砒砂岩区坡位环境梯度下土壤微生物活性及其环境影响因素

马晓丹[1]，王思宇[1]，郭洋楠[1,3]，张焕迪[1]，包玉英[1,2*]

(1.内蒙古大学 生命科学学院，内蒙古 呼和浩特 010071；2.牧草与特色作物教育部重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010071；3.中国神华能源股份有限公司 神东煤炭分公司，陕西 神木 719315)

摘　要：[目的] 开展砒砂岩区土壤微生物活性及其环境影响因素研究，为发掘本土微生物资源及区域生态环境保护和建设奠定基础。[方法] 以鄂尔多斯砒砂岩区为研究对象，通过实地考察取样，测算土壤微生物数量、酶活性、理化性质以及植被相关指标，分析坡面环境梯度土壤微生物数量分布特征、土壤生态功能、植被多样差异之间的相互影响。[结果] ①砒砂岩区土壤微生物区系中细菌为优势类群，放线菌次之，真菌很少。坡位环境梯度间土壤微生物各生理类群数量差异显著。②不同坡位土壤磷酸酶、蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶活性各异但含量极低。真菌数量与酸性磷酸酶显著正相关，细菌数量与脲酶显著负相关，放线菌数量与磷酸酶和过氧化氢酶显著或极其显著正相关。③研究区土壤水稳性团聚体粒径多集中于 0.25～0.5 mm；阴坡 0.25～0.5 mm 土壤粒径比例大，0.106～0.25 mm 粒径比例小，而阳坡和沟底与之相反；土壤含水率呈现：阴坡＞沟底＞阳坡；土壤的 pH 值、铵态氮、有效磷、全碳、全钙含量均为阳坡顶大于其他坡位。细菌数量与含水率、钙含量，放线菌数量与酸碱度均极显著负相关。④环境因子可解释土壤微生物数量差异的 90%，其中坡位和土层影响最大(37.31%)，植被次之(29.83%)，土壤理化性质影响最小(22.86%)。在土壤理化性质中，团聚体粒径、含水率及 pH 值影响较大。[结论] 砒砂岩区坡位加剧土壤微生物数量和生理类群的分化，微生物的生存能力随着环境条件的下降而下降；生存环境适中的沟底孕育着该区生态修复关键的本土植被及土壤微生物资源。

关键词：砒砂岩；沟壑；坡位梯度；土壤理化性质；土壤酶活；土壤微生物

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2020)05-0040-08　　**中图分类号**：Q938.1^{+}3

文献参数：马晓丹，王思宇，郭洋楠，等.砒砂岩区坡位环境梯度下土壤微生物活性及其环境影响因素[J].水土保持通报，2020，40(5)：40-47. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.05.007；Ma Xiaodan，Wang Siyu，Guo Yangnan，et al. Soil microbial activity and its environmental influence factors under slope environmental gradient in fieldspathic sandstone area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(5)：40-47.

Soil Microbial Activity and Its Environmental Influence Factors Under Slope Environmental Gradient in Fieldspathic Sandstone Area

Ma Xiaodan[1]，Wang Siyu[1]，Guo Yangnan[1,3]，Zhang Huandi[1]，Bao Yuying[1,2]

(1. *College of Life Sciences，Inner Mongolia University，Inner Mongolia，Hohhot*，010071，*China*；2. *Key Laboratory of Herbage & Endemic Crop Biotechnology，Ministry of Education，Inner Mongolia，Hohhot*，010071，*China*；3. *China Energy Investment Group，Shenmu，Shaanxi* 719315，*China*)

Abstract：[Objective] The soil microbial activity and its environmental influencing factors were researched to lay a foundation for the exploration of local microbial resources and the protection of a regional ecological environment. [Methods] The Ordos fieldspathic sandstone area was taken as the research object. Vegetation，soil，soil microbial quantity，enzyme activity，physicochemical properties，and vegetation-related indicators

收稿日期：2020-05-07　　**修回日期**：2020-06-25

资助项目：国家科技支撑计划项目子课题“大型能源基地生态恢复技术与示范”(2012BAC10B03)，“神东采煤沉陷区生态系统稳定性研究”(CSIE6033593)

第一作者：马晓丹(1994—)，女(汉族)，内蒙古自治区乌兰察布市人，硕士研究生，研究方向为环境微生物、土地复垦与菌根生物学。Email：hyllmxd@126.com。

通讯作者：包玉英(1963—)，女(蒙古族)，内蒙古自治区通辽市人，博士，博士生导师，主要从事环境微生物、土地复垦与菌根生物学研究。Email：ndbyy@imu.edu.cn。

were investigated and analyzed. The interrelationship among the quantity distribution characteristics of soil microorganisms, soil ecological function, and vegetation diversity under a slope environmental gradient were also analyzed. [Results] ① Bacteria were the dominant group in the fieldspathic sandstone soil, followed by actinomycetes. Fungi were few. There were significant differences in the number of physiological groups of soil microorganisms among slope environmental gradients. ② Soil phosphatase, sucrase, urease, and catalase activities were different at different slope positions, and their contents were extremely low. There was a significant positive correlation between the fungal quantity and the acid phosphatase, as well as between the actinomycetes quantity and phosphatase and catalase. However, there was a significant negative correlation between the bacteria quantity and urease. ③ The particle sizes of soil water-stable aggregates were mostly concentrated between 0.25 and 0.5 mm. The particle size of 0.25 to 0.5 mm constituted a large proportion of soil in the shady slope, whereas the particle size of 0.106 to 0.25 mm accounted for a small proportion of soil in the shady slope. However, the sunny slope and gully bottom were the opposite of the shady slope. The soil moisture content was as follows: shady slope > gully bottom > sunny slope. The soil pH value and the contents of ammonium nitrogen, olsen-P, carbon, and calcium at the top of the sunny slope were higher than those for other slopes. The bacteria quantity was significantly negatively correlated with moisture content and calcium. The actinomycetes quantity was significantly negatively correlated with the pH value. ④ Environmental factors could account for 90% of the change of soil microbial quantity, among which the slope position and soil layer had the greatest influence (37.31%), followed by the vegetation factor (29.83%) and soil physicochemical properties (22.86%). Among the soil physicochemical properties, the aggregate particle size, moisture content, and pH value had a greater influence. [Conclusion] The slope position intensifies the differentiation of soil microorganism quantity and physiological groups, and the microorganism viability decreases as the environment deteriorates. The bottom of the ditch contains native vegetation and soil microbial resources for ecological restoration.

