊茅、火绒草（*Leontopodium leontopodioides*）	50.20	6.47	58.21	8.11	22.32

数据均采用7月观测数据。

小样方,重复 5 次,并分别记录植物种类组成、高度及盖度,高度用米尺测量,盖度采用目估法。同时在地上植被调查完毕后采集土壤样品,以 5 点混合法按 0 ~ 20、20 ~ 40 cm 层面分别采集土壤样品,以进行土壤理化性质的测定,并在采样完毕后将同一块样地、同一深度的土壤混合并按四分法除去多余土样,留 1 kg 左右装入封口袋带回室内 4 ℃保存,进行土壤微生物数量的测定。

1.2.2　土壤微生物类群数量测定方法　采用平板表面涂抹法计数(许光辉和郑洪元,1986)。细菌培养采用牛肉膏蛋白胨培养基;放线菌培养采用改良高氏一号培养基;真菌培养采用马丁-孟加拉红培养基。在无菌室里,称取鲜土样 5 g,放入装有无菌水的加玻璃珠三角瓶中(以充满瓶底为宜),振荡 10 min 使土样充分打散,用 1 ml 移液枪准确吸取土壤溶液 1 ml,依次稀释为 10^{-1}、10^{-2}、10^{-3}、10^{-4}土壤悬液,再用 100 μl 的移液枪准确吸取 0.2 ml 不同浓度土样溶液接种到培养皿,每种菌分别接种 3 个不同稀释度悬液,其中细菌 10^{-2} ~ 10^{-4},真菌 10^{-1} ~ 10^{-3},放线菌 10^{-2} ~ 10^{-4},每一个稀释度 3 个重复。接种后,用无菌玻璃棒涂布均匀于琼脂表面。接种了土壤悬液的培养皿,平放于桌上 20 ~ 30 min,使菌液渗透入培养基内,然后倒置于 25 ~ 28 ℃恒温箱中培养一定时间:细菌 2 ~ 3 d,真菌 5 ~ 7 d,放线菌 7 ~ 10 d。选取每皿 15 ~ 150 个的 1 个稀释度统计菌落数,按下列公式计算每克干土中的菌数。

菌数(CFU · g^{-1}) = 菌落平均数 × 稀释倍数/干土质量。

土壤含水量采用铝盒烘干法(105 ℃,8 h),pH 值采用 pH 计雷磁 PHS-3C(土∶水 = 1∶5),电导率采用电导率仪 DDS-307A(土∶水 = 1∶5)进行测定。

数据处理利用 Microsoft Excel 2003、DPS 7.05、SPSS 15.0 软件。

2　结果与分析

2.1　不同生境土壤微生物的组成与数量

2.1.1　不同生境土壤微生物各类群的数量特征　在 0 ~ 40 cm 土层微生物总数中细菌最多,占 68.03% ~ 90.55%,放线菌次之,占 8.18% ~ 31.75%,真菌最少,仅为 0.21% ~ 1.28%(表 2)。由此可见,细菌数量在土壤微生物总数中处于绝对的优势地位。5 种生境 0 ~ 40 cm 土层的微生物数量以 4 年最多,20 年最少,分别为天然草地的 1.47 倍、0.5 倍。0 ~ 40 cm 土层 4 和 8 年的细菌数量与天然草地相比,分别增长 95.22%、39.65%,但 15、20 年与天然草地相比,却降低了 27.23% 和 49.84%。真菌数量也以 4 年最多,为 17.3×10^3 CFU · g^{-1}干土,20、15、8 年次之,天然草地最低,仅为 2.05×10^3 CFU · g^{-1}干土,即真菌类群在建植初期增长速度很快,在 4 年达到最大,以后随着建植年限的增长,又呈现先降后升的特点。土壤细菌数量、真菌数量的最高值均出现在 4 年人工草地,这主要是建植初期生境资源丰富,建群种生长良好,土壤质量趋于良性化,随着建植年限的增长,地上植被出现多种退化指示植物,植被盖度、地上生物量、土壤含水量均较建植初期有所下降,腐殖质含量降低,故细菌和真菌数量降低。4、8、15、20 年的放线菌类群数量仅为天然草地的 38%、75%、26% 和 47%,表明随建植年限的增长,放线菌数量呈现先降后升的双峰变化规律,可能与放牧率大小、土壤理化性质有关。此外,植被类型以及建植年代的不同也是造成微生物数量差异的主要原因。微生物总数变化规律同细菌类群变化一样,4 年人工草地 > 8 年人工草地 > 天然草地 > 15 年人工草地 > 20 年人工草地。

