

# 高寒草甸不同植被土壤微生物数量及微生物生物量的特征\*

王启兰\*\* 曹广民 王长庭

(中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008)

**摘要** 用稀释平板法和氯仿熏蒸法研究了藏高草草甸、小高草草甸、矮高草草甸、禾草草甸、杂类草草甸及金露梅灌丛土壤的微生物数量、生物量及有机质的变化特征。结果表明: 0~40 cm 土层细菌和放线菌数量、微生物生物量碳和土壤有机质含量均以藏高草草甸最高, 其微生物生物量及土壤有机质显著高于其它 5 种植被; 真菌数量以金露梅灌丛最高; 由表层到深层, 随着土壤深度的增加以上各项指标均呈下降趋势。通径分析表明: 土壤各生物环境因子之间存在着不同程度的相关性; 土壤微生物数量、生物量及土壤有机质含量均与土壤水分含量存在显著的相关关系, 说明土壤水分是调节高寒草甸生态系统土壤微生物代谢及物质转化的关键因子。

**关键词** 高寒草甸; 土壤微生物; 微生物生物量; 土壤有机质

中图分类号 S154.36 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2007)07-1002-07

**Quantitative characters of soil microbes and microbial biomass under different vegetations in alpine meadow.** WANG Qi-lan, CAO Guang-min, WANG Chang-ting (Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China). *Chinese Journal of Ecology* 2007 26(7):1002-1008.

**Abstract:** By using dilute plate counting and chloroform fumigation methods, this paper studied the quantitative characters of soil microbes, microbial biomass, and organic matter under the vegetations *Kobresia tibetica*, *K. pygmaea*, *K. humilis*, grass, forb, and *Potentilla fruticosa* shrub in alpine meadow ecosystem. The results showed that in 0-40 cm soil layer, the numbers of bacteria and actinomyces and the contents of microbial biomass C and organic matter were the highest in *K. tibetica* meadow, while the fungal number was the highest in *P. fruticosa* shrub meadow. The microbial biomass C and organic matter contents in *K. tibetica* meadow were obviously higher than those in the other five meadows. Path analysis indicated that there were varied degrees correlations among different bio-environmental factors, and the numbers of soil microbes as well as the contents of soil microbial biomass C and organic matter had significant correlations with soil moisture content, indicating that soil moisture could be a key factor regulating the metabolism of soil microbes and the transformation of substances in alpine meadow ecosystem.

**Key words:** alpine meadow; soil microbe; microbial biomass; soil organic matter.

## 1 引言

高寒草甸是青藏高原隆升后, 长期受高寒气候环境条件影响所形成的高原地带性植被类型(周兴

民和李健华, 1982), 多以寒冷潮湿中多年生草本植物群落为主。因不同地形部位、土壤温度、湿度、地下水、土壤性状等的综合影响, 使高寒草甸在不同地形部位形成了差异较大的金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛草甸、小高草(*Kobresia pygmaea*)草甸、矮高草(*K. humilis*)草甸、沼泽化藏高草(*K. tibetica*)草甸等植被类型, 其生产力也表现出明显的差别(王启基和周兴民, 1991; 王启基等, 1998)。由于近年来

\* 国家自然科学基金项目(40471133)、中国科学院资源环境领域野外台站基金和中国科学院西北高原生物研究所知识创新工程重点资助项目(cjc020144)。

\*\* 通讯作者 E-mail: wql@nwipb.ac.cn

收稿日期: 2006-07-28 接受日期: 2007-04-06

人类过度放牧和全球气候变暖等因素的干扰,高寒草甸逐年退化,形成杂类草(forbs)草甸乃至次生裸地。高寒草甸发育的高山草甸土壤富含有机质,土壤碳密度明显高于其它地域土壤(王绍强和周成虎,1999)。

高寒草甸是青藏高原上最主要的放牧利用草地资源之一,青藏高原的低温环境使得土壤有机物矿化分解慢,土壤缺乏速效氮和磷,尤其是在春季,植被生长受到氮、磷的限制(周兴民,2001)。土壤微生物是陆地生态系统中最活跃的成员,也是土壤有机质的活性部分,它们推动着生态系统的物质循环和能量流动,维持着生态系统的正常运转(Clark & Pawl,1970;张薇等,2005)。土壤中有有机物的分解、腐殖质的形成、养分转化等各种生化过程,都是在微生物的参与下完成的,所以土壤微生物是土壤养分的储存库和植物生长可利用养分的一个重要来源,是衡量土壤肥力水平和土壤养分资源生物有效性的重要活指标(赵吉等,2004;邵玉琴等,2005)。

本文选择中国科学院海北高寒草甸生态系统开放实验站(简称海北站)区具有代表性的草甸为对象,探讨其土壤微生物的数量、生物量和土壤有机质的变化特征,为揭示高寒草甸生态系统的结构和功能提供基础数据。

## 2 材料与方法

### 2.1 自然概况

海北站位于青藏高原东北隅的祁连山南坡谷地,37°29'—37°45'N,101°12'—101°23'E,海拔2900~3500m,属高原大陆性气候,无明显四季之分,仅有冷暖二季之别,暖季短暂而凉爽,冷季寒冷而漫长。年平均气温-1.7℃,年降水量约426~860mm,其中80%的降水集中于植物生长季的5—9月,蒸发量1160.3mm,无绝对无霜期。主要土壤类型为高山草甸土、高山灌丛草甸土和沼泽土,土壤呈有机质及全量养分丰富而速效养分贫乏的特点。植物群落结构简单,植物生长期短,生物生产力较低。选择区内具有代表性的矮嵩草草甸(Kh)、小嵩草草甸(Kp)、金露梅灌丛(P)、藏嵩草草甸(Kt)、禾草(G)草甸(矮嵩草草甸封育后演替形成)及杂类草草甸(F)(矮嵩草草甸退化后形成)等6种类型草甸作为研究样地。