Keywords: fieldspathic sandstone; gully; slope gradient; soil physics and chemistry; soil enzyme activity; soil microorganism quantity

砒砂岩是形成于古生代的二叠纪、中生代的三叠纪、侏罗纪以及白垩纪砂岩、砂页岩和泥质砂岩组成的岩石互层[1],集中分布于中国黄土高原北部鄂尔多斯高原[2],鄂尔多斯砒砂岩区占地约 1.67×10^4 km^2,依据砂岩覆土程度(m)将其分为:裸露(<1.5 m)、盖土(>1.5 m)和盖沙(>10 m)3 类,占比总面积分别为 27.2%,50.6%,22.2%。由于砒砂岩粗粉粒含量大、黏粒少,土壤结构差、稳定性低且抗蚀性弱,遇水如泥、遇风成沙,导致水土流失严重,区域生态环境极其脆弱。研究多关注砒砂岩结构组成、粘土矿物组成、土壤特性[3]以及水土流失工程治理措施等方面[4],在土壤微生物方面较欠缺。微生物作为生态系统的分解者分布于各类生境中,其种群数量、分布及其变化与生态系统的物质循环和能量流动关联[2]。目前对草地、农田、林地和荒漠的土壤微生物研究居多,集中在时空差异、不同植被、土层深度对他们数量、种类、结构的影响,而没有对"V"型沟壑坡位环境梯度下土壤微生物活性与环境影响因素之间的相互影响作用进行研究。土壤微生物作为地下生态系统的资源库,因数量巨大、种类繁多和活动强度大与土壤的理化、生物学特性,植物养分的转化都有着密切的联系[5]。因土壤微生物对土壤基质环境十分敏感[6],并通过种群的数量与变化响应土壤各因素的影响[7],能够指示生态环境变化以及生态系统演替变化进程[7]。

鄂尔多斯砒砂岩区具有独特的地理、气候特征和植被类型,在不同坡位间因光辐射、水分含量、风速等因素形成小生境,为微生物的繁衍生长提供了异质性的环境,随着全球气候变化以及人类生产活动(城市化、放牧、煤炭资源开发等)引起砒砂岩区生境恶化,影响区域生态系统稳定和生物(土壤微生物)数量等[8],形成植物—土壤—微生物及其环境条件相互作用的特殊系统。同时,该区土壤生态系统中可能保持着某些具有特殊价值的稀有微生物资源,丰富的微生物资源也将对砒砂岩脆弱的生态系统起到重要作用(维持生态系统营养物质的循环、涵养水源、储藏微生物基因资源等方面),因此维持砒砂岩区生态平衡,保护其微生物资源显得尤为重要。其中生物修复技术的运用前提是尽可能解决土著植被、微生物的生存生长条件、适应性以及与环境影响因素的关系等问题。

因此，本文主要研究砒砂岩坡位环境梯度中土壤微生物数量的分布特征、植被多样差异、土壤因子现状以及它们之间的相互影响作用，旨在了解该特定区域的生物资源状况以及生存生长环境，以期为砒砂岩区的生态修复和生物资源保育提供参考。

1 研究材料和方法

1.1 研究区选择与概况

选取晋陕蒙接壤区神东煤矿区附近的四条典型砒砂岩沟壑区，即阿大线沟壑（39°27′49.95″E，109°56′58.67″N，1 340 m）、活鸡兔沟壑（39°14′11.73″E，110°10′13.17″N，1 232 m）、哈拉沟沟壑（39°31′59.57″E，110°21′6.37″N，1 195 m）、石圪台沟壑（39°41′44.86″E，110°9′23.42″N，1 268 m）为研究样区，在每条沟壑内设置阴阳沟坡顶（风积沙型）、阴阳沟坡中（裸露砒砂岩型）以及沟底（风积沙型）5 个样点，即阳坡顶，阳坡中，沟底，阴坡中，阴坡顶。

砒砂岩研究区地表土壤为栗钙土，下层为弱透水层的砾岩。该区属于温带大陆性气候，夏季降雨量大而集中，全区年平均降水量 400 mm 左右；秋冬季昼夜温差大，全年温度介于 38.1 ℃～－30.9 ℃，最大冻土深度达到 1.5 m，春季风大且频繁，全年 8 级以上的大风日多达 20～30 d，且年平均风速为 2～4 m/s。该区由于独特的水热气候特点，导致植被稀疏、岩层风蚀强烈、水土流失严重、地形破碎、千沟万壑，地貌为梁峁起伏，沟壑密度高[9]。采样区的砒砂岩主要在沟缘线以下的沟谷中显露，呈典型的“V”字形沟道[9]，形成地表覆盖较厚风积沙层的阴阳沟壑，光照、水热和湿度等气候因子差异明显。梁峁原生植被为短花针茅草原，禾本科、菊科为常见植物，阳坡顶以短花针茅（*Stipa breviflora*）＋铁杆蒿（*Artemisia sacrorum*）建群，阳坡中以羊草（*Leymus chinensis*）、糙隐子草（*Cleistogenes squarrosa*）、胡枝子（*Lespedeza bicolor*）为主，在沟谷底部风积沙区分布有灌木类植物，如扁桃（*Amygdalus communis*）、黑沙蒿（*Artemisia ordosica*）等，草本植物较为单一，主要有羊草、蒲公英（*Taraxacum mongolicum*）、艾草（*Artemisia argyi*）等，阴坡中以冷蒿（*Artemisia frigida*）、蒙古冰草（*Agropyron mongolicum*）为主，阴坡顶以蒙古冰草、短花针茅、蒙古韭（*Allium mongolicum*）为主。整体植被样貌呈现沟底植被覆盖度最高（65%～75%），坡顶次之（25%～50%），而坡中覆盖度极低（5%～15%）。

