

DOI: 10.5846/stxb201310302611

杨佳佳, 安韶山, 张宏, 陈亚南, 党廷辉, 焦菊英. 黄土丘陵区小流域侵蚀环境对土壤微生物量及酶活性的影响. 生态学报, 2015, 35(17): 5666-5674.

Yang J J, An S S, Zhang H, Chen Y N, Dang T H, Jiao J Y. Effect of erosion on soil microbial biomass and enzyme activity in the Loess Hills. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17): 5666-5674.

黄土丘陵区小流域侵蚀环境对土壤微生物量及酶活性的影响

杨佳佳^{1,2}, 安韶山^{1,2,*}, 张宏², 陈亚南², 党廷辉^{1,2}, 焦菊英¹

1 西北农林科技大学, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨陵 712100

2 西北农林科技大学资源环境学院, 杨陵 712100

摘要: 土壤侵蚀环境直接影响土壤的特性, 对土壤微生物的形成和稳定具有重要的影响。土壤微生物量推动着土壤的物质循环和能量流动, 对土壤中各种环境的变化有很强的敏感性。土壤酶活性能表示土壤微生物功能的多样性, 与土壤微生物量有着紧密的联系。为了探究不同侵蚀环境对土壤微生物量和酶活性的影响, 以黄土丘陵区陈家孤小流域为研究区, 选择 5 种不同侵蚀环境下 0—10cm 和 10—20cm 土层的土壤为研究对象, 对土壤微生物量及其土壤蔗糖酶、脲酶和碱性磷酸酶活性进行了研究。结果表明: (1) 土壤微生物量碳、氮、磷含量均表现为 0—10cm 大于 10—20cm 土层; 土壤微生物量碳和磷在阴沟坡最大, 在阳梁崩坡和崩顶较小, 且阴沟坡和崩顶差异显著; 土壤微生物量氮在阳沟坡最大, 阴阳梁崩坡最小, 差异性显著 ($P < 0.01$)。 (2) 土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性均表现为 0—10cm 大于 10—20cm 土层, 且在不同侵蚀环境下均表现为阴梁崩坡最大, 阳梁崩坡最小。 (3) 相关性分析表明, 土壤微生物量碳、氮、磷与土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶活性之间均有极显著的正相关。

关键词: 黄土丘陵; 侵蚀环境; 土壤微生物量; 酶活性

Effect of erosion on soil microbial biomass and enzyme activity in the Loess Hills

YANG Jiajia^{1,2}, AN Shaoshan^{1,2,*}, ZHANG Hong², CHEN Yanan², DANG Tinghui^{1,2}, JIAO Juying¹

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture of Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 College of Resource and Environmental Science, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract: Erosion directly affects soil characteristics and has a significant effect on the formation and stability of the soil microbial community. Soil microbial biomass not only plays a significant role in energy flow and nutrient cycling, but it also shows great sensitivity to changes in soil environment. Soil enzyme activities are indicative of the functional diversity of the soil microbial community, as they are closely associated with soil microbial biomass. To reveal the effect of different erosion environments on soil microbial biomass and soil enzyme activities, soil samples were collected from the Chengjiawa watershed, located in the Yanhe watershed of the hill and gully region of Ansai County, Yan'an, Shaanxi Province, China. Soil samples were collected from five erosion environments in the valley, at depths of 0—10 cm and 10—20 cm. We studied the characteristics of soil microbial biomass including carbon, nitrogen, and phosphorus, soil enzyme activities including soil urease, invertase, and alkaline phosphatase, and correlations between soil microbial biomass and enzyme activities. The results showed that: (1) Soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus were significantly different between the 0—10 cm and 10—20 cm soil

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(41030532); 国家自然科学基金面上项目(41171226); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0479)

收稿日期: 2013-10-30; **网络出版日期:** 2014-11-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shan@ms.iswc.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

layers; soil microbial biomass carbon and phosphorus in the shaded lower slopes were higher than in the other tested environments, whereas in the sunny middle slope and the hill top they were lower than in the other tested soil environments. The difference between the shaded lower slopes and sunny hill top were significant. Soil microbial biomass nitrogen in the sunny lower slope was significantly higher than in the other tested soil environments. Overall, soil microbial biomass of the ditch slope was higher than in the other tested environments. This suggested that the erosion affects the soil microbial properties, and that soil nutrient accumulation and mineralization ability of soils on the downhill slope were higher than in other tested locations. (2) Soil urease, sucrase, and alkaline phosphatase activities were higher in the 0—10 cm layer than in the 10—20 cm layer. In different erosion environments, soil enzyme activities were higher in the shaded middle slope than in any other tested environments, while they were the lowest in the sunny middle slopes. Soil alkaline phosphatase activity did not significantly differ between different soil environments. Soil invertase activity in the shaded middle slopes was significantly different from the other four types of erosion environments. The difference in soil urease activity between the shaded lower slope and other tested environments was significant. Comparisons showed that the environment exposed to erosion affected the properties of soil enzyme activities; the responses of soil invertase and urease were more sensitive to changes in the soil environment. (3) Pearson correlation analysis showed that soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus were significantly positively correlated with each other, as were the soil urease, sucrase, and alkaline phosphatase activities. There was a significant positive correlation between soil microbial biomass and soil enzyme activities, which suggested that these two properties were closely linked and inseparable components of the soil microbial community. Different environments exposed to erosion have diverse levels of soil organic matter content, different physicochemical properties of the soil, diverse forms of soil microbes, and differ in the amount of soil microbial biomass and soil enzyme activities. These differences were reflected in the soil quality, vegetation types, and resistance to soil erosion.