### 2.2 研究方法

2.2.1 微生物数量测定 于2005年7月中旬植物

生长旺季(草盛期)在上述样地以“S”型取样方法分别采集0~10,10~20和20~40cm的土样,即各样地选5个采样区,样区内用土钻随机采5份土壤,相同土层组成1个混合样,各样地重复5次,挑取草根,过1mm土壤筛。土壤水分含量( $X_1$ )采用烘干法,微生物数量测定采用稀释平板法(中国科学院南京土壤研究所微生物室,1985),即细菌数量( $X_2$ )用牛肉膏蛋白胨琼脂,放线菌数量( $X_3$ )用改良高氏1号,真菌数量( $X_4$ )用马丁氏。

$$N(\text{个细胞} \cdot \text{g}^{-1} \text{干土}) = \frac{M \times D \times 20}{S\%}$$

式中: $N$ 为微生物数量; $M$ 为菌落平均数; $D$ 为稀释倍数; $S\%$ 为干土百分数。

2.2.2 微生物生物量测定 微生物生物量( $X_5$ )测定采用氯仿熏蒸法(Brookes *et al.*,1985;Vance *et al.*,1987)。

2.2.3 土壤有机质测定 土壤有机质( $Y$ )采用TOC-5000A型有机质分析仪测定。

### 2.3 数据处理

所有数据采用DPS 7.05统计软件进行分析处理。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同植被土壤微生物数量及生物量分布特征

由图1A可见6种植被类型土壤0~40cm层平均细菌数量以藏嵩草草甸最高,为 $8.68 \times 10^7$ 个 $\cdot \text{g}^{-1}$ ,金露梅灌丛次之,为 $2.39 \times 10^7$ 个 $\cdot \text{g}^{-1}$ ;小嵩草草甸、禾草草甸和矮嵩草草甸居中,分别为 $1.21 \times 10^7$ 、 $1.14 \times 10^7$ 和 $1.13 \times 10^7$ 个 $\cdot \text{g}^{-1}$ ;杂类草草甸最低,为 $8.73 \times 10^6$ 个 $\cdot \text{g}^{-1}$ 。随着土壤深度的增加,细菌数量逐渐降低,其中以藏嵩草草甸降幅最大,由0~10cm层的 $14.92 \times 10^7$ 个 $\cdot \text{g}^{-1}$ 迅速降为10~20cm层的 $7.57 \times 10^7$ 个 $\cdot \text{g}^{-1}$ ,至20~40cm层的 $3.552 \times 10^7$ 个 $\cdot \text{g}^{-1}$ ,每层降幅近50%,其它植被降幅较小,只有25%~45%。

从图1B可见0~40cm层平均放线菌数量,以藏嵩草沼泽草甸最高,为 $1.18 \times 10^6$ 个 $\cdot \text{g}^{-1}$ ,小嵩草草甸、矮嵩草草甸及禾草草甸居中,分别为 $1.03 \times 10^6$ 、 $1.02 \times 10^6$ 和 $1.00 \times 10^6$ 个 $\cdot \text{g}^{-1}$ ;杂类草草甸及金露梅灌丛最低,分别为 $6.52 \times 10^5$ 和 $5.38 \times 10^5$ 个 $\cdot \text{g}^{-1}$ 。随着土壤深度的增加,放线菌数量逐渐下降,除金露梅灌丛每层降幅在30%左右外,其它植被显示出由表层到次表层降幅很大,次表层