1.2 样品采集

2017 年 8 月中旬，采用随机采样法在每个坡位设置 10 m × 10 m 的大样方，在大样方中沿其对角线设置 3 个 1 m×1 m 的小样方，在小样方中随机多点法分别采集 0—10，10—20，20—30 cm 的土壤样品（分别记为 L_1，L_2 和 L_3），每层充分混匀为一份土样，低温带回实验室，整个研究区共采集 4×5×3＝60 份土壤。一部分土壤样品过 2 mm 分样筛后于 4 ℃保存，用于可培养微生物数量分析；一部分土壤样品自然风干后过 0.5 mm 分样筛于 4 ℃保存，用于土壤酶活测定；另一部分土壤样品自然风干后过 1 mm 分样筛，用于土壤理化性质测定。在每个 1 m×1 m 的小样方中，调查草本植物种类、多度等，分类剪去植被地上部分，用于生物量测定。

1.3 试验指标测定方法

土壤可培养微生物的计数采用平板稀释涂布法进行，分别用牛肉膏蛋白胨、高氏Ⅰ号、马丁—孟加拉培养基培养细菌、放线菌和真菌并进行数量测定[10]。计算公式为：

$$\text{可培养微生物数量(CFU/g)}=\frac{\text{菌落平均数}\times\text{稀释倍数}\times\text{振荡时间}\times\text{鲜土重}}{\text{干土重}} \tag{1}$$

采用磷酸苯二钠比色法测定土壤磷酸酶、中性磷酸酶、碱性磷酸酶的活性[11]；严格按照苏州科铭生物技术有限公司微量法试剂盒的说明书测定土壤蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶的活性。采用烘干法[12]测土壤含水率，即称土样放在 105 ℃烘箱中烘至恒重（8 h），m_0－烘干空铝盒重量（g），m_1－烘干前土样及铝盒总重量（g），m_2－烘干后土样及铝盒总重量（g），土壤含水率（%）＝$(m_1-m_2)\times100/(m_1-m_0)$；玻璃电极法测 pH 值（土∶水＝1∶2.5）；取 50 g 土样用 TPF-100 土壤团聚体分析仪（浙江托普云）以 2，1，0.5，0.25，0.106 mm 的套筛进行湿筛 30 min，各粒径 60 ℃烘至恒重，再于空气中平衡 24 h 后称重（精确至 0.01 g），土壤团聚体粒径含量计算公式：各级筛子中烘干后土样重量/土样总重量×100%；严格按照 TPY-6PC 土壤养分速测仪（浙江托普云）说明书测定土壤铵态氮、速效磷和有效钾的含量；土壤过 0.149 mm 筛后，严格按照 elementar vario MACRO CUBE 元素分析仪说明书测土壤全氮和全碳含量；全磷采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法进行测定[13]。钙含量采用原子吸收分光光度计法测定[14]。植被生物量为湿重与干重之差；植物群落多样性是采用辛普森指数（Simpson’sdiversity index，D）[15]、香浓—威纳指数（Shannon-Wiener index，H）[16]表示：

$$D=1-\sum_{i}^{k}p_i^2,\quad H=-\sum_{i}^{k}p_i\ln p_i \tag{2}$$

1.4　统计分析方法

测试的原始数据采用 EXCEL 处理,使用 SPSS 26 对不同沟壑间的各项指标进行单因素方差(one-way ANOVA)分析,发现几乎均无显著差异性,即四条沟壑间植被多样性和生物量、土壤理化性质、酶活性、土壤总微生物数量无显著差异,故可以将 4 条沟壑区作为坡位环境梯度的重复样本;使用 SPSS 26 对坡位环境梯度各指标进行单因素方差(one-way ANOVA)分析、LSD,Duncan 多重比较;应用 Origin 2019 进行 PCA 分析,为评估各因子对土壤微生物数量影响的相对重要性,分别计算每个因子的特征值;利用 Origin与 EXCEL 进行图表制作。

2　结果分析与讨论

2.1　砒砂岩区不同坡位环境梯度土壤微生物数量分布及变化

土壤微生物类群主要包括细菌、真菌、放线菌,不同生境下这些微生物的数量存在异质性,即构成了不同类群数量及其比例的特定微生物组合[17]。砒砂岩区坡位环境梯度中的土壤微生物总量呈现(见表 1):沟底>阴坡顶>阳坡中>阳坡顶>阴坡中,这与喀斯特退化天坑的倒石坡坡面土壤微生物数量分布规律一致[18];阳坡光照强、蒸腾作用大、保水能力差,阴坡温度低、保水能力强,干旱和潮湿均不利于微生物生长,而沟底光照和湿度适宜微生物存活[17]。不同生理类群微生物在各坡位间存在异质性,细菌数量显示:沟底>阳坡中>阴坡顶>阴坡中>阳坡顶,可见细菌在坡位梯度上更加喜欢热量与光照趋于中间且保水性较好的沟底;放线菌数量显示:沟底>阴坡顶>阳坡顶>阳坡中>阴坡中,可见放线菌也趋于光照与湿度较为稳定的沟底,并且阳坡含量高于阴坡,这于放线菌吸热耐旱的特性相符[19];真菌数量显示:阳坡顶>阳坡中>阴坡顶>阴坡中>沟底,可见真菌更加趋于湿度小、光照强的阳坡,这与真菌耐干耐旱相一致[20]。