Key Words: Loess Hills; erosion environment; soil microbial biomass; enzyme activity

土壤酶主要来源于土壤中动物、植物和微生物细胞的分泌物及其有机残体的分解物^[1],土壤中各种营养物质的转化及矿质化过程,主要取决于酶的酶促作用^[2],因此土壤酶活性反映了土壤中各种生物化学过程的强度和方向^[3],对评价土壤肥力有着重要的作用^[4]。土壤微生物量是土壤活性养分的储存库,是植物养分的有效来源^[5],它是土壤中物质循环和能量流动的重要推动力^[6],对土壤的各种环境变化表现出很大的敏感性。土壤微生物量充分反映了不同的土地利用方式、生态功能及其各种侵蚀环境的变化^[7],因而具有更加灵敏、准确的反映微生物在土壤中的含量和作用潜力^[5]。

黄土丘陵区由于土壤具有特殊的形成过程和特殊的地形特点导致水土流失严重、土壤肥力贫瘠,生态环境脆弱,而不同侵蚀地形又可以通过光照分布影响土壤水热条件^[8],导致不同侵蚀地形土壤养分在降雨侵蚀过程中发生再分配,而有研究表明土壤微生物量和土壤酶活性对环境的变化有很大的敏感性^[5],因此侵蚀地形环境的变化会对土壤微生物生物量及其土壤酶活性产生重大的影响。目前已有学者就黄土高原植被恢复后不同土地利用方式、不同植被类型等条件研究了其土壤微生物生物量分布的变化特征^[8-10],而对各种侵蚀地形条件下土壤理化性状及土壤微生物功能的研究还较少,因此,本文以黄土丘陵区陈家孤小流域为背景,研究小流域侵蚀环境对土壤微生物量及其酶活性的影响,以期从土壤微生物学的角度研究侵蚀环境下土壤微生物量及其酶活性的变化特征及相关关系,探讨二者对侵蚀环境的敏感性,为区域植被恢复,改善生态环境,提高土壤质量管理提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陈家孤小流域位于延安市安塞县招安镇,属于典型的黄土丘陵沟壑区。地处北纬 36°49′00″—36°50′54.46″,东经 109°15′31″—109°19′46″,流域总面积 11.29 km²,海拔 1056—1400 m。此外,该流域中有少量平地,

<http://www.ecologica.cn>

占流域总面积的 0.55%。该流域地形地貌复杂,从南到北呈梁、崩、塌、湾、坪、川等地貌,地形坡度主要集中在 5—45°,占流域总面积的 94.28%,其中阴坡所占比例为 54.98%,大于阳坡 44.47%,年平均气温为 9.1℃,年平均降雨量 428.1 mm,土壤类型以黄绵土为主,植被群落以灌木和草本植被为主。

1.2 样点的布设与采集

在陈家瓜流域研究区内,为尽量保证野外采样在地形及其植被群落上的一致性,根据典型的植被群落选取 3 个山丘的梁崩,在每个梁崩上按照不同的侵蚀环境选取 5 个地貌部位,分别为梁崩顶、阳梁崩坡、阳沟坡、阴沟坡和阴梁崩坡;在每个地貌部位处均选取 3 个 10 m × 10 m 的样方。采样分布图如图 1 所示。

样品采集于 2012 年 7 月份。土壤样品的采集是在样方内按照随机均匀分布的原则,采用“S”型路线选择 5—6 个点进行多点混和,用土钻分别采集 0—10 cm 和 10—20 cm 两层土样,分层将混匀后的土样用塑封袋装好带回实验室,一部分保存新鲜土样,存于 -20℃ 冰箱保存测定土壤微生物量;一部分经自然风干后过 0.149 mm 和 1 mm 土筛测土壤理化性状和酶活性。5 种侵蚀环境地貌部位下样地主要建群种名称:狼牙刺(*Sophora davidii*),丁香(*Syzygium aromaticum*),茭蒿(*Artemisia giraldii*),达乌里胡枝子(*Lespedeza dahurica*),铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*),杠柳(*Periploca sepium bunge*),阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*),沙棘(*Elaeagnaceae Hippophae*),长芒草(*Stipa bungeana*),中华隐子草(*Cleistogenes chinensis*),中华卷柏(*Selaginella sinensis*),柠条(*Caragana intermedia*)。采样点基本信息如表 1 所示。