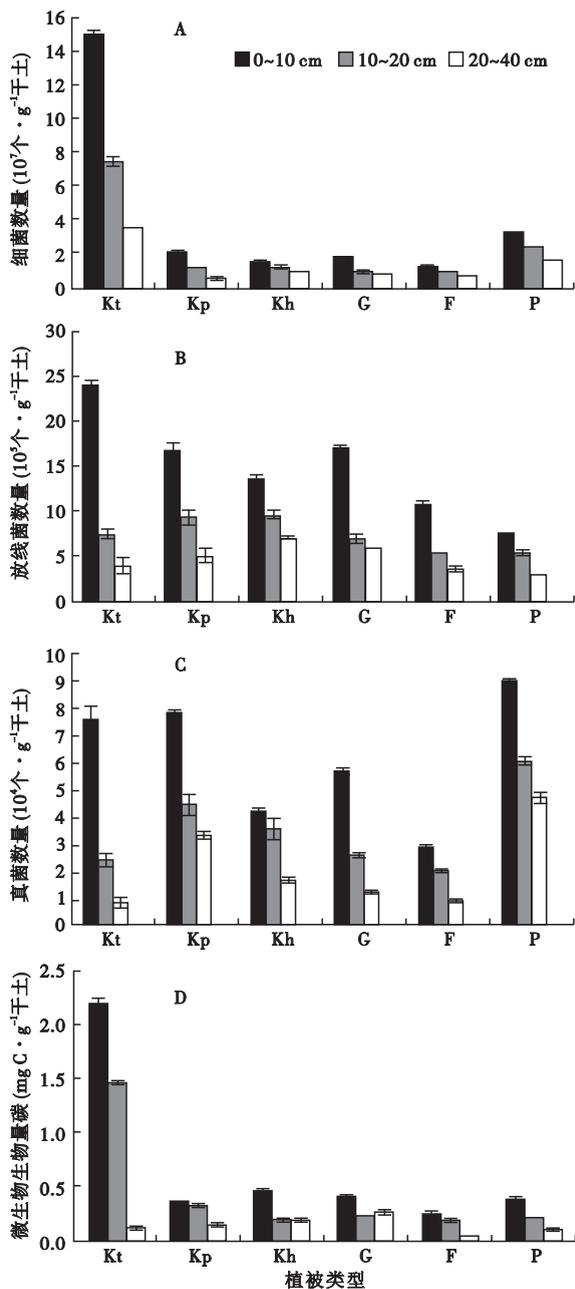


图1 不同植被类型土壤微生物数量及生物量

Fig. 1 Numbers and biomass of microorganisms in soil of different vegetations

Kh、Kp、P、Kt、G和F分别代表矮蒿草甸、小蒿草甸、金露梅灌丛、藏蒿草甸、禾草甸及杂类草甸。

到深层降幅较小的趋势。如藏蒿草甸表层为  $2.38 \times 10^6$  个  $\cdot$   $g^{-1}$ , 次表层为  $7.64 \times 10^5$  个  $\cdot$   $g^{-1}$ , 深层为  $3.93 \times 10^5$  个  $\cdot$   $g^{-1}$ ; 禾草甸表层为  $1.691 \times 10^6$  个  $\cdot$   $g^{-1}$ , 次表层为  $7.14 \times 10^5$  个  $\cdot$   $g^{-1}$ , 深层为  $6.09 \times 10^5$  个  $\cdot$   $g^{-1}$ 。

从图1C可见  $0 \sim 40$  cm层平均真菌数量, 以金露梅灌丛最高, 为  $6.63 \times 10^4$  个  $\cdot$   $g^{-1}$ ; 小蒿草甸

次之, 为  $5.22 \times 10^4$  个  $\cdot$   $g^{-1}$ ; 藏蒿草甸、矮蒿草甸及禾草甸居第3, 分别为  $3.63 \times 10^4$ 、 $3.17 \times 10^4$  和  $3.17 \times 10^4$  个  $\cdot$   $g^{-1}$ ; 杂类草甸最低, 为  $1.98 \times 10^4$  个  $\cdot$   $g^{-1}$ 。由土壤表层到深层, 各植被土壤中真菌数量均逐渐下降, 尤其以藏蒿草甸降幅最明显, 表层为  $7.59 \times 10^4$  个  $\cdot$   $g^{-1}$ , 次表层为  $2.39 \times 10^4$  个  $\cdot$   $g^{-1}$ , 深层为  $0.91 \times 10^4$  个  $\cdot$   $g^{-1}$ , 各层降幅均达55%以上; 杂类草甸降幅最小, 表层为  $2.96 \times 10^4$  个  $\cdot$   $g^{-1}$ , 次表层为  $2.02 \times 10^4$  个  $\cdot$   $g^{-1}$ , 深层为  $0.96 \times 10^4$  个  $\cdot$   $g^{-1}$ ; 其它植被的降幅居中。

从图1D可见  $0 \sim 40$  cm层平均的微生物生物量碳, 以藏蒿草甸最高, 为  $1.26$   $mg \cdot g^{-1}$ ; 以禾草甸、矮蒿草甸、小蒿草甸及金露梅灌丛次之, 分别为  $0.31$ 、 $0.28$ 、 $0.28$  和  $0.24$   $mg \cdot g^{-1}$ ; 杂类草甸最低, 为  $0.17$   $mg \cdot g^{-1}$ 。藏蒿草甸中, 微生物生物量的96%以上集中分布在  $0 \sim 20$  cm层, 只有4%分布在  $20 \sim 40$  cm层, 其中  $0 \sim 10$  cm为  $2.21$   $mg \cdot g^{-1}$ ,  $10 \sim 20$  cm为  $1.46$   $mg \cdot g^{-1}$ ,  $20 \sim 40$  cm为  $0.12$   $mg \cdot g^{-1}$ ; 其它植被土壤中, 随着土壤深度的增加, 微生物生物量逐渐降低, 但降低幅度较小, 如小蒿草甸土壤  $0 \sim 10$  cm为  $0.38$   $mg \cdot g^{-1}$ ,  $10 \sim 20$  cm为  $0.31$   $mg \cdot g^{-1}$ ,  $20 \sim 40$  cm为  $0.14$   $mg \cdot g^{-1}$ ; 金露梅灌丛土壤  $0 \sim 10$  cm为  $0.39$   $mg \cdot g^{-1}$ ,  $10 \sim 20$  cm为  $0.23$   $mg \cdot g^{-1}$ ,  $20 \sim 40$  cm为  $0.11$   $mg \cdot g^{-1}$ 。藏蒿草甸土壤的微生物生物量显著高于其它5种植被 ( $P < 0.01$ ), 禾草、小蒿草和矮蒿草甸的微生物生物量显著高于杂类草甸 ( $P < 0.05$ )。

