

## 若尔盖高寒草地微地形的土壤微生物群落多样性特征

江聪<sup>1</sup>, 简小枚<sup>2</sup>, 杜勇<sup>2</sup>, 陈毅萍<sup>3</sup>, 税伟<sup>2,4</sup>

(1. 福州大学生物科学与工程学院, 福建 福州 350116; 2. 福州大学环境与资源学院, 福建 福州 350116;  
3. 厦门大学环境与生态学院, 福建 厦门 361102; 4. 美国西密歇根大学地理系, 卡拉马祖 49000)

**摘要:** 结合坡面微地形变化, 从土壤微生物群落多样性角度研究典型缓丘区不同坡位上土壤微生物群落特征, 了解微地形生境下土壤微生物群落变化趋势。研究表明, 土壤微生物群落培养的平均颜色变化率(AWCD)增长曲线呈现中坡位>坡顶>下坡位>上坡位>坡底的规律, 中坡位土壤微生物群落代谢活性最高, 坡底土壤微生物群落对基质的利用能力最低; 在土壤微生物多样性指数比较中发现, 除 McIntosh 均一度指数变化不显著外, 其余土壤微生物多样性指数在不同坡位上存在显著差异。其中, 中坡位的 Shannon 丰富度指数及 Simpson 优势度指数最大, 显著高于坡底指数值( $P<0.05$ ); 对土壤微生物群落碳源利用特征分析, 氨基酸类利用率变化明显大于其他碳源, 而胺类及酚酸类的利用程度较低, 表明氨基酸类是土壤微生物利用的主要碳源; 通过主成分分析发现, 不同坡位的土壤微生物群落对碳源利用具有选择性, 糖类、氨基酸类、聚合物类及酚酸类是对土壤微生物群落功能多样性差异贡献较大的碳源。

**关键词:** 若尔盖草地; 微地形; 土壤微生物群落; 功能多样性

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

## Characteristics of soil microbial community diversity in Zoige alpine grassland microtopography

JIANG Cong<sup>1</sup>, JIAN Xiaomei<sup>2</sup>, DU Yong<sup>2</sup>, CHEN Yiping<sup>3</sup>, SHUI Wei<sup>2,4</sup>

(1. College of Biological Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China;  
2. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China;  
3. College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361102, China;  
4. Department of Geography, Western Michigan University, Kalamazoo 49000, USA)

**Abstract:** Combining with the change of microtopography on the slope, the characteristics of soil microbial community on different slopes in a typical slow-hill area are studied from the perspective of soil microbial community diversity, and the trends of soil microbial community in microtopography habitats are understood. The AWCD growth curve of soil microbial community development showed mid-slope>summit>downslope>upslope>bottom. The metabolic activity of soil microbial community in the mid-slope position is the highest, and the ability of the bottom soil microbial community to use the substrate is the lowest. In the comparison of the functional diversity of soil microbial community, there was a significant difference in soil microbial diversity at different slope positions, except the McIntosh index. The Shannon index and Simpson index in the mid-slope are the largest, which is significantly higher than bottom( $P<0.05$ ). Based on the analysis of the characteristics of soil microbial community carbon sources, the utilization rate of amino acids was significantly higher than other carbon sources, while the utilization of amines and phenolic acids was relatively low, indicating that amino acids are the main carbon source for soil microbial community utilization. Through the principal component analysis, it was found that the different slope positions are selective for the carbon sources of soil microbial

收稿日期: 2018-05-10

通讯作者: 税伟(1974-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 美国西密歇根大学访问教授(Visiting Professor), 主要从事土地利用/覆被变化与生态环境效应研究, shuiweiman@163.com

基金项目: 美国国家地理科研基金资助项目(9336-13); 福州大学科技发展基金资助项目(510211)

community, and carbohydrates, amino acids, polymers, and phenolic acids contributed greatly to the differences in functional diversity of soil microbial community.

**Keywords:** Zoige alpine grassland; microtopography; soil microbial community; functional diversity

## 0 引言

若尔盖湿地生态保护区是青藏高原湿地的重要组成部分,是世界上最大的高寒泥炭沼泽湿地,同时也是黄河和长江上游重要的水源涵养地.若尔盖湿地在全球气候变化、防风固沙、生物多样性保育等方面,发挥着举足轻重的作用<sup>[1]</sup>.由于若尔盖湿地处在高寒、高海拔生态脆弱地带,环境变化的微小波动都可能会打破处于脆弱平衡的生态系统<sup>[2]</sup>.在自然因素作用和人类活动的双重影响下,出现了湿地-草甸-退化草甸-沙化草地的退化演替趋势.研究表明,截至 2011 年,若尔盖沙化面积已扩增到近 10 万  $\text{hm}^2$ ,且以每年 11.65% 的速度继续沙化,区域生态环境呈现逐步恶化的趋势<sup>[3]</sup>.草地沙化不仅引起草地生态系统服务功能下降、生物多样性降低、碳流失等一系列生态问题,亦将影响局部甚至全球气候变化<sup>[4-5]</sup>.