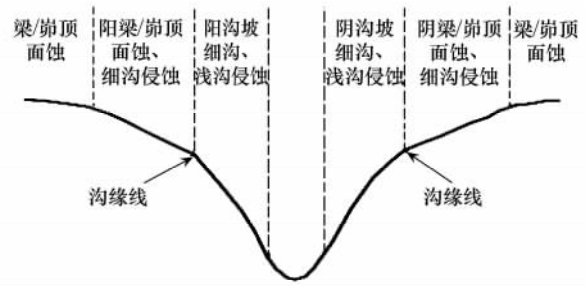


图 1 采样点分布图

Fig. 1 Maps of sampling spots distribution

表 1 采样点信息

Table 1 Information of sampling sites

样点号 Sample sites	侵蚀环境 Erosion environment	海拔 Altitude/m	经度 Longitude	纬度 Latitude	坡度 Slope/(°)	群落名称 Vegetation types
1	阳沟坡	1179	109°17'49.3"	36°50'16.6"	49	狼牙刺、丁香 + 茭蒿、达乌里胡枝子、铁杆蒿
2		1196	109°17'32.27"	36°50'14.43"	28	狼牙刺 + 达乌里胡枝子、杠柳、铁杆蒿、茭蒿
3		1133	109°18'20.31"	36°50'10.28"	35	狼牙刺、杠柳 + 铁杆蒿、茭蒿
4	阳梁崩坡	1198	109°17'49.35"	36°50'19.43"	30	铁杆蒿、茭蒿、达乌里胡枝子
5		1261	109°17'28.73"	36°50'17.92"	24	狼牙刺 + 白羊草、铁杆蒿、达乌里胡枝子、阿尔泰狗娃花
6		1223	109°18'24.95"	36°50'15.61"	29	沙棘 + 达乌里胡枝子、铁杆蒿、阿尔泰狗娃花
7	崩顶	1258	109°17'31.75"	36°50'23.09"	15	杠柳 + 铁杆蒿、阿尔泰狗娃花、长芒草、达乌里胡枝子
8		1251	109°18'21.19"	36°50'26.32"	10	铁杆蒿、茭蒿
9		1255	109°18'18.33"	36°49'56.25"	18	达乌里胡枝子、长芒草、铁杆蒿、阿尔泰狗娃花
10	阴梁崩坡	1212	109°17'37.74"	36°50'6.3"	30	铁杆蒿、长芒草
11		1268	109°18'17.78"	36°50'0.24"	26	杠柳 + 铁杆蒿、中华隐子草、茭蒿
12		1266	109°18'1.08"	36°50'5.86"	28	铁杆蒿
13	阴沟坡	1134	109°17'36.28"	36°50'10.2"	22	中华卷柏、铁杆蒿
14		1191	109°18'19.7"	36°50'2.62"	32	铁杆蒿、达乌里胡枝子
15		1188	109°18'2.95"	36°50'9.62"	32	铁杆蒿、丁香、柠条、茭蒿

1.3 测定方法

土壤微生物量碳、氮采用氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提法^[11];微生物量碳采用 TOC 仪测定;微生物量氮采用高压锅-碱性过硫酸钾氧化^[12]后,在波长 220 nm 和 275 nm 进行双波长比色测定(UV-2450 紫外分光光度计)。土壤脲酶采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定,以 NH₃-N mg/g (37 °C, 24 h)表示;土壤蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,以葡萄糖 mg/g (37 °C, 24 h)表示;土壤碱性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法,以酚含量 mg/g (37 °C, 10 h)表示^[1]。不同侵蚀环境土壤基本理化性质见表 2:

表 2 土壤基本理化性质
Table 2 Soil basic physicochemical characters

侵蚀环境 Erosion environment	土层 layers/cm	含水量 Moisture/%	pH	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	有机质 Organic matter/ (g/kg)	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)
阳沟坡	0—10	1.37±0.35a	8.05±0.06a	1.16±0.05a	5.54±0.90a	0.55±0.090ac	0.55±0.04a
Sunny lower	10—20	1.46±0.48a	8.16±0.05a	1.25±0.04a	4.33±0.70a	0.44±0.07ac	0.53±0.05a
阳梁峁坡	0—10	1.27±0.22a	8.04±0.03a	1.26±0.06b	4.04±0.76b	0.44±0.07b	0.55±0.07ab
Sunny middle	10—20	1.39±0.40a	8.18±0.03a	1.29±0.09a	2.94±0.58b	0.31±0.06b	0.53±0.06a
峁顶	0—10	1.22±0.08a	7.99±0.06a	1.20±0.05ab	5.93±0.85a	0.53±0.04a	0.57±0.06ab
Hill top	10—20	1.33±0.09a	8.12±0.02ab	1.26±0.04a	4.11±0.38a	0.39±0.05a	0.55±0.07ab
阴梁峁坡	0—10	1.33±0.11a	8.00±0.04a	1.23±0.07ab	6.99±2.13c	0.62±0.16c	0.59±0.07b
Shady middle	10—20	1.30±0.15a	8.10±0.04b	1.25±0.07a	4.80±1.48a	0.47±0.14c	0.57±0.07ab
阴沟坡	0—10	1.41±0.38a	8.03±0.02a	1.21±0.05ab	5.49±0.87a	0.54±0.04a	0.60±0.05b
Shady lower	10—20	1.60±0.61a	8.10±0.03b	1.25±0.07a	4.22±0.49a	0.43±0.04ac	0.59±0.05b