### 3.2 不同植被土壤有机质含量

从图2可见  $0 \sim 40$  cm层平均有机质含量以藏蒿草甸最高, 为  $247.07$   $g \cdot kg^{-1}$ ; 金露梅灌丛、小蒿草甸和禾草甸次之, 分别为  $92.55$ 、 $84.15$  和  $84.54$   $g \cdot kg^{-1}$ ; 矮蒿草甸和杂类草甸最低, 为  $62.44$  和  $60.07$   $g \cdot kg^{-1}$ 。大多数植被随着土壤深度的增加, 有机质含量逐渐降低的趋势, 如矮蒿草甸土壤  $0 \sim 10$  cm为  $100.65$   $g \cdot kg^{-1}$ ,  $10 \sim 20$  cm为  $72.42$   $g \cdot kg^{-1}$ ,  $20 \sim 40$  cm为  $69.22$   $g \cdot kg^{-1}$ ; 杂类草甸土壤  $0 \sim 10$  cm为  $67.26$   $g \cdot kg^{-1}$ ,  $10 \sim 20$  cm为  $59.55$   $g \cdot kg^{-1}$ ,  $20 \sim 40$  cm为  $53.42$   $g \cdot kg^{-1}$ 。而金露梅灌丛土壤表现出  $10 \sim 20$  cm最高, 为  $100.20$   $g \cdot kg^{-1}$ ,  $20 \sim 40$  cm次之, 为  $89.10$   $g \cdot kg^{-1}$ ,  $0 \sim 10$  cm最低, 为  $88.37$   $g \cdot kg^{-1}$ , 且每层的有机质含量均较高。藏蒿草甸土壤的有机质90.81%集中在  $0 \sim 20$  cm层, 且显著高于其它5种植被土壤有机质

( $P < 0.01$ ) 金露梅灌丛、禾草草甸和小嵩草草甸土壤的有机质明显高于杂类草草甸和矮嵩草草甸的土壤有机质含量( $P < 0.05$ )。

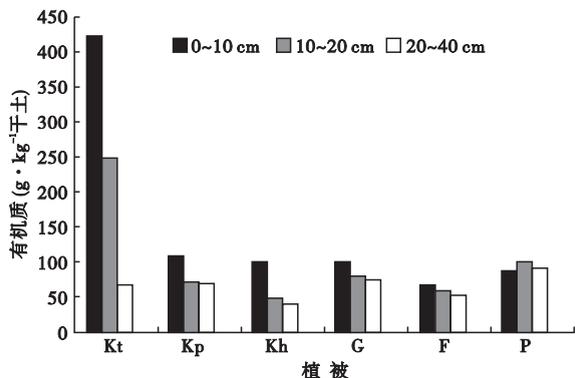


图2 不同植被土壤有机质含量

Fig.2 Organic matter contents in soil of different vegetation types

### 3.3 土壤有机质与环境因子之间的相关性

在藏嵩草沼泽草甸 0~10 cm 土壤水分含量( $X_1$ )与土壤有机质( $Y$ )呈极显著的正相关( $r_{1Y} = 0.9792$ ,  $P < 0.01$ )。细菌( $X_2$ )与真菌数量( $X_4$ )、放线菌数量( $X_3$ )与微生物生物量( $X_5$ )之间呈显著的正相关( $r_{24} = 0.9608$ ,  $P < 0.01$ ;  $r_{35} = 0.9270$ ,  $P < 0.05$ )。其余因子之间相关性未达显著水平( $P > 0.05$ )。在 10~20 cm 层,  $X_3$  与  $X_5$ 、 $Y$  均显示出较强的相关性( $r_{35} = -0.9926$ ,  $P < 0.01$ ;  $r_{3Y} = 0.9186$ ,  $P < 0.05$ )。  $X_5$  与  $Y$  显著相关( $r_{5Y} = 0.9447$ ,  $P < 0.05$ )。在 20~40 cm 层,  $X_1$  与  $X_3$ 、 $X_4$  呈显著的负相关( $r_{13} = -0.9035$ ,  $P < 0.05$ ;  $r_{14} = -0.9405$ ,  $P < 0.05$ )。沼泽草甸长期处于积水状态,气性的土壤环境抑制了好气性微生物的代谢活动,从而阻止了土壤有机质的有效降解,使得沼泽草甸土壤有机质明显高于其它植被。从微生物数量可见,沼泽草甸细菌和放线菌数量很高,而真菌数量低,说明沼泽土壤微生物生物量的主要贡献者不是真菌,主要是细菌或放线菌,因不同层次而异。

在小嵩草草甸土壤中 0~10 cm 土层除  $X_1$  因子外,其它因子之间均显示出不同程度的相关性( $r_{23} = 0.9998$ ,  $r_{25} = 0.9882$ ,  $r_{2Y} = -0.9634$ ,  $r_{35} = -0.9911$ ,  $r_{3Y} = -0.9671$ ,  $r_{45} = 0.9859$ ,  $r_{4Y} = 0.9738$ ,  $r_{5Y} = 0.9836$ ,  $P < 0.01$ ;  $r_{24} = -0.949$ ,  $r_{34} = -0.9552$ ,  $P < 0.05$ )。在 10~20 cm 层,  $X_2$  与  $Y$  显著相关( $r_{2Y} = -0.9102$ ,  $P < 0.05$ )。  $X_3$  分别与  $X_4$ 、 $X_5$  表现出显著的相关性( $r_{34} = -0.9835$ ,  $P < 0.01$ ;

$r_{35} = 0.8815$ ,  $P < 0.05$ )。  $X_4$  与  $X_5$  也显著相关( $r_{45} = -0.9283$ ,  $P < 0.05$ )。20~40 cm 层,  $X_2$  与  $X_3$  呈极显著相关( $r_{23} = 0.9996$ ,  $P < 0.01$ )。小嵩草草甸分布在山地阳坡,植被盖度仅 70% 多,地表凋落物少而地表温度高,表层土壤十分干燥,凋落物及死根的降解和腐殖化过程缓慢,由于长期得不到分解,在土壤表层形成 10~30 cm 的草毡层,这层又阻隔了大气降水的下渗,从而造成了下层土壤水分的亏乏,这种恶性循环使土壤有机质积累,并且微生物生物量并不高。