草地变化会影响“植物-土壤-微生物”地上和地下的生态过程,随着草地沙化的加剧,必然对地表植物群落以及地下土壤理化性质等产生影响,而土壤环境和生物多样性的改变势必影响土壤微生物群落<sup>[6]</sup>.目前研究主要从不同沙化程度的草地与植物群落、土壤特性、微生物数量特征以及微生物群落结构的变化规律等方面进行研究<sup>[7-8]</sup>.如税伟等<sup>[9]</sup>研究不同沙化草地恢复重建过程中土壤理化性质及生态系统服务功能的变化特征;孙飞达等<sup>[10]</sup>结合草地利用现状及不同的微地形分布研究土壤微生物数量分布特征及土壤理化性质的差异.蒋永梅等<sup>[11]</sup>研究不同退化程度下的高寒草地与土壤微生物、土壤酶活性的变化特征.但尚缺少关于草地沙化与土壤微生物功能多样性特征关系的研究.土壤微生物是生态系统中重要的生物成分,它既是土壤功能的保证,也是恢复沙化土壤功能的基础.土壤微生物与生态环境响应主要通过群落代谢功能差异来实现,因此研究土壤微生物功能多样性能明确不同环境中微生物群落的作用.特别在高寒草地的特殊环境下,土壤微生物群落结构及功能更特殊,研究土壤微生物群落功能多样性有助于阐明若尔盖沙化草地生态系统内部的结构及功能变化<sup>[12]</sup>,并可揭示草地生态系统的现状及预知发展趋势.若尔盖沙化草地主要位于亚高山草甸草场,其中迎风坡面的山垭口、河床故道和牧道最易沙化<sup>[13]</sup>.因此,本研究以若尔盖湿地保护区内典型草地缓丘为研究对象,采用 Biolog 微平板法对缓丘坡面的土壤微生物群落功能多样性进行分析,在坡面尺度上探究草地沙化与土壤微生物群落功能多样性的特征关系,进而了解高寒草地在沙化过程中土壤的生态过程.同时为预防草地沙化与植被恢复重建提供理论依据.

## 1 研究区域与方法

### 1.1 研究区概况

若尔盖高原湿地的主体位于四川省阿坝藏族羌族自治州的红原县和若尔盖县,其范围为  $101^{\circ}30'E \sim 103^{\circ}30'E$ ,  $32^{\circ}20'N \sim 34^{\circ}00'N$ ,平均海拔约 3 500 m,是世界上典型的低纬度高原湿地,同时也是我国面积最大的高原泥炭沼泽集中分布区(图 1).气候属于高原寒温带湿润气候,主要特点为:长冬短夏、霜冻期长、干雨季分明,年平均降水量为 650~750 mm,年平均气温  $0.7 \sim 1.1^{\circ}\text{C}$ .土壤类型以高寒草甸土、亚高山草甸土为主,沼泽土、泥炭土分布次之<sup>[14]</sup>.地表部分被沙土覆盖,植物稀疏,植物种类主要以青藏苔草(*Carex moorcroftii*)、防风(*Saposhnikovia divaricata*)、高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、藏虫实(*Corispermum tibeticum*)、毛穗赖草(*Leymus paboanus*)和藏沙蒿(*Artemisia wellbyi*)等草本植物为主.调查样地位于若尔盖湿地保护区内高寒草地的缓丘,坡底和下坡位交界处有一条公路,将调查样地一分为二,下坡位到坡顶有铁栅栏围护.根据张金屯等<sup>[15]</sup>对轻度、中度及重度退化草地划分的标志,实地调查发现坡顶样地植物平均盖度低于 30%,属于重度沙化.坡面样地植被平均盖度不一,属于中度沙化和轻度沙化.坡底部样地为河流支沟泥炭地,支沟上游已经干涸,无植被覆盖.下坡位地势较为平缓,鼠害严重,样地区域密布着土丘,为高原鼯鼠活动所致.具体样地信息如表 1 所示.