不同小写字母表示同一土层土壤不同侵蚀环境下差异显著性 ($P < 0.05$)

1.4 数据处理

数据处理和分析采用 Microsoft Excel 2007 和 SPAS 18.0 软件,进行 (One-Way A NOVA) 方差分析和相关性分析,多重比较采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 不同侵蚀环境下土壤微生物量的分布特征

2.1.1 不同侵蚀环境下土壤微生物量碳的分布特征

不同侵蚀环境下土壤微生物量碳的分布特征如图 2 所示;在不同侵蚀环境下土壤微生物量碳含量变化范围在 122.54—380.18 mg/kg 之间,并且随着土层的加深表现为 0—10 cm 层大于 10—20 cm 层,即微生物量碳含量显著减小。对不同的侵蚀环境,土壤微生物量碳对其响应不同,在 0—10 cm 土层微生物碳含量变化范围在 278.93—380.18 mg/kg 之间,最大值是最小值的 1.36 倍,极差为 101.25 mg/kg,表现为阴沟坡、阳沟坡 > 阴梁峁坡 > 阳梁峁坡、峁顶;在 10—20 cm 土层土壤微生物量碳含量变化范围在 122.54—208.81 mg/kg 之间,最大值是最小值的 1.70 倍,极差是 86.27 mg/kg,表现为阴沟坡、阳沟坡 > 阴梁峁坡 > 峁顶、阳梁峁坡。差异性分析表明,微生物量碳 0—10 cm 土层和 10—20 cm 土层差异性极为显著,且阴沟坡和峁顶差异显著,而阳梁峁坡和阴梁峁坡差异不显著。

2.1.2 不同侵蚀环境下土壤微生物量氮的分布特征

土壤微生物量氮含量分布特征如图 2 所示。在不同的侵蚀环境下,土壤微生物量氮的变化范围在 27.58—76.17 mg/kg 之间,并随着土层的加深微生物量氮含量显著减小。对不同的侵蚀环境,不同土层的响应不同,在 0—10 cm 土层微生物量氮最小值和最大值分别是 69.31 mg/kg 和 76.17 mg/kg,极差是 6.86,表现为阳沟坡最大,阴梁峁坡最小,5 种侵蚀环境差异不显著。10—20 cm 土层土壤微生物量氮含量最小值和最大值 27.58—38.51 mg/kg,极差 10.93,表现为阳沟坡最大,阳梁峁坡和阴沟坡最小。土壤微生物量氮含量整体表现为 0—10 cm 土层大于 10—20 cm 土层,且差异极显著。差异性分析表明,不同侵蚀地形对微生物量

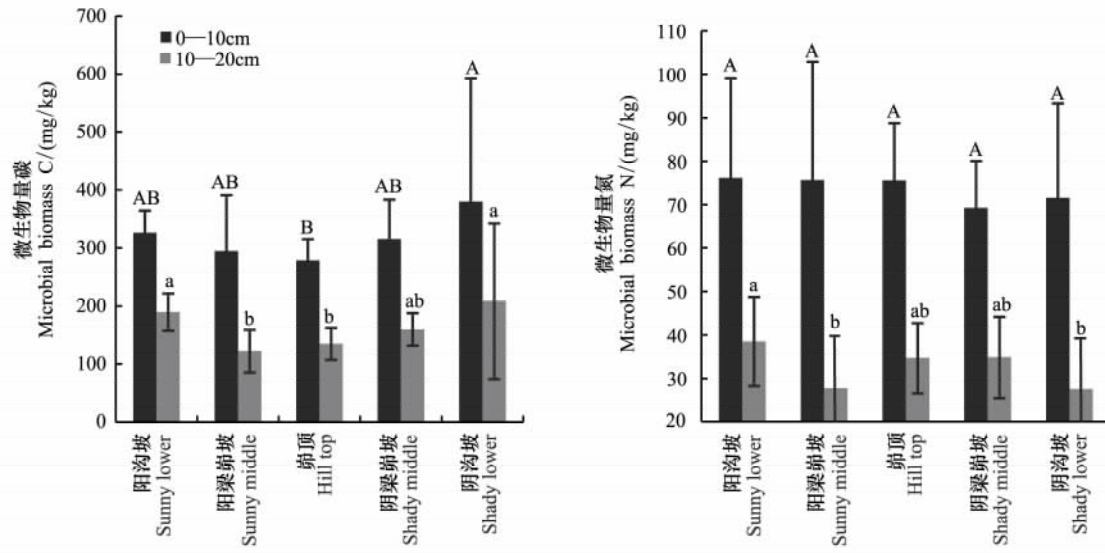


图 2 不同侵蚀环境下土壤微生物量碳、氮含量

Fig. 2 Soil microbial biomass C and N content in different erosion environment

不同大(小)写字母表示 0—10 cm(10—20cm)土壤不同侵蚀环境下差异显著性 ($P < 0.05$)