另外,由于细菌可产生胞外代谢物,如多糖,脂类和蛋白质,起到胶结以稳定团聚体的作用

表 2　不同年限草地土壤微生物数量特征及各类群所占比例

Tab. 2　Characteristics of microbe number and microbe proportion in different grasslands

生境	细菌		真菌		放线菌		微生物总数
	数量($\times 10^5$ CFU · g^{-1}干土)	占总数(%)	数量($\times 10^3$ CFU · g^{-1}干土)	占总数(%)	数量($\times 10^4$ CFU · g^{-1}干土)	占总数(%)	数量($\times 10^3$ CFU · g^{-1}干土)
4 年人工草地	12.26	90.55	17.30	1.28	11.07	8.18	1354.00
8 年人工草地	8.77	79.84	2.33	0.21	21.91	19.95	1098.43
15 年人工草地	4.57	85.16	3.06	0.57	7.66	14.27	536.66
20 年人工草地	3.15	68.86	5.38	1.18	13.71	29.97	457.48
天然草地	6.28	68.03	2.05	0.22	29.31	31.75	923.15

数据为 6—9 月土壤 0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 的平均值。

表3 不同年限草地土壤微生物的垂直分布(×10^5 CFU·g^{-1}干土)

Tab. 3 Vertical distribution of microbe numbers in different grasslands

生境	细菌		真菌		放线菌		微生物总量	
	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm
4年人工草地	11.475	0.785	0.167	0.006	1.021	0.086	12.662	0.877
8年人工草地	7.775	0.995	0.019	0.004	1.888	0.304	9.682	1.303
15年人工草地	3.808	0.758	0.005	0.026	0.599	0.168	4.411	0.951
20年人工草地	2.878	0.275	0.051	0.003	1.333	0.039	4.261	0.316
天然草地	5.053	1.223	0.017	0.003	2.418	0.513	7.488	1.738

数据为6—9月土壤0~20和20~40 cm的平均值。

(李新荣等,2001),因此,微生物数量的多少,尤其是细菌数量的多少在某种程度上可以反映土壤质量的变化。4年人工草地细菌数量是20年人工草地的3.89倍(表2),结合地上植被状况,15和20年人工草地在植被调查时有天山赖草、委陵菜、棘豆等退化指示植物的出现,从侧面反映出该植物群落已发生退化。总的来说,人工草地建植初期微生物数量呈增加的趋势,在4年达到最大值,建植8年后微生物数量小于天然草地的微生物数量,以后随着建植年代的增长,微生物数量逐渐降低。

2.1.2 不同生境土壤微生物的垂直分布规律 由表3可以看出,在巴音布鲁克不论是人工草地还是天然草地,土壤中微生物区系组成为细菌>放线菌>真菌。除15年人工草地真菌数量随土层深度的加深而增加外,其他建植期细菌、真菌、放线菌数量均随土层深度的增加而减少,表明微生物类群具有表聚性。这主要是由于土壤表层枯落物的分解、转化进入土壤,形成较厚的腐殖质表层,有机质含量高,土壤中的大部分营养元素多集中于表层,由于本研究区内人工草地植被根系多集中于0~20 cm,根系分泌的可溶性糖类、蛋白质等刺激微生物的生长。同时,土壤表层温度和通气状况有利于微生物的生存与繁衍,而20~40 cm土壤离地面较远,受地面气温影响较小,故下层细菌数量不如上层土壤细菌数量多,即该研究区内0~20 cm为微生物剧烈活动层。15年人工草地土壤0~20 cm土层真菌数量小于20~40 cm土层真菌数量,可能受放牧率大小的影响(吴楠等,2006),具体原因有待于进一步研究。