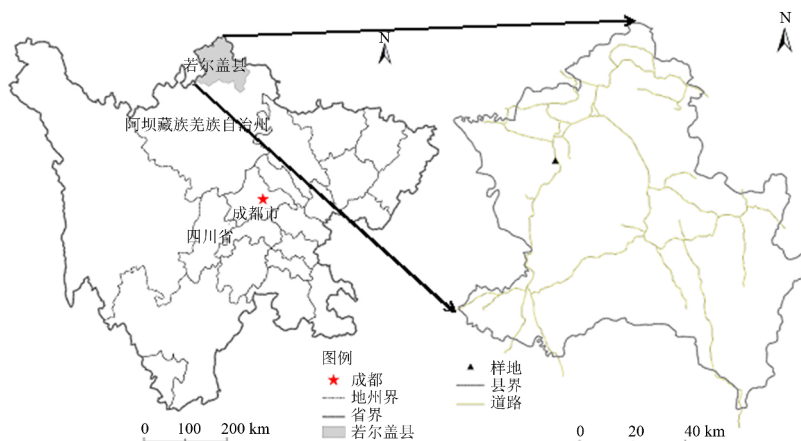


图 1 若尔盖县区位

Fig.1 Location in Zoigê County

表 1 样地信息

Tab.1 Geographical information

坡位	距坡底部距离/m	坡度/(°)	海拔/m	植被平均盖度/%	环境特征
坡底	0	0	3 421	0	泥炭地有少量积雪覆盖, 无植被覆盖
下坡位	0~100	3	3 435	>30	草地受损, 植被稀疏, 鼠害严重
中坡位	100~200	10	3 452	>65	草地轻微受损, 有小块的裸露斑块
上坡位	200~300	18	3 482	>30	草地受损, 植被覆盖率少, 地表有明显的裸露
坡顶	>300	19	3 497	<30	地表裸露斑块较多, 植被稀疏

### 1.2 土壤样品的采集

土壤样品采集样地位于四川省若尔盖县麦溪乡国有草场. 从缓丘的坡底到坡顶, 每个坡位设置 3 个 10 m×10 m 的土壤采集样方, 每个样方的土样为按“S”型路线选择 5 个样点的土样混合, 使用土钻采集深度为 20 cm 的土样, 用自封袋保存, 放入冰盒中运回实验室, 过 2 mm 筛后, 4 °C 保存.

### 1.3 土壤微生物多样性测定

Biolog Eco 板通过微生物对单一碳源的利用来了解其微生物的动态, 可用于评估土壤微生物群落代谢多样性和功能多样性的研究<sup>[16]</sup>. 每块平板共 96 个微孔, 3 组重复, 每组包含 31 种碳源和 1 个空白. 在一定温度下培养, 土壤微生物代谢底物产生的电子, 会使微孔内的染料变成紫色. 每孔颜色变化程度可以反映土壤微生物对 31 种不同单一碳源的代谢能力高低. 该方法被广泛应用于土壤微生物群落功能多样性研究<sup>[17]</sup>.

称取相当于 10.0 g 干土的新鲜土壤放入三角瓶中, 加入 90 mL 灭菌的生理盐水(体积质量 0.85% NaCl), 用无菌棉花塞封口. 震荡 30 min 后, 静置 15 min, 用移液枪吸取 10 mL 上清液, 加入 90 mL 灭菌生理盐水. 按逐步稀释法, 将土壤悬液稀释为 10<sup>-3</sup> g · mL<sup>-1</sup>. 在超净工作台中用移液器将制备好的土壤悬液接种到 Biolog Eco 板的各孔中, 每孔 150 μL. 将接种好的 Biolog Eco 板盖好盖子, 放入 25 °C 的培养箱中培养 7 d. 每隔 24 h 用 Biolog 读板仪在 590 nm 下测定各孔的吸光度值, 完成数据的采集和储存<sup>[18]</sup>.

### 1.4 数据的处理

1) 每孔颜色平均变化率(AWCD). 土壤微生物的代谢活性用每孔颜色平均变化率(average well color development, AWCD):

$$AWCD = \frac{\sum (A_i - A_{A1})}{31} \tag{1}$$

式中:  $A_i$  是除对照孔外各孔吸光度值,  $A_{A1}$  是对照孔吸光度值.  $A_i - A_{A1}$  为负值时归零.

2) Shannon-Wiener 指数( $H'$ ) . 用于研究异质性问题, 评估群落的丰富度, 对稀有种数目变化反映敏感. 计算公式如下:

$$H' = - \sum P_i \ln(P_i) \quad (2)$$

式中:  $P_i$  为第  $i$  孔的相对吸光值与整个平板相对吸光值总和的比率.

3) Simpson 指数( $D$ ) . Simpson 优势度指数是最著名的优势度指数之一, 常用于评估群落常见种优势度, 主要用于度量调查群落的集中性, 是多样性的反面即集中性的度量. 计算公式如下:

$$D = 1 - \sum (P_i)^2 \quad (3)$$

4) McIntosh 指数( $U$ ) . McIntosh 指数  $U$  用于评估群落均一度, 计算公式如下:

$$U = \sqrt{\sum n_i^2} \quad (4)$$

式中:  $n_i$  是第  $i$  孔的相对吸光值, 即  $A_i - A_{A1}$ .