随着土层深度(见表 1)增加,各坡位的放线菌数量均减少,沟底和阴坡顶的真菌、细菌、放线菌数量均呈减少趋势,与表层土营养较下层土丰富相附和;阳坡顶的真菌、细菌数量随土层变化不显著($p>0.05$)。阳坡中的细菌数量在 0—10 cm 最多,其他两层数量接近,真菌数量随土层变化不显著($p>0.05$);阴坡中真菌数量变化不显著($p>0.05$),而细菌数量随土层增加而增加,在阴坡水分含量大又趋于土深处,可见细菌可以耐受低氧水平[20]。

表 1　不同坡位环境土壤微生物数量及各土层微生物数量分布

土层/cm	菌 种	阳坡顶	阳坡中	沟底	阴坡中	阴坡顶
0—30	细菌(×10⁷ CFU/g)	18.33±5.56^{c}	32.51±10.06^{ab}	50.58±6.63^{a}	20.33±6.04^{c}	22.43±8.18^{c}
0—30	放线菌(×10⁷ CFU/g)	16.93±9.24^{a}	9.28±2.09^{a}	22.34±4.93^{a}	7.23±2.69^{a}	21.39±11.99^{a}
0—30	真菌(×10³ CFU/g)	5.28±2.24^{a}	4.14±1.90^{a}	1.20±0.33^{a}	2.38±0.72^{a}	3.24±1.37^{a}
0—30	总微生物(×10⁷ CFU/g)	35.26±14.81^{b}	41.79±12.15^{b}	72.93±11.57^{a}	27.56±8.73^{c}	43.83±20.18^{b}
0—10	细菌(×10⁷ CFU/g)	16.00±11.06^{a}	53.62±24.46^{a}	54.80±13.53^{a}	15.25±6.00^{a}	47.53±19.61^{a}
10—20	细菌(×10⁷ CFU/g)	28.4±10.30^{a}	20.48±7.68^{a}	56.33±14.68^{a}	18.80±5.79^{a}	11.85±4.36^{ab}
20—30	细菌(×10⁷ CFU/g)	10.58±7.49^{a}	23.43±15.23^{a}	40.63±5.98^{a}	26.95±17.54^{a}	7.93±3.95^{c}
0—10	放线菌(×10⁷ CFU/g)	32.35±26.11^{a}	15.75±3.05^{a}	24.50±6.77^{a}	12.80±6.94^{a}	47.5±4.47^{a}
10—20	放线菌(×10⁷ CFU/g)	16.50±10.14^{a}	6.95±2.87^{ab}	26.35±13.09^{a}	6.48±3.43^{a}	6.00±2.13^{a}
20—30	放线菌(×10⁷ CFU/g)	1.95±1.13^{a}	5.15±2.99^{c}	16.18±5.52^{a}	2.40±1.05^{a}	10.68±11.99^{a}
0—10	真菌(×10³ CFU/g)	7.47±5.85^{a}	1.60±0.30^{a}	1.48±0.52^{a}	3.00±0.93^{a}	4.60±2.51^{a}
10—20	真菌(×10³ CFU/g)	2.88±0.78^{a}	5.80±4.07^{a}	1.08±0.39^{a}	1.48±1.08^{a}	4.48±3.27^{a}
20—30	真菌(×10³ CFU/g)	5.50±4.12^{a}	5.03±4.46^{a}	1.05±0.86^{a}	2.68±1.79^{a}	0.65±0.37^{a}

综上,土壤微生物数量受坡位改变带来的非生物因素(温度、降水、大气成分等)和生物因素(植被、生物多样性和组成)的重大环境差异的影响较大。研究表明土壤细菌是土壤中的优势类群,与土壤微生物总量的变化幅度类似,在土壤微生物数量中所占比例最大,放线菌次之,真菌最少。土壤微生物数量的多少在某种程度上可以反映土壤质量的变化,研究发现沟底的微生物数量最多,可能因为沟底地表土壤受到的破坏和环境侵蚀较轻,土壤表层保存较好,表土植物根系与地表枯落物为微生物生长繁殖提供丰富的营养,促进“土壤—微生物—植被”生态系统的物质循环和能量流动。而坡中由于植被覆盖度低,加之砒砂岩区干热气候,使地表昼夜温差变化快且大,造成水热散失及土壤可侵蚀性增加[21],促使坡中土壤环境恶

化，不利于土壤微生物的生长繁殖，符合本研究中细菌不再喜欢湿润环境（阴坡中）[20]而是趋于沟底的结果。通过坡位梯度和土层对土壤微生物数量的 PCA 分析结果显示：微生物数量变化累积百分比为 37.31%，说明坡位与土层可以解释微生物数量变化的 37.31%，其中坡位的特征值大于土层，坡位会加剧微生物群落数量结构的分化，并且随着环境条件的下降，微生物的生存能力有所下降。

2.2 砒砂岩区土壤理化与酶活性现状及其与土壤微生物数量的关系

2.2.1 坡位环境梯度间土壤理化性质现状 研究区土壤水稳性团聚体粒径大部分集中于 0.25～0.5 mm，0.106～0.25 mm 粒径占比最少（见图 1），表明土壤的吸水性、黏结性及保肥力较差。1～2 mm 与 0.5～1 mm 粒径分布较一致，即阴坡中＞阳坡中＞沟底＞阳坡顶＞阴坡顶，各样点间无显著差异性（$p>0.05$）；0.25～0.5 mm 粒径在各坡位间均无显著差异性，但较其他粒径占比大；0.106～0.25 mm 粒径分布为阳坡顶＞阴坡顶＞沟底＞阳坡中＞阴坡中，阴坡中显著小于其他坡位，可见阴坡土壤较阳坡土壤砂粒多、黏粒少，沟底土壤居中。