2.1.3 不同生境土壤微生物的月动态变化 由图1可知,5种生境的土壤微生物3大类群在6—9月,表现出相同的月份变化规律,即均在8月达到最大值,9月最低。原因可能在于细菌喜好湿润,能耐受低氧水平,研究区的降水主要集中在7—8月,此期间植物生长迅速,根系活动旺盛,气温上升,8月气温达到最高,有利于细菌的生长和繁殖,进入8月中旬后牧草开始枯黄,气温开始降低,同时出现降雪天气,自此进入冬季,植物生长处于休眠状态,根系活动迟缓,土壤含水量较低,细菌生长受到抑制。由于

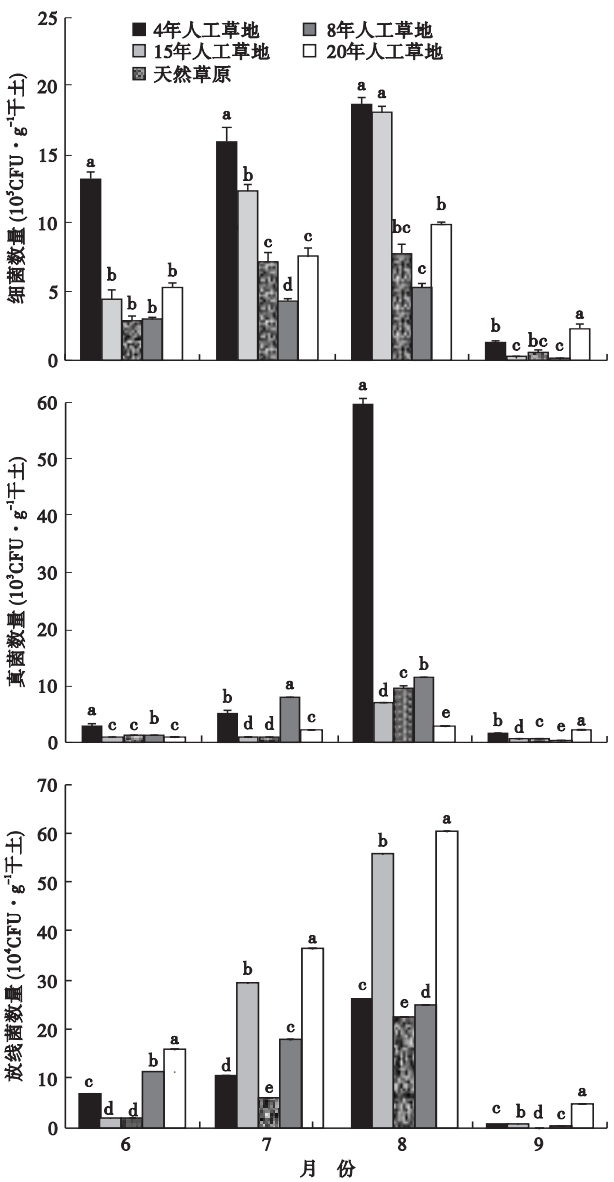


图1 不同生境土壤微生物的月动态变化

Fig. 1 Variation of microbe numbers of different habits from June to September

图柱上方不同字母表示同一月份不同生境差异显著($P<0.05$)。

细菌数量占微生物总数量的68.03%～90.55%,对微生物总数的贡献率最大,故微生物总数变化顺序与细菌变化一致。

土壤中真菌数量为10^3 CFU·g^{-1},小于细菌和放线菌数量,在偏酸性土壤中数量较多,是降解各种有机物的重要类群,对不利环境的忍耐力较强。不同生境的真菌月份数量变化规律相同,同细菌一样,在水热条件较好的8月均达到最大值。但经方差分析,5种生境的真菌数量没有显著性差异。