在矮嵩草草甸土壤中 0~10 cm 层  $X_1$  与  $Y$ 、 $X_3$  与  $X_4$  分别呈极显著的相关性( $r_{1Y} = 0.9842$ ,  $r_{34} = 0.9878$ ,  $P < 0.01$ )。  $X_1$  与  $X_5$ 、 $X_5$  与  $Y$  分别呈显著的相关性( $r_{15} = 0.9490$ ,  $r_{5Y} = 0.9562$ ,  $P < 0.05$ )。在 10~20 cm 层中,只有  $X_1$  与  $X_3$  显著相关( $r_{13} = 0.9977$ ,  $P < 0.01$ )。其它因素之间均未达到显著的相关性。在 20~40 cm 层中,  $X_2$  分别与  $X_3$ 、 $X_5$  有显著的相关关系( $r_{23} = 0.9449$ ,  $r_{25} = -0.9429$ ,  $P < 0.05$ )。

在禾草草甸土壤中 0~10 cm 土层只有  $X_2$  与  $X_4$  因子之间存在显著的相关性( $r_{24} = -0.9449$ ,  $P < 0.05$ )。其余因素之间相关性不明显。在 10~20 cm 土层,因子  $X_2$  和  $X_3$ 、 $X_4$  和  $Y$  之间分别显示出明显的相关性( $r_{23} = 0.9148$ ,  $r_{4Y} = -0.925$ ,  $P < 0.05$ )。在 20~40 cm 层,只有  $X_2$  和  $Y$  因子之间存在显著的相关性( $r_{2Y} = 0.9657$ ,  $P < 0.01$ )。矮嵩草草甸和禾草草甸分布在滩地,土壤水分适宜,各类微生物繁殖代谢活动都比较旺盛,加之地表凋落物较少,草本覆盖度低,所以在这 2 种植被中土壤有机质积累量均较低而微生物生物量相对较高。

在杂类草草甸土壤中,在 0~10 cm 土层,  $X_1$  与  $X_4$  之间显著相关( $r_{14} = -0.8985$ ,  $P < 0.05$ )。  $X_2$  与  $X_4$  之间呈极显著的相关性( $r_{24} = -0.8996$ ,  $P < 0.05$ )。  $X_3$  与  $Y$  也呈现显著的相关性( $r_{3Y} = -0.8861$ ,  $P < 0.05$ )。在 10~20 cm 层,  $X_1$  与  $X_2$ 、 $X_5$  呈极显著的相关性( $r_{12} = 0.9675$ ,  $r_{15} = -0.9699$ ,  $P < 0.01$ )。  $X_3$  与  $X_4$  也呈极显著的相关性( $r_{34} = -1$ ,  $P < 0.01$ )。  $X_2$  与  $X_5$  呈显著的相关性( $r_{25} = -0.9131$ ,  $P < 0.05$ )。在 20~40 cm 层,  $X_2$  与  $X_3$  之间呈极显著的相关性( $r_{23} = 0.9934$ ,  $P < 0.01$ )。杂类草草甸是嵩草草甸在过度放牧情况下,草皮层发生剥蚀、脱落,鼠类活动猖獗,在鼠类破坏地段,杂类草鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)、细叶亚菊(*Ajain tenuifolia*)、甘肃马先蒿(*Pedicularis kansuensis*)

等逐渐形成优势植物群落,部分地段成为次生裸地“黑土滩”,土壤养分低下,持水性能差,各类微生物数量、生物量及土壤有机质积累量都较低。

在金露梅灌丛土壤中,0~10 cm层, $X_1$ 与 $X_4$ 、 $X_3$ 与 $Y$ 分别显示出明显的相关性( $r_{14} = -0.9448$ ,  $r_{3y} = -0.9399$ ,  $P < 0.05$ );在10~20 cm层, $X_1$ 与 $X_2$ 和 $X_5$ 显示出较好的相关性( $r_{12} = -0.8904$ ,  $r_{15} = 0.9065$ ,  $P < 0.05$ ), $X_3$ 与 $X_4$ 表现出极显著的相关性( $r_{34} = -0.9666$ ,  $P < 0.01$ );在20~40 cm层,只有 $X_2$ 与 $X_3$ 显示出明显的相关性( $r_{23} = 0.9337$ ),其余因子之间均未达到显著的相关性。金露梅灌丛分布在山地阴坡,地表覆盖物较多,植物组成丰富,虽然有机质含量高,但其微生物生物量却较低,这可能与其湿冷的环境有关。

### 3.4 通径分析

由于各个土壤因子的数量变动范围不同,从逐

步回归中不能直观地看出哪个因子对土壤有机质的影响最明显,而通过标准化回归系数的方法计算通径系数,将相关系数分解为直接通径系数与间接通径系数的代数和,通过比较直接通径系数的大小及其显著水平,就能直观看出各个因子对有机质的影响作用(高之仁,1986;杨允菲和葛滢,1990)。

由表1可见,藏嵩草沼泽草甸土壤中,0~10 cm层对 $Y$ 有显著影响的因子为 $X_1$ 和 $X_4$ ,10~40 cm层显著影响 $Y$ 的土壤因子为 $X_4$ 和 $X_5$ 。表明在土壤表层, $X_1$ 和 $X_4$ 对 $Y$ 的直接和间接效应均非常显著,其它土壤环境因素对 $Y$ 的影响甚微。在10~20和20~40 cm层, $X_5$ 及 $X_4$ 对 $Y$ 有明显的直接和间接效应,但在20~40 cm层,上述二因子对 $Y$ 的 $R^2$ 虽达显著水平, $Pe$ 仍较大,说明还有未考虑的其它土壤因素(如地温、pH等)这些因子对 $Y$ 的影响也不可忽略。