氮的影响较小,仅 10—20 cm 土层的微生物量氮在阳沟坡与阳梁崩坡和阴沟坡有显著差异性。

2.1.3 不同侵蚀环境下土壤微生物量磷的分布特征

土壤微生物量磷含量分布如图 3 所示。在不同的侵蚀环境下,土壤微生物量磷含量变化范围 1.78—10.19 mg/kg 之间,且 0—10 cm 土层土壤微生物量磷含量显著高于 10—20 cm 土层。具体地说,在 0—10 cm 土层微生物量磷含量最大值和最小值分别为 5.25 mg/kg 和 10.19 mg/kg,其最大值是最小值的 1.94 倍。在不同的侵蚀环境下微生物量磷表现为阴沟坡 > 阴梁崩坡 > 崩顶 > 阳梁崩坡 > 阳沟坡,且阴坡微生物量磷含量大于阳坡。10—20 cm 土层微生物量磷含量最大值和最小值分别为 5.85 mg/kg 和 1.84 mg/kg,最大值是最小值的 3.28 倍,表现为阴沟坡最大,阳梁崩坡最小。土壤微生物量磷含量整体表现为 0—10 cm 土层 > 10—20 cm 土层,且差异显著;方差分析表明,除阴沟坡与其它 4 种侵蚀环境有显著的差异之外,其余侵蚀环境差异均不显著。

2.2 不同侵蚀环境下土壤酶活性分布特征

土壤脲酶是一种高度专一性的水解酶,它能促进尿素水解生成氨、二氧化碳和水,加速土壤中潜在养分的有效化,对提高氮肥利用率有重要的意义。土壤脲酶在不同侵蚀环境下的分布特征如表 3 所示。随着土层的加深,土壤脲酶活性降低即 0—10 cm 土层高于 10—20 cm 土层。在 0—10 cm 土层,脲酶含量最大值和最小值分别为 $1.14 \text{ mg g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$ 和 $0.612 \text{ mg g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$,不同的侵蚀环境下脲酶表现为阴梁崩坡 \geq 崩顶 > 阳沟坡 > 阳梁崩坡 > 阴沟坡,且阴坡脲酶含量大于阳坡。在 10—20 cm 土层,土壤脲酶最大值是 $0.734 \text{ mg g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$,最小值是 $0.278 \text{ mg g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$,在不同侵蚀环境下表现为阴梁崩坡最大,阳梁崩坡最小。在不同的侵蚀环境下,阴沟坡和阳梁崩坡与其它 3 种侵蚀环境均有显著的差异性。

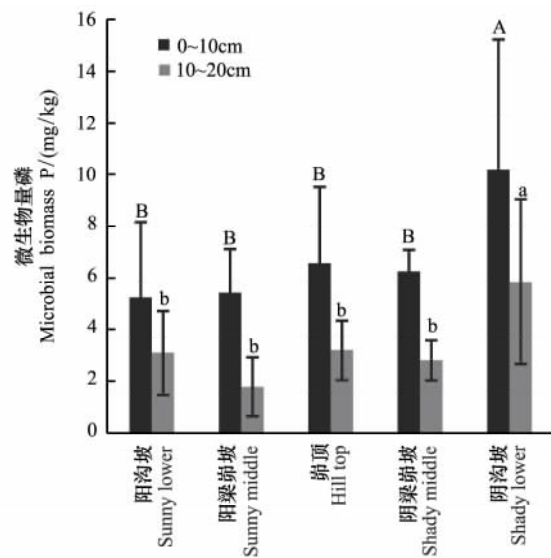


图 3 不同侵蚀环境下土壤微生物量磷含量

Fig. 3 Soil microbial biomass P content in different erosion environment

土壤蔗糖酶对增加土壤中易溶性的营养物质和促进土壤碳循环有着重要的作用。在不同侵蚀环境下土壤蔗糖酶的分布特征如表 3 所示。随着土层的加深,0—10 cm 土层高于 10—20 cm 土层。在 0—10 cm 土层,最大值是 22.469 mg g⁻¹ 24 h⁻¹,最小值是 9.230 mg g⁻¹ 24 h⁻¹,表现为阴梁崩坡最大,阳梁崩坡最小。在 10—20 cm 土层,最大值是 9.69 mg g⁻¹ 24 h⁻¹,最小值是 2.458 mg g⁻¹ 24 h⁻¹,5 种侵蚀环境的变化与 0—10 cm 土层的变化一致。显著性分析表明,0—10 cm 土层阴梁崩坡与其余 4 种侵蚀环境均有显著的差异性,10—20 cm 土层崩顶、阴梁崩坡和阴沟坡与阳梁崩坡和阳沟坡有显著的差异性。