对不同坡位数据进行单因素方差分析, 数据用平均值±标准差表示. 采用 SPSS 22.0 进行数据分析统计、主成分分析, 利用 Excel 2007 与 Origin 9.0 作图.

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤微生物群落平均颜色变化率

Biolog Eco 板每孔平均颜色变化率(AWCD) 可以表征土壤微生物群落代谢活性<sup>[19]</sup>. 一般来说, 土壤微生物生长主要受碳源的利用, 在培养过程中利用土壤微生物对基质采取选择性利用, 从而表现为反应孔出现颜色差异, 见图 2. 由图 2 可看出, 在 0~24 h 的培养时间内, AWCD 值基本为零, 且无明显变化, 说明该时间段微生物代谢活性低, 几乎没有代谢碳源. 24~168 h 的培养时间内, 随着培养时间增加, AWCD 值呈现出先快速增加, 随后持续平缓的升高直至试验结束. 结合显著性分析可知, 培养前期 24~96 h 各坡位 AWCD 值差异不大, 但 72~96 h, AWCD 值的增速达到最大, 故选择 96 h 的数据进行土壤微生物群落功能多样性指数分析和主成分分析. 培养中期 96 h 后开始差异显著, 表明微生物进入指数增长期, 开始大量利用碳源, AWCD 值大体呈现出中坡位>坡顶>下坡位>上坡位>坡底的规律, 中坡位微生物代谢活性最高, 坡底微生物对基质的利用能力最低.

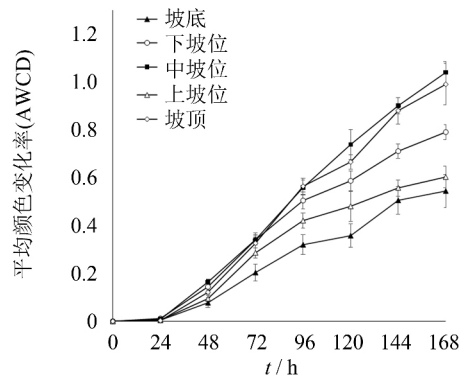


图 2 不同坡位草地土壤微生物 AWCD 值  
Fig.2 AWCD values of soil microbial communities at different slope positions

### 2.2 土壤微生物群落多样性

土壤微生物多样性指数的常用指标有 Shannon 指数、Simpson 指数、McIntosh 指数<sup>[20]</sup>. Shannon 指数可用于评估土壤微生物丰富度, Simpson 指数是测定群落组织水平最常用的指标之一, 表示群落受优势物种影响的程度. McIntosh 指数反应碳源利用种类数不同, 可表征土壤微生物群落均一度<sup>[21]</sup>. 如表 2 所示, 中坡位的 Shannon 丰富度指数最大, 显著大于坡底及坡顶的指数值( $P < 0.05$ ), 且坡底与坡顶的各指数间均有显著性差异( $P < 0.05$ ); 同样地, 中坡位的 Simpson 优势度指数最大, 且显著大于坡底及上坡位的指数值( $P < 0.05$ ); 不同坡位 McIntosh 均一度指数之间无显著性差异, 但中坡位的均一度值显著大于坡底指数值, 显著小于坡顶指数值( $P < 0.05$ ). 表明坡顶部和坡中部的微生物种类较为丰富, 碳源利用程度较高. 土壤微生物多样性指数差异表明处于中坡位的轻度沙化草地土壤微生物群落多样性相对较高, 而严重退化草地的多样性指数值相对较低.

表 2 土壤微生物群落多样性指数

Tab.2 Diversity indices for soil microbial communities

坡位	丰富度指数( <i>H'</i> )	优势度指数( <i>D</i> )	均一度指数( <i>U</i> )
坡底	2.485±0.029c	0.892±0.003b	3.259±0.405d
下坡位	2.979±0.054a	0.941±0.004a	3.789±0.229cd
中坡位	3.050±0.089a	0.945±0.005a	4.043±0.095bc
上坡位	2.155±0.198d	0.861±0.031c	4.762±0.695ab
坡顶	2.694±0.100b	0.921±0.007a	4.914±0.298a

注: 数据以(平均值±标准差)表示, 不同字母表示不同坡位间差异显著( $P < 0.05$ ); 相同字母表示差异不显著( $P > 0.05$ )