表1 土壤有机质与土壤环境因子的通径分析

Tab. 1 Path analysis on soil organic matter to soil environment factors

植被	土壤深度 (cm)	土壤因子 $X_i$	决定系数 $R^2$	显著性	直接通径系数 $P_{i \rightarrow Y}$	间接通径系数 $P_{i \rightarrow j \rightarrow Y}$	剩余通径系数 $Pe$	
藏嵩草草甸	0~10	$X_1$	0.9999	0.001**	1.0668	$P_{1 \rightarrow 4 \rightarrow Y} = 0.4228$	0.0056	
		$X_4$			-0.2210	$P_{4 \rightarrow 1 \rightarrow Y} = -0.0876$		
	10~20	$X_4$	0.9991	0.001**	0.3337	$P_{4 \rightarrow 5 \rightarrow Y} = -0.0690$		0.0312
		$X_5$			1.0137	$P_{5 \rightarrow 4 \rightarrow Y} = -0.2096$		
	20~40	$X_4$	0.8001	0.029*	0.8818	$P_{4 \rightarrow 5 \rightarrow Y} = -0.6966$		0.4471
		$X_5$			1.4091	$P_{5 \rightarrow 4 \rightarrow Y} = -1.1131$		
小嵩草草甸	0~10	$X_1$	0.9904	0.001**	-0.1641	$P_{1 \rightarrow 5 \rightarrow Y} = 0.3527$	0.0979	
		$X_5$			0.9207	$P_{5 \rightarrow 1 \rightarrow Y} = 0.0629$		
	10~20	$X_1$	0.9999	0.001**	0.4194	$P_{1 \rightarrow 2 \rightarrow Y} = 0.1326$		0.0002
		$X_2$			-0.8443	$P_{2 \rightarrow 1 \rightarrow Y} = -0.0659$		
	20~40	$X_1$	0.9688	0.017*	-0.8306	$P_{1 \rightarrow 5 \rightarrow Y} = 0.7971$		0.1767
		$X_5$			-1.2661	$P_{5 \rightarrow 1 \rightarrow Y} = 0.5229$		
矮嵩草草甸	0~10	$X_1$	0.9930	0.001**	1.2459	$P_{1 \rightarrow 2 \rightarrow Y} = -0.2617$	0.0837	
		$X_2$			0.3048	$P_{2 \rightarrow 1 \rightarrow Y} = -1.0697$		
	10~20	$X_3$	0.9370	0.021*	-0.5239	$P_{3 \rightarrow 5 \rightarrow Y} = 0.3282$		0.2510
		$X_5$			1.0032	$P_{5 \rightarrow 3 \rightarrow Y} = -0.1714$		
	20~40	$X_1$	0.9979	0.001**	0.7402	$P_{1 \rightarrow 4 \rightarrow Y} = -0.2488$		0.0462
		$X_4$			0.9046	$P_{4 \rightarrow 1 \rightarrow Y} = -0.2036$		
禾草草甸	0~10	$X_1$	0.9406	0.019**	0.9841	$P_{1 \rightarrow 5 \rightarrow Y} = 0.8169$	0.2438	
		$X_5$			1.2570	$P_{5 \rightarrow 1 \rightarrow Y} = -0.6396$		
	10~20	$X_1$	0.8659	0.026**	-0.2376	$P_{1 \rightarrow 4 \rightarrow Y} = -0.2493$		0.3662
		$X_4$			-0.8313	$P_{4 \rightarrow 1 \rightarrow Y} = -0.0712$		
	20~40	$X_2$	0.9999	0.001**	1.0472	$P_{2 \rightarrow 4 \rightarrow Y} = -0.0815$		0.0035
		$X_4$			-0.2723	$P_{4 \rightarrow 2 \rightarrow Y} = 0.3134$		
杂类草草甸	0~10	$X_3$	0.9999	0.001**	-0.8590	$P_{3 \rightarrow 5 \rightarrow Y} = -0.0271$	0.0047	
		$X_5$			0.4643	$P_{5 \rightarrow 3 \rightarrow Y} = 0.0501$		
	10~20	$X_1$	0.9519	0.001**	2.8081	$P_{1 \rightarrow 2 \rightarrow Y} = -1.9810$		0.2194
		$X_2$			-2.0474	$P_{2 \rightarrow 1 \rightarrow Y} = 2.7169$		
	20~40	$X_1$	0.6651	0.064	0.9785	$P_{1 \rightarrow 3 \rightarrow Y} = -0.5441$		0.5787
		$X_3$			0.8789	$P_{3 \rightarrow 1 \rightarrow Y} = -0.6057$		
金露梅灌丛	0~10	$X_2$	0.9973	0.001**	-0.3532	$P_{2 \rightarrow 3 \rightarrow Y} = 0.3089$	0.0521	
		$X_3$			-1.0444	$P_{3 \rightarrow 2 \rightarrow Y} = 0.1045$		
	10~20	$X_2$	0.9647	0.018*	1.5606	$P_{2 \rightarrow 5 \rightarrow Y} = -0.8614$		0.1879
		$X_5$			1.1036	$P_{5 \rightarrow 2 \rightarrow Y} = -1.2181$		
	20~40	$X_2$	0.9883	0.001**	0.8164	$P_{3 \rightarrow 5 \rightarrow Y} = 0.0057$		0.1082
		$X_5$			0.5590	$P_{5 \rightarrow 3 \rightarrow Y} = -0.0083$		