表 2 显示：各坡位间土壤理化性质具有显著差异性（$p<0.05$），阴坡顶与阴坡中土壤含水率显著大于其他坡位，这与李昆和陈玉德在 1995 年研究的结构一致，认为在一般情况下阳坡的水分含量显著低于阴坡，半阳半阴坡在二者之间[22]。土壤 pH 值均呈强碱性（8.50～9.33），更适合细菌与放线菌生长，而不利于真菌生长。阳坡顶的铵态氮含量显著高于其他坡位；阳坡顶与阳坡中的有效磷含量显著大于其他坡位；沟底和阳坡中的全磷含量显著大于其他坡位；各坡位间的全氮含量差异不显著；各坡位间的全碳与钙含量变化一致，均为阴坡顶和阳坡顶显著大于其他坡位，且沟底含量最少，这与微生物分解作用及其累积效应相关[23]。综上，阳坡土壤的 pH 值、铵态氮、有效磷、全碳、全钙含量均大于其他坡位，营养较为丰富，而阴坡除含水量高以外，土壤营养较阳坡匮乏，沟底趋于中间。

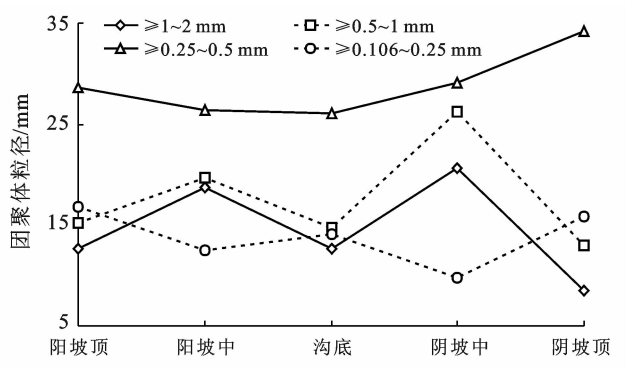


图 1 砒砂岩区土壤水稳定性团聚体粒径分布

表 2 不同坡位的土壤理化性质

样 点	含水率/%	酸碱度	铵态氮/(ug·g^{-1})	有效磷/(ug·g^{-1})	速效钾/(ug·g^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})	全氮/(g·kg^{-1})	全碳/(g·kg^{-1})	钙含量/(mg·kg^{-1})
阳坡顶	9.52±0.52^{b}	9.27±0.06^{a}	7.97±0.83^{a}	6.06±0.47^{a}	8.63±9.54^{b}	0.31±0.07^{b}	0.39±0.06^{a}	14.26±1.65^{a}	26.64±4.75^{a}
阳坡中	7.68±0.68^{b}	9.11±0.05^{ab}	6.14±0.31^{b}	7.54±1.37^{a}	34.88±10.48^{a}	0.41±0.13^{ab}	0.33±0.06^{a}	5.3±0.93^{b}	16.28±2.43^{b}
沟 底	7.94±0.86^{b}	8.90±0.09^{bc}	5.17±0.62^{b}	3.16±0.36^{b}	20.33±5.93^{ab}	0.59±0.08^{a}	0.37±0.04^{a}	3.51±0.42^{b}	6.20±1.33^{b}
阴坡中	10.40±1.82^{ab}	8.63±0.13^{d}	6.63±0.45^{ab}	2.97±0.39^{b}	15.21±3.16^{b}	0.19±0.04^{b}	0.39±0.03^{a}	3.70±0.28^{b}	8.98±1.42^{b}
阴坡顶	13.13±1.40^{a}	8.76±0.08^{cd}	5.44±0.36^{b}	2.43±0.33^{b}	5.38±1.78^{b}	0.22±0.05^{b}	0.34±0.04^{a}	15.86±4.25^{a}	29.88±5.24^{a}

2.2.2 坡位环境梯度间土壤酶活现状 土壤酶通过土壤微生物分泌的方式参与土壤生态系统营养循环等，土壤酶活性的变化可反映出土壤中各种生化过程的强度及其方向[16]，而砒砂岩样区的土壤酶（酸性、碱性、中性磷酸酶，脲酶，过氧化氢酶，蔗糖酶）活性均很低（见表 3），与该地区独特的地理位置、气候以及土质相关，该区海拔高（1 195～1 340 m），气候寒冷干燥，严酷且脆弱的生态环境加上贫瘠的土壤导致酶活性极低。研究区磷酸酶活性极低、蔗糖酶活性为 2.63～30.01 (mg·d)/g，脲酶活性为 48.85～191.94 (μg·d)/g均在不同坡位间没有显著差异性；过氧化氢酶含量为 14.35～69.17 (μmol·d)/g，阳坡面显著高于阴坡面，可见阳坡土壤生物化学过程强度较大。

2.2.3 砒砂岩区土壤理化、酶活性与土壤微生物数量的响应 表 4 相关性分析显示，土壤真菌数量只与土壤钙含量显著负相关（$p<0.05$），与 pH 值微负相关，一定程度上反映出真菌喜酸的特性；细菌数量与土壤团聚体 0.5 mm≤d≤1 mm 粒径呈极显著负相关（$p<0.01$），与土壤团聚体 0.25 mm≤d≤0.5 mm 粒径显著正相关（$p<0.05$），说明细菌更加适应粒径较小的土壤；细菌数量与含水量以及钙含量均显著负相关（$p<0.05$）；放线菌数量与 pH 值显著正相关（$p<0.05$），这与放线菌喜欢在偏碱性的环境中生长相一致；氮、磷、碳含量均与微生物呈微正相关，而钙含