### 2.3 土壤微生物碳源利用特征

Biolog Eco 板上的 31 种碳源可分成 6 大类, 即糖类、氨基酸类、羧酸类、胺类、酚酸类及聚合物类. 不同坡位土壤微生物对 6 类碳源类型利用程度见表 3, 由表 3 可知: 沿着坡底到坡顶的梯度上, 各坡位土壤微生物对碳源的利用程度差异较大, 各碳源总体呈现升高趋势. 对缓丘坡底的微生物利用碳源程度分析发现, 氨基酸类碳源的利用率最高(0.516 1), 其次为羧酸类(0.414 6), 酚酸类碳源利用率最低(0.128 8); 通过对缓丘下坡位分析发现, 氨基酸碳源利用程度最高(0.681 3), 其后依次为聚合物类(0.604 7), 羧酸类(0.576 3), 胺类(0.546 5), 糖类利用率最低(0.320 7), 且缓丘上坡位的土壤微生物碳源利用情况与下坡位的一致; 中坡位草地上碳源的利用情况呈现出氨基酸类>胺类>羧酸类>聚合物类>酚酸类>糖类; 对退化较为严重的坡顶土壤微生物碳源利用情况分析可知, 其各碳源利用情况反而高于其他坡位的碳源利用, 其中, 氨基酸类利用率达 0.859 3, 最低的酚酸类碳源利用率也达到 0.353 9. 通过显著性差异分析, 发现不同坡位的土壤微生物群落对羧酸类碳源的利用率差异不显著( $P > 0.05$ ), 而对胺类碳源的利用率差异显著( $P < 0.05$ ). 总体上, 氨基酸类利用率变化明显大于其他碳源, 而胺类及酚酸类的利用程度较低, 表明氨基酸类是该区域土壤微生物利用的主要碳源, 即是引起土壤微生物群落功能差异的敏感碳源.

表 3 土壤微生物对 6 种不同类型碳源的利用率

Tab.3 Utilization rate of 6 different types of carbon sources by soil microorganisms

坡位	糖类	氨基酸类	羧酸类	胺类	酚酸类	聚合物类
坡底	0.23±0.05ab	0.52±0.008a	0.41±0.09a	0.17±0.08a	0.13±0.19a	0.25±0.02a
下坡位	0.32±0.07ab	0.68±0.08ab	0.58±0.10a	0.55±0.06bc	0.40±0.11b	0.60±0.07bc
中坡位	0.35±0.09ab	0.77±0.05b	0.62±0.05a	0.69±0.06c	0.41±0.09b	0.66±0.12bc
上坡位	0.15±0.03a	0.78±0.09b	0.48±0.007a	0.23±0.06ab	0.19±0.10ab	0.68±0.04c
坡顶	0.43±0.06b	0.86±0.10b	0.57±0.16a	0.68±0.05c	0.35±0.07ab	0.50±0.14b

注: 数据以(平均值±标准差)表示, 不同字母表示不同坡位间差异显著( $P < 0.05$ ); 相同字母表示差异不显著( $P > 0.05$ )

### 2.4 土壤微生物利用碳源的主成分分析

对培养 96 h 的 31 种碳源底物利用情况进行主成分分析, 了解土壤微生物群落功能差异, 详见图 3. 将 31 个因子降维得到 4 个主成分(PC), 累计贡献率达 76.8%, 可以较全面地概括变量的大部分信息, 表征不同坡位土壤微生物对单一碳源的代谢能力. 其中 PC1 贡献率为 32.6%, PC2 为 21.2%, PC3 为 12.4%, PC4 为 10.5%. 由于前两主成分的累计贡献率达 53.9%, 因此前 2 个主成分是解释微生物碳源利用变异的主要贡献者, 现主要对前 2 主成分进行分析. 由图 3 可知, 坡底与坡顶在 PC2 发生明显分离, 上坡位、中坡位和下坡位在 PC2 发生明显分离聚集, 说明不同坡位对土壤微生物群落的碳源利用有显著的影响. 通过前 2 个主成分的因子载荷发现, 对 PC1 贡献较大(因子载荷>0.5)的碳源有 7 种, 对 PC2 贡献较大的碳源有 4 种. 结合因子载荷图可知, 对 PC1 起主要分异作用的是糖类碳源( $\alpha$ -D-葡萄糖-1-磷酸、D-甘露醇、D-葡萄糖胺酸、D-半乳糖酸- $\gamma$ -内脂), 聚合物类(吐温 80)、氨基酸类碳源(L-丝氨酸)以及酚酸类碳源(4-羟基苯甲酸). 对 PC2 贡献较大的是糖类碳源(D-半乳糖醛酸、N-乙酰-D-葡萄糖胺、D-纤维二糖、D, L- $\alpha$ -磷酸甘油). 由此可知, 在主成分分离中糖类、氨基酸类、聚合物类及酚酸类是缓丘坡面上土壤微生物群落主要利用的碳源.