土壤碱性磷酸酶能水解土壤中有机磷化合物并生成被植物直接吸收利用的无机态磷,对土壤中磷的循环有重要的作用。如表 3 所示,在不同的侵蚀环境下,土壤碱性磷酸酶的活性表现为 0—10 cm 土层高于 10—20 cm 土层。在 0—10 cm 土层磷酸酶的变化范围在 0.264—0.332 mg g⁻¹ 10 h⁻¹,10—20 cm 土层磷酸酶的变化范围在 0.118—0.198 mg g⁻¹ 10 h⁻¹,5 种侵蚀环境下碱性磷酸酶在 0—10 cm 土层与 10—20 cm 土层的变化一致,均表现为阴梁崩坡最大,阳梁崩坡最小。差异性分析表明,土壤碱性磷酸酶在 5 种侵蚀环境下差异不显著。

表 3 不同侵蚀环境下土壤酶活性的分布特征

Table 3 Soil enzyme activities during different erosion environment

侵蚀环境 Erosion environment	土壤层次/cm Soil layers	脲酶 Urease/ (mg g ⁻¹ 24 h ⁻¹)	蔗糖酶 Invertase/ (mg g ⁻¹ 24 h ⁻¹)	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase/ (mg g ⁻¹ 10 h ⁻¹)
阳沟坡	0—10	0.930±0.320a	10.570±4.046bc	0.310±0.067a
Sunny lower	10—20	0.695±0.258a	4.327±2.537bc	0.180±0.042a
阳梁崩坡	0—10	0.633±0.195b	9.230±3.527c	0.264±0.044a
Sunny middle	10—20	0.278±0.108b	2.458±0.902c	0.118±0.014b
崩顶	0—10	1.083±0.244a	12.950±2.303bc	0.285±0.078a
Hill top	10—20	0.704±0.186a	6.477±2.153ab	0.184±0.045a
阴梁崩坡	0—10	1.14±0.578a	22.469±10.571a	0.332±0.122a
Shady middle	10—20	0.734±0.415a	9.690±7.185a	0.198±0.101a
阴沟坡	0—10	0.612±0.236b	14.578±2.916b	0.331±0.086a
Shady lower	10—20	0.358±0.189b	7.468±3.659ab	0.166±0.034a

不同小写字母表示 0—10 cm(10—20cm)土壤不同侵蚀环境下差异显著性 ($P<0.05$)

2.3 土壤微生物量与酶活性的相关性分析

将不同侵蚀环境下土壤微生物量碳、氮、磷与土壤酶活性进行 Pearson 相关性分析,结果如表 4 所示。可以看出,土壤微生物量与土壤酶活性之间有极显著的相关性,其中,土壤微生物量碳、氮、磷彼此之间呈极显著的正相关,且土壤微生物量碳、氮、磷均与土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶活性表现出了极显著的正相关。土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶活性之间也表现出了极显著的正相关。这说明土壤微生物量与土壤酶活性有着紧密的联系,不可分割。

表 4 土壤微生物量与土壤酶活性的相关性分析

Table 4 Correlation coefficients of soil microbial biomass and soil enzyme activities

相关系数 Correlation coefficients	微生物量碳 Microbial biomass C	微生物量氮 Microbial biomass N	微生物量磷 Microbial biomass P	脲酶 Urease	蔗糖酶 Invertase	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase
微生物量碳 Microbial biomass C	1	0.763**	0.807**	0.421**	0.577**	0.508**
微生物量氮 Microbial biomass N		1	0.634**	0.550**	0.511**	0.595**
微生物量磷 Microbial biomass P			1	0.314**	0.433**	0.399**
脲酶 Urease				1	0.699**	0.667**
蔗糖酶 Invertase					1	0.762**

<http://www.ecologica.cn>

相关系数 Correlation coefficients	微生物量碳 Microbial biomass C	微生物量氮 Microbial biomass N	微生物量磷 Microbial biomass P	脲酶 Urease	蔗糖酶 Invertase	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase
碱性磷酸酶 Alkalinephosphatase						1