小嵩草草甸土壤中,影响  $Y$  的主要因素为  $X_1$ 、 $X_2$  和  $X_5$ 。在 0~10 cm 层  $X_5$  直接效应大于  $X_1$ ,而  $X_1$  的间接效应大于  $X_5$ ,说明  $X_5$  对  $Y$  的主要贡献表现为直接效应, $X_1$  不仅直接影响  $Y$ ,还通过  $X_5$  调节  $Y$  的大小。在 10~20 和 20~40 cm 层, $X_1$  虽因层次不同表现出相反的作用,但对  $Y$  的影响均非常显著。说明在小嵩草草甸, $X_1$  是调控  $Y$  的关键因素,其次因素为  $X_5$  和  $X_2$ ,其余因素的影响较小。

在矮嵩草草甸土壤中,决定  $Y$  大小的关键因素因层次而异,分别为  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_5$  和  $X_4$ 。 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_4$  和  $X_5$  表现出明显的正直接效应和间接负效应, $X_3$  则相反。在 0~10 和 10~20 cm 层,剩余途径系数均较大,其它土壤因素对  $Y$  也存在一定的影响。

在禾草草甸土壤中,影响  $Y$  的主要因素为  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_4$  和  $X_5$ 。 $X_1$  和  $X_4$  表现出直接负效应, $X_2$  和  $X_5$  为直接正效应,虽 3 层土壤中  $R^2$  均达显著水平,但 0~10 和 10~20 cm 层仍有其它土壤环境因素干扰着  $Y$  的转化。

在杂类草草甸土壤中,影响  $Y$  的显著因素为  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  和  $X_5$ 。表层由  $X_3$  和  $X_5$  的直接效应决定着  $Y$  的大小。10~20 和 20~40 cm 层由  $X_1$ 、 $X_2$  和  $X_3$  通过直接和间接作用调节  $Y$  的高低,其它土壤环境因素对  $Y$  的影响也不容忽视。

金露梅灌丛土壤中,影响  $Y$  的主要因素为  $X_2$ 、 $X_3$  和  $X_5$ 。在 0~10 cm 层其表现为直接负效应和间接正效应,在 10~40 cm 层,均表现出直接正效应和间接负效应或间接效应不显著。3 层土壤中虽  $R^2$  均极显著, $P_e$  均  $> 0.05$ ,表明其它土壤因素也调节着  $Y$  的高低。

#### 4 讨论

土壤微生物在参与土壤有机物分解与合成的同时,还同化土壤有机质和土壤中的一些矿质养分构成其躯体,微生物固持的这些养分在其死亡后可发生再矿化,成为矿质养分(Jenkinson, 1988)。由于凋落物及死根的腐解丰富了土壤的碳源,植物根系的分布直接影响土壤中有机碳的垂直分布(Jobbagy & Jackson, 2002)。土壤有机质含量除受温度、湿度、土壤理化性质、营养状况影响外,植物的群落类型也是其重要的制约因素(刘景双等, 2003)。藏嵩草沼泽草甸由于土壤水分含量高,土壤 pH 偏碱性,使土壤表层的好气和兼性厌气性细菌和放线菌大量繁殖,形成表层微生物生物量高,深层生物量相对低的

格局。土壤表层适宜的水分、通气和养分状况使微生物活动旺盛,促进了植物残体及地表凋落物分解及腐殖化,加快了土壤有机质的积累。所以在 0~10 cm 层土壤水分与土壤有机质显著相关,途径也显著高( $P_{1 \rightarrow Y} = 1.0668$ ,  $P_{1 \rightarrow 4 \rightarrow Y} = 0.4228$ )。深层土壤水分长期饱和状态,水分胁迫使养分资源的空间异质性降低,资源比率的空间复杂性减小,地下生产力增加(王长庭等, 2005)。但温度低和水热条件的不一致,制约了土壤微生物的代谢及土壤酶的活性,从而阻碍了有机物的降解及有机质的转化。

小嵩草草甸,土壤干旱缺水,水分状况又成为影响土壤微生物量的重要因素。土壤有机质含量与土壤微生物量呈正相关(张成娥等, 1998; 孙维和赵吉, 2002),植物凋落物、死根等有机物料的降解和有机质化,受环境温度和湿度的影响较大(王启兰和姜文波, 2001; 王启兰等, 2004)。本研究表明,小嵩草草甸的真菌和放线菌数量均较高,土壤水分与土壤微生物等土壤因素无明显的相关性,其直接途径系数为明显的负效应,说明干旱降低了微生物的代谢活性,使有机残体不能有效降解,导致土壤草毡层的形成,土壤有机质不能得到明显的补充。

Waldle(1992)、张于光等(2006)认为,即使土壤性质相似,不同植物群落能够维持的微生物量差异也较大,归还土壤的植物残体数量和质量上的差异,是造成土壤有机质、微生物量差异较大的原因。矮嵩草草甸、禾草草甸均分布在阳坡滩地,其植物群落及盖度不同,但因土壤水分适中,温度较高,真菌和放线菌数量相对较高,微生物生物量也较高,使土壤有机质的周转加快,有机质积累量较低。杂类草草甸也分布在山前滩地,因其地表多裸露,土壤较干燥,加之植被盖度小,土壤养分贫瘠,微生物数量较前二者低,微生物生物量及有机质含量均较低,10 cm 以下土壤有石砾,土壤持水性差。不同的微生物类群与土壤水分、土壤有机质呈现不同程度的相关性,微生物类群之间也表现出一定的相关关系,表明微生物类群之间存在着对养分等土壤因子的竞争和互为利用关系。此 3 类草甸土壤中,不同层次的剩余途径系数均较大,土壤有效养分、土壤酶等因素可能影响土壤有机质及微生物的代谢繁殖,这有待于进一步探讨。