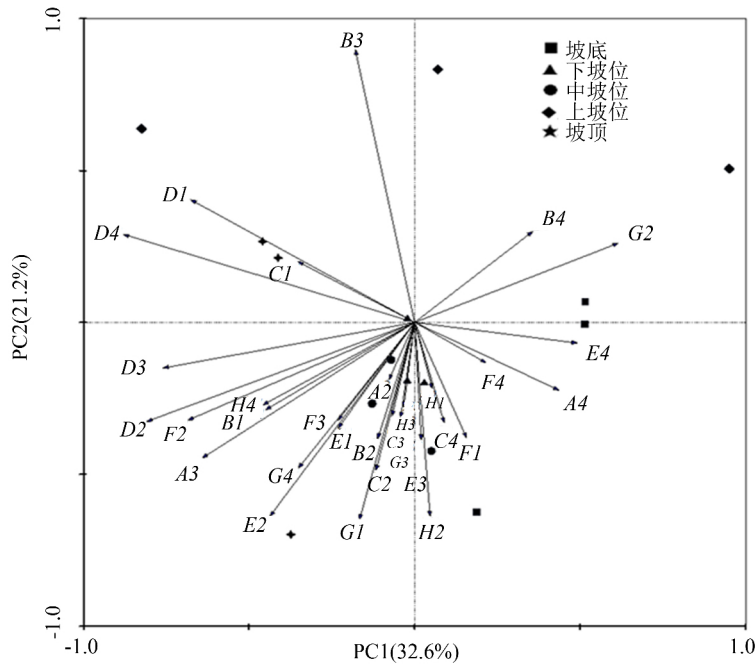


图 3 土壤微生物群落主成分分析

Fig.3 Principal component analysis of soil microbial communities

### 3 讨论

#### 3.1 微地形生境下土壤微生物碳源代谢特征

Biolog Eco 板有 31 种碳源,可以通过分析单一碳源利用程度来表征土壤微生物群落的代谢活性,从而了解微环境生境下微生物群落的动态变化. AWCD 值越大,表示土壤微生物群落代谢活性越高<sup>[22]</sup>. 在缓丘坡位上呈现中坡位>坡顶>下坡位>上坡位>坡底的规律,表明不同坡位的土壤微生物代谢活性存在差异. 结合野外调查发现中坡位沙化程度较轻,植被平均覆盖率>65%,故土壤微生物代谢活性较高,而坡底主要为泥炭地且其植被覆盖率极低,土壤微生物生存环境恶劣. 微地形生境下植被通过生理生态过程影响土壤环境,不同的土壤环境为土壤微生物群落提供不同的理化环境及营养物质,与此同时土壤微生物群落活性和多样性会迅速响应土壤环境改变<sup>[23-24]</sup>,相反土壤微生物群落也会通过有机物和土壤元素的迁移和富集,反馈调节植被的生长状况由此可见植物—土壤—微生物三者之间关系密切. 研究表明,植被种类多样性与土壤微生物种类多样性呈显著正相关<sup>[25]</sup>.

另一方面沙化程度也会影响土壤微生物群落特征. 一般来说,沙化程度越高,会导致植被盖度下降、物种单一、群落趋于简单,同时沙化会造成高寒草地土壤的碳氮比、氮磷比、磷钾比等营养元素下降,土壤理化性质也会改变<sup>[26]</sup>,由此土壤微生物群落代谢活性也会降低. 根据 31 种碳源利用情况发现,缓丘草地土壤微生物群落利用的主要碳源为糖类和氨基酸类,且坡顶和坡底的土壤微生物群落具有相异的碳源利用方式. 通过主成分分析发现,不同坡位的土壤微生物对碳源的利用模式有所差异,土壤微生物对糖类、氨基酸类、羧酸类、胺类、酚酸类及聚合物类的利用具有选择性,这可能与沙化程度、植被覆盖及土壤微生物自身生理特征有关. 微生物主要是通过群落代谢功能的差异来影响环境, Biolog 微平板法是目前研究微生物代谢功能特征有利的手段. 但本研究未进一步探讨植物与土壤微生物的关系,以及影响土壤微生物群落特征的主要环境因素,这对于揭示沙化草地的土壤微生物特征具有重要意义.