** $P < 0.01$; $n = 90$

3 讨论

3.1 不同侵蚀环境对土壤微生物量的影响

土壤微生物在土壤生态系统参与所有有机物质的分解和转化^[5],对土壤生态环境的变化极为敏感,可以反映土壤质量的变化和人类活动的干扰。不同侵蚀地形上土壤性质的差异可以用来评价不同坡位土壤对外界环境变化和的响应能力^[13]。土壤微生物在不同的侵蚀地形上由于土壤水分、养分、光照、植被等因素的差异会影响土壤微生物对资源的利用策略,从而影响土壤微生物生物量的大小^[14]。本研究结果表明,土壤微生物量碳、氮、磷在不同侵蚀地形下表现不同,土壤微生物量碳表现为阴沟坡、阳沟坡较大,崩顶较小,整体上表现为阴坡大于阳坡,这一方面是受植被类型的影响,有研究表明,土壤微生物量受优势植物群落的影响较大^[15],本研究中阴坡和阳坡有着不同的植物群落;另一方面是受坡向坡位的影响,本研究区土壤的含水量、土壤有机碳含量均表现阴坡大于阳坡,说明阴坡有着相对阳坡较好的水热条件、土壤容重、土壤养分等环境因子^[16],物种生物多样性高^[17],土壤质量较高,使得阴坡微生物生长分泌较阳坡好;土壤地形的影响主要是因为随着坡面的径流和侵蚀,养分含量较高的表土及细小的土壤颗粒最易流失,在不同坡面地形部位沉积^[18],最终导致在沟坡地形即阴沟坡养分富集,使得微生物量含量增加。土壤微生物量氮含量在阳沟坡最大,与微生物量碳和磷在不同侵蚀环境表现出不一致。有研究表明,从草本群落到乔灌草群落,土壤氮素含量增加^[19],这与本研究的结果相符。本研究中阳沟坡的植物群落主要以狼牙刺群落为主的灌草群落,其狼牙刺的根瘤可以固氮,增加了土壤氮素含量,而阴坡主要是以铁杆蒿为主的草本群落,土壤氮素含量较低。随植被恢复的进行,植物生长所产生的根系分泌物以及枯枝落叶等在土壤中经过积累、矿化,改善土壤的物理性质和同期状况,导致土壤微生物活动性增强,对氮素的固定、转化能力增强^[20]。就土壤湿度而言,大多数学者认为湿度是氮素矿化的最重要的环境因子,会强烈影响土壤微生物量氮的含量^[21],本研究中阳沟坡较梁崩坡和崩顶的土壤含水量略高,因此土壤微生物量氮含量略大。研究指出,不同侵蚀地形上的土壤养分在降雨侵蚀再分配过程会导致坡面沟坡较崩坡土壤养分含量高^[22],继而造成了土壤微生物量在不同侵蚀环境下表现不同。土壤微生物量碳、氮、磷含量在不同侵蚀环境下均表现为0—10 cm土层高于10—20 cm土层,这一方面是由于植物枯落物分布在土壤表层,表层养分含量较高;另一方面该区植被主要以草本和灌木为主,根系及根系分泌物、有机残体等主要集中在土壤表层,因此使得土壤表层的微生物量高于下层。

3.2 不同侵蚀环境对土壤酶活性的影响

土壤酶参与生物体内一切化学反应,酶能够反映土壤肥力的高低,其活性受多种因素的影响^[23-24],其中土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶活性是参与土壤中碳、氮、磷转化和循环的重要水解酶类,对提高土壤氮素利用率,增加土壤中易溶性的营养物质,加速有机磷的脱磷速率,提高磷素的有效性都有着重要的作用。在本研究中,从前面的分析可以看出,不同侵蚀环境在不同的土层中土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶活性均随着土层的加深而降低。许多研究者也表明,土壤酶活性会随着土层深度的增加而降低^[25],这与本研究的结果相符。这是因为土壤表层聚集了更多释放酶的植物、动物、微生物等分泌物及其有机残体,土壤动物、植物、微生物的种类和数量增多,生理活性增强导致释放出更多的酶^[26],导致土壤表层酶活性高于下层。在不同的侵蚀环境下土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶均表现出一致的规律性,即阴梁崩坡最大,阳梁崩坡较小。高雪松等的研究发现^[27],3个坡面地形位置,下坡位土壤的物理性状良好,土壤养分易积累,导致土壤养分含量较高。而本研究中,土壤酶活性在阴坡和阳坡的分布不太一样,说明不同坡位的土壤酶活性分布不仅与坡向有关,而且与环境因素、植被类型、土壤质量等综合因素紧密相关。碱性磷酸酶在5种侵蚀环境下差异不显著,碱性磷酸酶与土壤中磷的转化密切相关,而本研究中土壤磷的含量差异不显著,说明碱性磷酸酶活性对地形环境变化的响应

程度较低。而脲酶在阴沟坡表现出与其它几种侵蚀环境有差异性,蔗糖酶在阴梁崩坡表现出与其它 4 种侵蚀环境有显著差异性,土壤蔗糖酶和脲酶是与土壤中碳、氮转化相关的酶,且本研究中土壤碳、氮含量在阴坡和阳坡有差异,说明土壤脲酶和蔗糖酶对地形环境变化的响应较为敏感。邱莉萍等研究表明^[28],草地不同坡向上土壤酶活性表现为阴坡大于阳坡,这与本研究的结论相符。一般来讲,阴坡酶活性较好的原因可能是与阴坡上水分条件较好,植物生长旺盛,凋落物增加促进微生物群落不断繁衍,从而酶活性提高。