量、速效钾与各类微生物均负相关。可能由于该区域高寒低温、生境脆弱等极端胁迫的影响,成土过程中的生化作用较弱,使生物累积作用明显,微生物的分解活动受限,造成钙、速效钾含量的累积[24]。

土壤真菌数量与酸性磷酸酶显著正相关($p<0.05$),与其他 5 类酶活无显著相关性;细菌数量与土壤酶呈负相关,但仅与脲酶活性显著负相关($p<0.05$);放线菌数量与碱性、酸性、中性磷酸酶均显著正相关($p<0.05$),与过氧化氢酶呈极其显著正相关($p<0.01$)。

表 3　砒砂岩区坡位环境梯度下土壤酶活性

样 点	碱性磷酸酶/($mg \cdot d^{-1} \cdot g^{-1}$)	酸性磷酸酶/($mg \cdot d^{-1} \cdot g^{-1}$)	中性磷酸酶/($mg \cdot d^{-1} \cdot g^{-1}$)	蔗糖酶/($mg \cdot d^{-1} \cdot g^{-1}$)	过氧化氢酶/($umol \cdot d^{-1} \cdot g^{-1}$)	脲酶/($ug \cdot d^{-1} \cdot g^{-1}$)
阳坡顶	0.001 8±0.000 1^{a}	0.000 9±0.000 1^{a}	0.000 7±0^{a}	9.68±7.03^{a}	50.58±18.59^{a}	90.12±23.65^{a}
阳坡中	0.004±0.001 2^{a}	0.0017±0.0002^{a}	0.001±0.0004^{a}	15.86±7.45^{a}	50.34±10.68^{a}	149.49±42.45^{a}
沟 底	0.002 8±0.000 3^{a}	0.001 3±0.000 3^{a}	0.001±0.000 3^{a}	17.39±12.62^{a}	37.65±12.83^{b}	124.08±39.05^{a}
阴坡中	0.001 9±0.000 4^{a}	0.001 4±0.000 1^{a}	0.070 7±0.001 3^{a}	12.64±4.11^{a}	44.56±15.05^{ab}	117.11±33.26^{a}
阴坡顶	0.002 3±0.000 1^{a}	0.001 3±0.000 5^{a}	0.001±0.000 3^{a}	11.47±4.14^{a}	36.64±22.29^{b}	72.10±23.25^{a}

表 4　砒砂岩区土壤理化、酶活性与微生物数量的相关性分析

菌种	1≤ d≤2	0.5≤ d≤1	0.25≤ d≤0.5	0.106≤ d≤0.25	含水量	酸碱度	铵态氮	有效磷	速效磷	全磷	全氮	全碳	钙含量	碱性磷酸酶	酸性磷酸酶	中性磷酸酶	蔗糖酶	过氧化氢酶	脲酶
真菌	0.052	−0.016	0.110	−0.110	−0.054	−0.047	−0.083	−0.068	−0.038	0.115	0.115	0.034	−0.214*	0.061	0.184*	0.02	−0.022	0.144	−0.112
细菌	0.079	−0.216**	0.200*	−0.121	−0.286**	0.093	−0.166	0.179	−0.104	0.009	0.152	0.123	−0.289**	−0.017	−0.175	−0.13	−0.165	−0.088	−0.194*
放线菌	0.016	−0.026	0.157	0.016	−0.139	0.348**	0.105	0.137	−0.162	0.164	0.015	0.115	−0.129	0.215*	0.215*	0.343**	0.1	0.407**	−0.093

注:* 为在 $p<0.05$ 水平上差异显著;** 为在 $p<0.01$ 水平上差异极显著。

综合土壤理化性质和酶活性指标讨论,砒砂岩区土壤质量较差,强碱性、含水率低、营养物质匮乏,酶活性极低。土壤微生物是土壤生态系统中最活跃的部分,可对外界环境因子的改变作出响应,通过土壤理化性质对土壤微生物数量的 PCA 分析结果显示:微生物数量变化累积百分比为 22.86%,说明土壤理化可以解释微生物数量变化的 22.86%;按特征值排序为:土壤团聚体>含水量>酸碱度>铵态氮>有效磷>速效磷>全磷>全氮>全碳>钙含量,这与相关性检验结果一致,影响微生物分布的主要理化因素有土壤团聚体粒径分布、含水率和 pH 值;在沟底,土壤团聚体粒径 0.106~0.25 mm 占比相对较大,而其他粒径占比相对较少,其土壤微生物数量最多,因为土壤团聚体粒径偏大时,不易保水保肥,从而降低微生物数量和酶活性。土壤微生物数量受含水率的影响较大,过多或太少均不利于微生物生长,而是更加趋于含水量居中的沟底,这是因为含水率较高时不利于微生物呼吸,而含水率较低时又会限制微生物生长发育。研究区土壤 pH 值均呈强碱性,降低了根际土壤养分的吸收和利用,使适宜酸性土壤生长的真菌数量极低。其他理化因子对微生物数量影响作用小,这是由研究区本身贫瘠的土质所致。研究区土质贫瘠,微生物数量较少,导致土壤酶活性极低且物质转换能力降低,反过来影响微生物生长发育,从而影响土壤质量,周而复始。所以在生态环境治理方面要关注地下微生物网络的变化,微生物因快速的生长繁殖能力,在生态治理方面不容小觑。