#### 3.2 微地形生境下土壤微生物群落功能多样性特征

土壤微生物群落功能多样性能描述土壤微生物群落状态,同时能灵敏地反映出土壤质量变化<sup>[27]</sup>. 土壤微生物群落功能多样性与均一性不仅能提高土壤生态系统的稳定性,亦能提升土壤微生态环境的抵抗能力. 本研究发现,Shannon 指数和 Simpson 指数均表现为中坡位大于坡顶及坡底的指数值,Shannon 指数越大反映土壤微生物群落利用碳源的种类越多且越均匀,而 Simpson 指数越大表明土壤微生物群落对常

见碳源的利用程度越大.由此可见,中坡位的土壤微生物群落物种丰富度和群落中常见物种的优势度较高,且对常见碳源利用率也越大.这可能是因为坡中部植被覆盖较高,地上植被覆盖情况不同会造成土壤理化性质的差异,增加土壤的微生物多样性<sup>[28]</sup>.坡上部植被稀疏,受风沙侵蚀程度较大,土壤养分及土壤含水量等明显减少,导致土壤微生物群落多样性降低.坡底部泥炭地的温度低,土壤酸性强,养分贫乏,其酸碱性能显著影响微生物群落多样性<sup>[29]</sup>,导致坡底部土壤微生物群落多样性会大大减少.下坡位与坡底紧连,是起伏度不大的退化草地,实地调查发现该片草地鼠害严重,鼠害是草地退化的伴生物,同时鼠害也会加速草地的退化,啃食地表植被及掘土挖洞都会破坏土壤环境,导致生态循环失调,土壤微生物群落多样性也会减少<sup>[30]</sup>.草地退化会导致植物的生产力及多样性下降、土壤理化性质改变,影响草地地上及地下生态过程.作为土壤环境敏感的响应者,土壤微生物群落多样性、数量会随之改变.如彭岳林等<sup>[31]</sup>调查发现退化程度不一的草地中土壤细菌、真菌、放线菌数量存在差异.综合多样性指数分析结果,本研究选取的若尔盖高寒草地缓丘微地形土壤微生物群落多样性很大程度上受到不同沙化程度的影响.

总的来说,土壤微生物群落多样性是表征土壤质量变化的敏感指标,不同退化程度的草地不仅改变影响地表植被覆盖,作为草地生态系统重要组成部分的土壤微生物,其分布、活性及功能多样性都会受到退化程度的影响,本研究选取的缓丘微地形生境,草地沙化程度存在差异,其生态恢复效应也有明显差异.在关注地表草地沙化加剧的同时,注意到沙化过程中地下土壤微生物群落功能多样性的变化,为评价高寒草地沙化情况提供一种新思路,同时对若尔盖湿地生态环境恢复和草地保护具有重要意义.

#### 参考文献:

- [1] 税伟,白剑平,简小枚.若尔盖高原沙化草地治理区固碳能力研究[J].自然灾害学报,2016,25(6):42-50.
- [2] 刘兴元,巩建锋,牟月亭.青藏高原草地生态补偿博弈分析[J].中国草地学报,2012,34(4):1-7.
- [3] 伍业钢,严晋跃,张立,等.若尔盖草原沙漠化问题探讨及治理建议[J].科技导报,2012,30(14):13.
- [4] 冉启凡,孙庚,刘琳,等.若尔盖高寒草地沙化过程碳通量的变化特征[J].应用与环境生物学报,2015,21(5):954-959.
- [5] ZHOU H K, ZHAO X Q, WEN J, *et al.* The characteristics of soil and vegetation of degenerated alpine steppe in the Yellow River Source Region [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(5): 1-11.
- [6] TANG J. Soil bacterial community diversity under different stages of degradation in Zoige wetland [J]. *Microbiology China*, 2011, 38(5): 677-686.
- [7] 许冬梅,张晶晶,谢应忠,等.盐池县草地不同沙化阶段土壤生物学特性[J].农业科学研究,2011,32(1):16-19.
- [8] JIA N, ZHOU X, NA J. Characteristics of soil microbial communities under dry and wet condition in Zoige alpine wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(2): 474-482.
- [9] 税伟,白剑平,简小枚,等.若尔盖沙化草地恢复过程中土壤特性及水源涵养功能[J].生态学报,2017,37(1):277-285.
- [10] 孙飞达,青焯,朱灿,等.若尔盖高寒退化草地土壤水解酶活性和微生物群落数量特征分析[J].干旱区资源与环境,2016,30(7):119-125.
- [11] 蒋永梅,师尚礼,田永亮,等.高寒草地不同退化程度下土壤微生物及土壤酶活性变化特征[J].水土保持学报,2017,31(3):244-249.
- [12] 田雅楠,王红旗. Biolog 法在环境微生物功能多样性研究中的应用[J].环境科学与技术,2011,34(3):50-57.
- [13] 李斌,董锁成,江晓波,等.若尔盖湿地草原沙化驱动因素分析[J].水土保持研究,2008,15(3):112-115.
- [14] 龙伟,高艳美,吴鹏飞.若尔盖高寒草甸退化对表栖节肢动物群落的影响[J].生态学杂志,2018,37(1):128-138.
- [15] 张金屯.山西高原草地退化及其防治对策[J].水土保持学报,2001,15(2):49-52.
- [16] 陈喜蓉,金映虹,欧滨,等.基于 Biolog-ECO 技术分析不同林下种植竹荪地土壤微生物功能多样性[J].基因组学与应用生物学,2017,36(1):370-375.
- [17] 沙月霞.红枣贮藏期果面微生物对碳源的利用及主成分分析[J].微生物学通报,2011,38(1):35-44.
- [18] 向泽宇,张莉,张全发,等.青海不同林分类型土壤养分与微生物功能多样性[J].林业科学,2014,50(4):22-31.
- [19] 字洪标,代迪,胡雷,等.川西北高寒草甸土壤微生物功能多样性对磷(P)添加的响应[J].土壤通报,2017,48(3):647-655.
- [20] 胡婵娟,傅伯杰,刘国华,等.黄土丘陵沟壑区坡面尺度上微生物的空间分布规律[J].水土保持学报,2009,23(3):