金露梅灌丛地处阴坡,土壤温度较低,土壤深处富含永冻层解冻后的水分,土壤含水量较大,地上植被种类丰富,其真菌数量显著较其它植被高,各类微

生物种类较多,虽微生物生物量较低,但湿润的环境条件有利于枯枝落叶的降解和土壤有机质的积累,使之仅次于沼泽草甸。李香真等(2002)认为土壤有机质水平高,微生物所受胁迫小,有利于微生物群落的发展。在湿度适宜的情况下,一般土壤微生物量与温度呈正相关性。金露梅灌丛土壤有机质含量较高,但其低的土壤温度抑制了微生物的繁殖代谢活性,使土壤微生物生物量处于较低的水平。

## 5 结 语

不同植被类型土壤的微生物数量、生物量及有机质变化特征基本一致,随着土壤深度的增加以上各项指标均呈下降趋势。

0~40 cm 土层细菌数量、放线菌数量、微生物生物量碳和有机质含量均以藏嵩草草甸土壤为最高,且其微生物生物量及土壤有机质显著高于其它5种植被土壤。真菌数量以金露梅灌丛土壤最高。

土壤生物环境因子之间存在着不同程度的相关性,多数植被类型土壤微生物数量、生物量及土壤有机质含量均与土壤水分存在着显著的相关关系,说明土壤水分是调节高寒草甸生态系统土壤微生物代谢及物质转化的关键因子。

## 参考文献

高之仁. 1986. 数量遗传学. 成都:四川大学出版社:198-226.

李香真,曲秋皓. 2002. 蒙古高原草原土壤微生物量碳氮特征. 土壤学报,39(1):97-104.

刘景双,杨继松,于君宝,等. 2003. 三江平原沼泽湿地土壤有机碳的垂直分布特征研究. 水土保持学报,17(3):5-8.

邵玉琴,敖晓兰,宋国宝,等. 2005. 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. 生态学杂志,24(5):578-580.

孙维,赵吉. 2002. 不同草原生境下的土壤微生物生物量研究. 内蒙古农业大学学报,23(1):29-31.

王长庭,龙瑞军,王启基,等. 2005. 不同类型高寒草地群落物种特征和均匀度的重要性. 草地学报,13(4):320-323.

王启基,王文颖,邓自发. 1998. 青海海北地区高山嵩草草甸植物群落生物量动态及能量分配. 植物生态学报,22(3):222-230.

王启基,周兴民. 1991. 高寒矮嵩草草甸禾草种群的生长发育节律及环境适应性. 植物生态学与地植物学学报,15(2):168-176.

王启兰,姜文波,等. 2001. 青藏高原金露梅灌丛与矮嵩草草甸枯枝落叶的分解作用. 草地学报,9(2):128-132.

王启兰,曹广民,姜文波. 2004. 高寒湿地植物残体降解的动态分析. 草业学报,13(4):39-44.

王绍强,周成虎. 1999. 中国陆地土壤有机碳库的估算. 地理研究,18(4):349-356.

杨允菲,葛滢. 1990. 纤毛鹅观草种群籽粒产量性状相关因素的多元分析. 草业科学,7(2):47-51.

张成娥,陈小莉,郑粉莉. 1998. 子午岭区不同环境土壤微生物量与肥力关系研究. 生态学报,18(2):218-222.

张薇,魏海雷,高洪文,等. 2005. 土壤微生物多样性及其环境影响因子研究进展. 生态学杂志,24(1):48-52.

张于光,张小全,肖焯. 2006. 米亚罗林区土地利用变化对土壤有机碳和微生物量碳的影响. 应用生态学报,17(11):2029-2033.

赵吉,郭婷,邵玉琴. 2004. 内蒙古典型草原土壤微生物生物量及其周转与流通量的初步研究. 内蒙古大学学报(自然科学版),35(6):673-676.

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.

周兴民. 2001. 中国高草草甸. 北京:科学出版社.

周兴民,李健华. 1982. 海北高寒草甸生态系统定位站的主要植被类型及其地理分布规律//夏武平. 高寒草甸生态系统. 兰州:甘肃人民出版社:9-18.

Brookes PC, Landman A, Pruden G, et al. 1985. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 17:837-842.

Clark FE, Pawl EA. 1970. The microflora of grassland. *Advances in Agronomy*, 22:375-435.

Jenkinson DS. 1988. Determination of microbial biomass carbon and nitrogen in soil//Wilson JR. *Advances in Nitrogen Cycling in Agricultural Ecosystems*. Wallingford: CAB International:368-386.

Jobbagy EG, Jackson RB. 2002. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10:423-436.

Vance ED, Brookes PC, Jenkinson DS. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 19:703-707.

Wardle DA. 1992. A comparative assessment of factors which influence microbial and nitrogen levels in soil. *Biological Reviews*, 67:321-358.

作者简介 王启兰,女,1964年生,副研究员。主要从事土壤微生物生态学研究,发表论文20余篇。E-mail:wql@nwipb.ac.cn  
责任编辑 王伟