2.3　砒砂岩区土壤微生物数量与植物群落的生态效应

如图 2 所示,阳坡中的草本层植物 Simpson 和 Shannon-Wiener 多样性指数均显著最小,分别为 0.591 4和 1.779 0;阴坡的多样性指数均大于阳坡;阳坡面的多样性指数呈现阳坡顶(Simpson 指数为 0.737 8,Shannon-Wiener 指数为 2.550 2)与沟底(Simpson 指数为 0.740 2,Shannon-Wiener 指数为 2.369 5)显著大于阳坡中的趋势;阴坡面的多样性指数呈现阴坡顶(Simpson 指数为 0.838 7,Shannon-Wiener 指数为 3.084 1)大于阴坡中(Simpson 指数为 0.812 3,Shannon-Wiener 指数为 2.744 4)大于沟底的趋势。综上,阴阳坡面及坡位高低间的草本植物分异特征较明显,阳坡物种较阴坡多样化和复杂化。坡位间草本植物的生物量表现为沟底(172.28 g/m^2)显著大于其他坡面;阳坡中(36.38 g/m^2)与阴坡中(34.18 g/m^2)的植被生物量显著小于阳坡顶(97.69 g/m^2)与阴坡顶(49.39 g/m^2);无论阳坡面还是阴坡面均呈现:沟底>坡顶>坡中的趋势,这与坡中多呈现裸露状态且植被盖度极低一致。相关性分析表明,只有细菌数量与植被生物量显著正相关($p=0.019<0.05$,Pearson 相关性指数为 0.306。

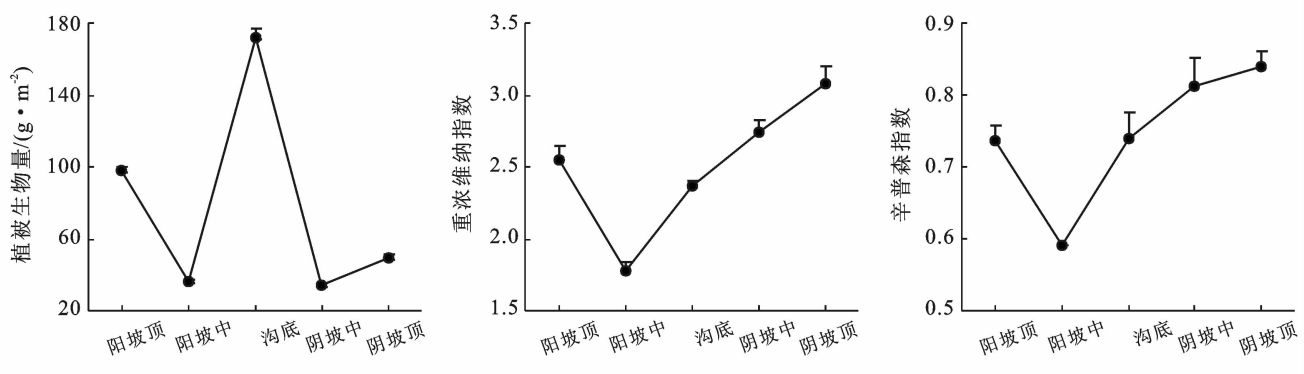


图 2 坡面环境梯度草本植被多样性指数与生物量

通过植被因子与土壤微生物数量 PCA 分析结果：微生物数量变化累积百分比为 29.83%，植被因子只能解释微生物数量变化的 29.83%，说明植被群落差异是土壤微生物群落数量差异的主导因素之一，由于不同坡位的水热组合会导致植被覆盖和土壤性质差异，使得地表群落和地下微生物紧密关联[22]。研究区不同坡位不同植被将形成生态位的微分割，从而在各坡位形成植物多样性和土壤微生物数量联合分布模式。本研究通过对比草本层植物多样性指数和生物量发现：阳面中，坡中的多样性指数和生物量均显著小于坡顶和沟低，在实地调研中，阳坡中以羊草、冷蒿、冰草为主，植被覆盖度(5%～15%)，说明坡中植被群落分布不均匀且群落多样性较低；而在阴坡，沟底的多样性指数显著小于坡顶和坡中($p<0.05$)；整体来看，沟底植被群落多样性低而生物量却高，在实地调研中，沟底以羊草、蒲公英、艾草等杂类草为主，植被覆盖度(65%～75%)较高，结合微生物数量(细菌与放线菌均最高)在沟底显著高于其他坡位来看，沟壑区域内细菌和放线菌更倾向于水热条件居中的沟底，且受群落多样性影响较小，受植被生长状况影响较大，这也应征了该区植物“柔性坝”在砒砂岩侵蚀的沟底优先种植的策略[24]。阴坡的多样性指数均大于阳坡，生物量却低于阳坡，表明在砒砂岩独特且脆弱的生境中，长时间的光辐射结合保水能力差的地质会降低植被多样性和土壤微生物数量。未来在砒砂岩修复治理中，研究坡位环境梯度下微生物群落结构与功能的多样性，发掘各坡位本土微生物与植被之间的特定联合关系对于砒砂岩区环境治理与生物保育具有重要指导作用，可优先治理坡顶和沟底的植被，从而随着物种迁移和漂变过渡衍生到坡中，要注重保水保肥，以及植被覆盖，从而提高土壤微生物的生长繁殖能力，反过来提高土质，从而循序渐进的治理。

3 结 论

(1) 研究区土壤微生物区系中细菌为优势类群，放线菌次之，真菌很少，坡位环境梯度与土层显著影响土壤微生物各生理类群数量，其中坡位导致土壤微生物数量的分异，且随环境质量恶化，土壤微生物数量减少。不同坡位土壤微生物总量的变化趋势与植物多样性指数的变化趋势不一致，而与植被生物量变化趋势一致，均为阳坡面＞阴坡面，沟底＞坡顶＞坡中，微生物数量受群落多样性影响较小，受植被生长状况影响较大，未来可以多关注沟底的植被—微生物资源。