- 148-152.
- [21] 姬艳艳,张贵龙,张瑞,等. 耕作方式对农田土壤微生物功能多样性的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(6): 117-123.
- [22] 张瑞,张贵龙,陈冬青,等. 不同施肥对农田土壤微生物功能多样性的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(2): 133-139.
- [23] 胡雷,阿的鲁骥,字洪标,等. 高原鼯鼠扰动及恢复年限对高寒草甸土壤养分和微生物功能多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2794-2802.
- [24] 杨宁,邹冬生,杨满元,等. 衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变[J]. 生态学报, 2014, 34(10): 2693-2701.
- [25] 韩丛丛,杨阳,刘秉儒,等. 草地土壤微生物多样性影响因子[J]. 草业科学, 2014, 31(12): 2242-2250.
- [26] 罗亚勇,张宇,张静辉,等. 不同退化阶段高寒草甸土壤化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 254-260.
- [27] ZHANG H F, LI G, YANG D L, *et al.* Changes in soil microbial functional diversity under different vegetation restoration patterns for Hulunbeier Sandy Land[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(1): 38-44.
- [28] LI H, XU Z, YAN Q, *et al.* Soil microbial beta-diversity is linked with compositional variation in aboveground plant biomass in a semi-arid grassland[J]. *Plant & Soil*, 2018, 423(1/2): 465-480.
- [29] 厉桂香,马克明. 土壤微生物多样性海拔格局研究进展[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1521-1529.
- [30] 张卫红,苗彦军,赵玉红,等. 高原鼠兔对西藏邦杰塘高寒草甸的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(1): 115-122.
- [31] 彭岳林,蔡晓布,于宝政. 不同状态高寒草原土壤微生物及其变化[J]. 西南农业学报, 2018, 31(2): 379-383.

(责任编辑: 蒋培玉)

—————  
 (接第 820 页)

- [16] TORRES S J, PEÑA J M, CASTRO A I D, *et al.* Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2014, 103(2): 104-113.
- [17] FENG Q, LIU J, GONG J. UAV remote sensing for urban vegetation mapping using random forest and texture analysis[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(1): 1074-1094.
- [18] 李冰,刘榕源,刘素红,等. 基于低空无人机遥感的冬小麦覆盖度变化监测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 160-165.
- [19] 井然,邓磊,赵文吉,等. 基于可见光植被指数的面向对象湿地水生植被提取方法[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1427-1436.
- [20] MEYER G, NETO J. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2008, 63(2): 282-293.
- [21] ELAZAB A, ORDÓÑEZ R A, SAVIN R, *et al.* Detecting interactive effects of N fertilization and heat stress on maize productivity by remote sensing techniques[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 73: 11-24.
- [22] HUNT E R, CAVIGELLI M, CRAIG D, *et al.* Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status[J]. *Precision Agriculture*, 2005, 6(4): 359-378.
- [23] 张正健,李爱农,边金虎,等. 基于无人机影像可见光植被指数的若尔盖草地地上生物量估算研究[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(1): 51-62.
- [24] 郭锐. 植被指数及其研究进展[J]. 干旱气象, 2003, 21(4): 71-75.
- [25] 罗亚,徐建华,岳文泽,等. 植被指数在城市绿地信息提取中的比较研究[J]. 遥感技术与应用, 2006, 21(3): 212-219.
- [26] JOCHEM V, SCHAEPMAN M E, BENJAMIN K, *et al.* Angular sensitivity analysis of vegetation indices derived from CHRIS/PROBA data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(5): 2341-2353.

(责任编辑: 沈芸)