放线菌数量不同月份之间变化最明显,且同月份之间差异性显著。6—8月随着环境条件(水、肥、气、热)的改变,放线菌数量逐渐增多,并在8月达到最大值,进入9月数量因为温度、植被等自然环境的改变而迅速降低。

2.2　土壤微生物数量与土壤生态因子的相关关系

影响微生物生长的主要因素有碳源、氮源、无机盐、水分、pH值等,微生物活动随土壤因子的变化而受到不同的影响。对细菌、真菌、放线菌、微生物总数与其生态因子——建植年代、土壤含水量、植被盖度、pH值以及电导率利用SPSS做Pearson相关分析(表4)。由表4可以看出,各微生物类群与建植年代呈负相关,除放线菌外,其他类群与植被盖度呈正相关,并且细菌与植被盖度呈显著正相关($P<0.05$),微生物总数与植被盖度呈极显著正相关($P<0.01$),真菌与土壤含水量呈极显著正相关($P<0.01$),与电导率呈显著正相关($P<0.05$),除放线菌与pH值呈正相关外,其他微生物类群与pH值呈负相关,但均不显著。

由此可见,各种生态因子对微生物的影响程度有所不同。在建植期初期,植被生长良好,土壤逐步恢复,主要是植被盖度、凋落物以及土壤无机盐对微生物活动有着重要的影响,故微生物数量与植被盖度、电导率呈正相关。土壤水分由土壤持水力、降雨、地表蒸发和植物蒸腾共同决定,植被盖度的大小与土壤含水量呈正相关,所以微生物数量与土壤含水量也呈正相关。从本研究看,随着建植年限的增长,植被类型也逐渐发生变化,多种退化指示植物的出现以及盖度、含水量等指标的变化都表明15年、20年人工草地已发生退化,故微生物类群数量与建植年代呈负相关。

表4　微生物数量与其生态因子的相关系数

Tab.4　Correlative coefficients between microbe numbers and ecological factors

微生物种类	建植年代	含水量	盖度	pH值	电导率
细菌	-0.671	0.805	0.936*	-0.460	0.773
真菌	-0.199	0.968**	0.721	-0.540	0.957*
放线菌	-0.624	-0.489	-0.032	0.801	-0.211
微生物总数	-0.789	0.672	0.898**	-0.262	0.705

**$P<0.01$,*$P<0.05$,$n=20$。

为了更好地说明土壤微生物数量与环境生态因子之间的关系,采用逐步回归拟合土壤微生物总量与各环境因子的数学模型:$Y_1=4.951+0.107X_1-0.226X_2$($R=0.998$,$F=228.633$,$P=0.004$),式中:$Y_1$为微生物总数;$X_1$为植被盖度;$X_2$为建植年代。植被盖度、建植年代对微生物总数的偏相关系数分别为0.898、-0.789,绝对值依次减小,且与植被盖度达到显著正相关,随着植被盖度的增加,土壤微生物数量也急剧增加。与建植年代呈负相关,回归系数绝对值大于植被盖度回归系数绝对值,表明建植年代也是影响微生物数量的一个重要因子。