(2) 不同坡位土壤磷酸酶、蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶活性各异，含量极低，对土壤微生物数量的响应较轻。砒砂岩土壤水稳性团聚体粒径多介于 0.25～0.5 mm，0.106～0.25 mm 粒径占比小；阳坡砂粒土壤较其他坡位小，黏粒土壤较其他坡位大；土壤含水量呈现阴坡＞沟底＞阳坡；土壤的 pH、铵态氮、有效磷、全碳、全钙含量均为阳坡顶大于其他坡位。土壤含水量、光照、pH 值、酶活性以及土壤理化性质的特征适宜的沟底环境适合该区域土壤微生物及植被的生长与分布。植物—土壤—微生物数量之间表现出相互促进与制约的关系，土壤微生物数量变化与植被生物量一致、不同的微生物与土壤质量趋于各自的生态适应性，而含水量和光照既促进又制约着微生物数量的变化，研究区土壤酶活性低，反过来又制约着土壤微生物和植物的生长发育。

(3) 砒砂岩区土壤微生物数量变化的驱动因子主要是坡位与土层(37.31%)，植被因素次之(29.83%)，土壤理化最小(22.86%)，其中土壤团聚体粒径与含水量显著影响土壤微生物数量变化，环境因素不能完全解释土壤微生物数量分布的变化。

[参 考 文 献]

[1] Liu Mingjie, Liu Zhen, Wang Peng, et al. Diagenesis of the Triassic Yanchang formation tight sandstone reservoir in the Xifeng-Ansai area of Ordos Basin and its porosity evolution [J]. Acta Geologica Sinica-English Edi-

tion, 2016,90(3):956-970.

[2] 王甜甜,赵伟,王利明,等.不同土地利用类型土壤微生物群落特征及其影响因素[J].环境污染与防治,2019,41(9):1082-1087.

[3] 葛磊,李娟,彭飚.鄂尔多斯砒砂岩微观结构特征研究[J].西部大开发(土地开发工程研究),2019(8):36-42.

[4] 李传福,刘阳,党晓宏,等.鄂尔多斯砒砂岩区生态恢复研究进展[J].内蒙古林业科技,2019,45(1):49-52.

[5] 姚宝辉,王缠,张倩,等.甘南高寒草甸退化过程中土壤理化性质和微生物数量动态变化[J].水土保持学报,2019,33(3):138-145.

[6] Dilly O, Munch J C. Ratios between estimates of microbial biomass content and microbial activity in soils [J]. Biology and Fertility of Soils, 1998,27(4):374-379.

[7] Somova L A, Pechurkin N S. Functional, regulatory and indicator features of microorganisms in man-made ecosystems [J]. Advances in Space Research, 2001,27(9):1563-1570.

[8] 王宝荣,杨佳佳,安韶山,等.黄土丘陵区植被与地形特征对土壤和土壤微生物生物量生态化学计量特征的影响[J].应用生态学报,2018,29(1):247-259.

[9] 郑周敏.黄土高原不同封育年限草地土壤理化和生物学性质变化[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.

[10] 沈萍,陈向东.微生物学实验[M].北京:高等教育出版社,2007.

[11] 赵兰坡,姜岩.土壤磷酸酶活性测定方法的探讨[J].土壤通报,1986(3):138-140.

[12] 王荫槐.土壤肥料学[M].北京:农业出版社,1992.

[13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.

[14] 王富延.分析转基因大豆种植对根际土壤酶活性和养分的影响[J].种子科技,2019,37(11):7-8.

[15] 陈正兴,高德新,张伟,等.黄土丘陵沟壑区不同坡向撂荒草地植物群落种群空间格局[J].应用生态学报,2018,29(6):1846-1856.

[16] 张冰.干扰对植物群落组成及多样性的影响[J].河南农业大学,2018,455(3),49-50.

[17] 杨婷.坡位对土壤微生物特征与生态化学计量特征的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2016.

[18] 江聪,税伟,简小枚,等.西南喀斯特退化天坑负地形倒石坡的土壤微生物分布特征[J].生态学报,2019,39(15):5642-5652.

[19] 邵宝林,龚国淑,张世熔,等.横断山北部高山区不同生态条件下土壤微生物数量及其与生态因子的相关性[J].生态学杂志,2006,25(8):885-890.

[20] 张萍,刀志灵,郭辉军,等.高黎贡山不同土地利用方式对土壤微生物数量和多样性的影响[J].植物分类与资源学报,1999,21(S1):84-89.

[21] Jia Binghao, Wang Yuanyuan, Xie Zhenghui. Responses of the terrestrial carbon cycle to drought over China: Modeling sensitivities of the interactive nitrogen and dynamic vegetation[J]. Ecological Modelling, 2018,368:52-68.

[22] 贾昭,简春霞,熊沛枫,等.黄土丘陵区退耕草地群落盖度与地上生物量关系[J].水土保持研究,2020,27(1):319-327.

[23] 任佐华,张于光,李迪强,等.三江源地区高寒草原土壤微生物活性和微生物量[J].生态学报,2011,31(11):3232-3238.

[24] Jin Yinghua, Zhang Yingjie, Xu Zhiwei, et al. Soil microbial community and enzyme activity responses to herbaceous plant expansion in the Changbai Mountains tundra, China [J]. Chinese Geographical Science, 2019,29(6):985-1000.

(上接接 14 页)

[30] Ludwig J A, Wiens J A, Tongway D J. A scaling rule for landscape patches and how it applies to conserving soil resources in savannas [J]. Ecosystems, 2000,3(1):84-97.

[31] Cammeraat L H, Imeson A C. The evolution and significance of soil-vegetation patterns following land abandonment and fire in Spain [J]. Catena, 1999,37(1):107-127.

[32] Ludwig J, Tongway D, Hodgkinson K, et al. Landscape ecology, function and management: Principles from Australia's rangelands[J]. Journal of Applied Ecology, 1996,34(5):1323-1324.

[33] Bestelmeyer B T, Ward J P, Havstad K M. Soil-geomorphic heterogeneity governs patchy vegetation dynamics at an arid ecotones [J]. Ecology, 2006,87(4):963-973.