3　讨　论

巴音布鲁克4、8、15、20年人工草地以及天然草地5种生境的土壤微生物类群组成中细菌所占比例最大,放线菌次之,真菌最少,因此,细菌对微生物总数的贡献率最大,即微生物总数变化与细菌数量变化类似,这与多数的研究结果一致(王少昆等,2008;王海英等,2008)。不同生境中草地土壤微生物的数量分布与其所处生境的土壤因子密切相关,该地区草地土壤呈碱性,适宜于偏碱性细菌生长繁殖,而不利于喜酸性环境的真菌生存,因此细菌数量最多,真菌最少。同时细菌所处优势地位与细菌类群组成的多样性和对不同时期植物残体分解利用过程中细菌各类群之间的更替有关(中国科学院南京土壤研究所微生物室,1985)。曹叶飞等(2008)在同一地区研究认为围栏内的土壤微生物数量约是围栏外的1.51倍,与本研究相比,微生物数量最多的4年人工草地土壤微生物数量约是天然草的1.47倍,建植20年的草地土壤微生物数量仅为天然草地的50%。由此表明,人工草地在建植初期对于草地的恢复起到举足轻重的作用,但是随着建植期的增长,草地开始发生退化。因此,建议在退化草地修复中应采取人工草地建植和其他修复措施(例如围栏封育、轮牧、休牧、施肥、补播等)相结合的方法。同时,本研究与单娜娜等(2001)以及顾峰雪等(2000)研究结果有所差异,他们认为植物种植时间越长,微生物数量越多,造成差异的原因除研究尺度的差异外,还与植物种类、研究区域自然环境状况有关。

另外,不同生境草地土壤微生物的数量分布与

所处生境的人为活动干扰也有密切联系,主要是各生境人为干扰活动(放牧等)存在一定差异,对微生物的数量分布也产生较大的影响(赵吉等,1996;高志英等,2004)。在土壤微生物的垂直分布上,5种生境的微生物数量多集中于上层土壤中,具有表聚性,微生物类群表现出随土层深度的加深而递减的趋势,与多数的研究结果一致(王启兰等,2004);微生物类群月动态变化上,细菌、真菌、放线菌都显示了相同的变化规律,即在8月达到最大值,9月最低,这主要是和研究区的气候状况有关,同时受到土壤、植被因子的影响。

细菌与植被盖度呈显著正相关($P<0.05$),微生物总数与植被盖度呈极显著正相关($P<0.01$);真菌与土壤含水量呈极显著正相关($P<0.01$),与电导率呈显著正相关($P<0.05$)。除放线菌与pH值呈正相关外,其他微生物类群均与pH值呈负相关但并不显著。影响微生物类群总数的主要生态因子是植被盖度及草地建植年限,这与王少昆等(2008)对科尔沁沙地土壤微生物的研究结果相似,但是他们认为各类微生物类群与土壤含水量呈负相关关系,与本研究有所差异,这可能是由于研究地点自然环境(气候状况和土壤质地)以及取样时间的差异所导致的。

草地植被、土壤中某个生态因子的改变都会引起微生物生态系统的改变,进而导致整个草地生态系统的改变。因此,在某种程度上土壤微生物(细菌)数量的变化也可以作为土壤质量、植被退化恢复的一项指标。另外,在草地的管理利用中,不仅要注意植被的开发利用,还要注意土壤的变化,不仅是土壤理化性质的变化还有微生物系统的变化,同时应根据其变化采取相应的恢复措施组合,为草地的可持续利用奠定基础。

参考文献

巴音布鲁克草原实验站. 1989. 巴音布鲁克草场类型特点、草场退化及其合理利用和改良研究工作报告. 干旱区研究(增刊),6(2):1-5.

曹成有,朱丽辉,富 瑶,等. 2007. 科尔沁沙质草地沙漠化过程中土壤微生物活性的变化. 生态学杂志,26(5):622-627.

曹叶飞,方光新,蒋平安,等. 2008. 长期围栏封育对巴音布鲁克山地草原土壤微生物的影响. 新疆农业科学,45(2):342-346.

陈 珊,张常钟,刘东波,等. 1995. 东北羊草草原土壤微生物生物量的季节变化及其与土壤生境的关系. 生态学报,15(1):91-94.

高志英,韩兴国,汪诗平. 2004. 放牧对草原土壤的影响. 生态学报,24(4):790-797.

顾峰雪,文启凯,潘伯荣,等. 2000. 塔克拉玛干沙漠腹地人工植被下土壤微生物的初步研究. 生物多样性,8(3):297-303.

何 容,王国兵,汪家社,等. 2009. 武夷山不同海拔植被土壤微生物量的季节动态及主要影响因子. 生态学杂志,28(3):394-399.

胡玉昆,李凯辉,阿德力麦地,等. 2007. 天山南坡高寒草地海波梯度上的植物多样性变化格局. 生态学杂志,26(2):182-186.

靳正忠,雷加强,徐新文,等. 2009. 塔里木沙漠公路防护林土壤微生物生物量与土壤环境因子的关系. 应用生态学报,20(1):51-57.

李新荣,贾玉奎,龙利群,等. 2001. 干旱半干旱地区土壤微生物结皮的生态学意义及若干研究进展. 中国沙漠,21(4):4-11.

吕桂芬. 1999. 科尔沁沙地土壤微生物区系季节动态的初步研究. 中国沙漠,19(增刊1):107-109.

尚占环,丁玲玲,龙瑞军,等. 2007. 江河源区退化高寒草地土壤微生物与地上植被及土壤环境的关系. 草业学报,16(2):34-40.

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

邵玉琴,赵 吉,包青海. 2001. 库布齐固定沙丘土壤微生物生物量的垂直分布研究. 中国沙漠,21(1):88-92.

邵玉琴,赵 吉,杨 劼. 2004. 恢复草地和退化草地土壤微生物类群数量的分布特征. 中国沙漠,24(2):223-226.

单娜娜,潘伯荣,文启凯,等. 2001. 塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地土壤微生物生态特征研究. 干旱区研究,18(4):52-56.

王海英,宫渊波,陈林武. 2008. 嘉陵江上游不同植被恢复模式土壤微生物及土壤酶活性的研究. 水土保持学报,22(3):172-177.

王启兰,曹广民,姜文波,等. 2004. 青海高寒草甸土壤放线菌区系研究. 微生物学报,44(6):733-736.

王少昆,赵学勇,左小安,等. 2008. 科尔沁沙地植物萌动期不同类型沙丘土壤微生物区系特征. 中国沙漠,28(4):696-700.

王艳超,李玉灵,王 辉,等. 2008. 不同植被恢复模式对铁尾矿微生物和酶活性的影响. 生态学杂志,27(10):1826-1829.

吴 楠,梁少民,王红玲,等. 2006. 动物践踏干扰对生物结皮中微生物生态分布的影响. 干旱区研究,23(1):50-55.

许光辉,郑洪元. 1986. 土壤微生物分析方法手册. 北京:农业出版社.

张 萍,郭辉军,刀志灵,等. 1999. 高黎贡山土壤微生物的数量和多样性. 生物多样性,7(4):297-302.

赵 吉,刘 萍,邵玉琴,等. 1996. 人为因素对草原土壤微生物和生物活性的影响. 内蒙古大学学报(自然科学版),27(4):568-572.

中国科学院南京土壤研究所微生物室. 1985. 土壤微生物研究法. 北京:科学出版社.

周 焱,徐宪根,王 丰,等. 2009. 武夷山不同海拔梯度土壤微生物生物量、微生物呼吸及其商值(qMB,qCO$_2$). 生态学杂志,28(2):265-269.

周智彬,李培军. 2003. 塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地土壤中微生物的生态分布及其与土壤因子间的关系. 应用生态学报,14(8):1246-1 250.

Balloni W, Favilli F. 1987. Effects of agricultural practices on the physical, chemical and biological properties of soils. Part I. Effect of some agricultural practices on the biological soil fertility// Barth HL, Hermite P, eds. Scientific Basis for Soil Protection in the European Community. Barking, Essex: Elsevier ASP: 161-179.

Brussaard L. 1994. An appraisal of the Dutch programme on soil ecology of arable farming systems (1985-1992). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **51**: 1-6.

作者简介 尹 伟,女,1984年生,硕士研究生。主要从事草地生态学研究。E-mail:yinwei1019@163.com

责任编辑 刘丽娟