土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶活性均与土壤微生物量碳、氮、磷呈极显著的正相关,Eivazi 等发现脲酶活性与微生物量显著相关^[29],这与本研究的结果相一致,说明土壤微生物量和土壤酶活性都可作为微生物学指标反映土壤环境的变化。土壤酶活性作为微生物的功能多样,与土壤微生物量相互联系,相互影响,使土壤微生物生成的酶催化土壤中生物化学过程,成为土壤微生物功能多样性的前提和基础^[4]。Frankenberger 等研究了 10 种土壤中的 11 种酶,发现碱性磷酸酶与微生物呼吸、生物量之间显著相关并且存在密切联系^[30],这与本研究相一致。也有研究表明^[31],脲酶、磷酸酶与微生物量有着显著地正相关性,而蔗糖酶活性与土壤微生物有直接的依赖性^[1]。土壤酶活性之间表现出极显著的正相关,说明土壤中多糖的转化循环、有机磷的脱磷与转化、不同氮素的转化利用之间关系密切并且相互影响^[32]。

4 结论

通过对黄土丘陵区陈家瓜小流域 5 种不同侵蚀环境下土壤微生物量和土壤酶活性的研究分析和测定,揭示了不同侵蚀环境对土壤微生物量及其酶活性的影响,现得出以下结论:

(1) 土壤微生物量碳和磷含量表现为阴沟坡最大,阳梁崩坡较小,整体表现为阴坡含量高于阳坡,且阴沟坡和崩顶差异显著。土壤微生物量氮含量在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层表现为阳沟坡最大。总体上来看,沟坡的土壤微生物量较大,说明下坡位的土壤养分积累、矿化能力较强。

(2) 土壤脲酶活性在不同侵蚀环境下表现为阴梁崩坡最大,且阴沟坡和阳梁崩坡与其它侵蚀环境有显著差异性。土壤蔗糖酶和碱性磷酸酶 0—10 cm 土层和 10—20 cm 土层均表现为阴梁崩坡最大,阳梁崩坡最小。土壤碱性磷酸酶在不同侵蚀环境下差异不显著,而土壤蔗糖酶活性表现为阴梁崩坡与其它 4 种侵蚀环境差异显著。说明蔗糖酶和脲酶对环境变化的响应更为敏感。

(3) 相关性分析表明,土壤微生物量碳、氮、磷与土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶活性之间及两两之间均有极显著的正相关,说明酶活性与微生物量的关系非常密切。

参考文献(References):

- [1] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [2] 严昶升, 周礼恺, 张德生. 土壤肥力研究法. 北京: 农业出版社, 1988.
- [3] 周礼恺, 张志明, 陈恩凤. 黑土的酶活性. 土壤学报, 1981, 18(2): 158-165.
- [4] 万忠梅, 吴景贵. 土壤酶活性影响因子研究进展. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2005, 33(6): 87-92.
- [5] 赵先丽, 程海涛, 吕国红, 贾庆宇. 土壤微生物生物量研究进展. 气象与环境学报, 2006, 22(4): 68-72.
- [6] Harris J A. Measurements of the soil microbial community forest estimating the success of restoration. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54(4): 801-808.
- [7] Rogers B F, Tate RL III. Temporal analysis of the soil microbial community along a toposequence in Pineland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(10): 1389-1401.
- [8] 张春梅, 焦峰, 温仲明, 林坤, 王信增. 延河流域自然与人工植被地上生物量差异及其土壤水分效应的比较. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(4): 132-138, 146-146.
- [9] 汪文霞, 周建斌, 严德翼, 马勤安. 黄土区不同类型土壤微生物量碳、氮和可溶性有机碳、氮的含量及其关系. 水土保持学报, 2006, 20(6): 103-106, 132-132.
- [10] 胡婵娟, 傅伯杰, 靳甜甜, 刘国华. 黄土丘陵区沟壑区植被恢复对土壤微生物生物量碳和氮的影响. 应用生态学报, 2009, 20(1): 45-50.
- [11] 何振立. 土壤微生物量的测定方法: 现状和展望. 土壤学进展, 1994, 22(4): 36-44.
- [12] 杨绒, 赵满兴, 周建斌. 过硫酸钾氧化法测定溶液中全氮含量的影响条件研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2005, 33(12): 107-111.

- [13] Mabuhay J A, Isagi Y, Nakagoshi N. Wildfire effects on microbial biomass and diversity in pine forests at three topographic positions. *Ecological Research*, 2006, 21(1): 54-63.
- [14] 张地, 张育新, 曲来叶, 马克明, 戴斯迪. 坡位对东灵山辽东栎林土壤微生物量的影响. *生态学报*, 2012, 32(20): 6412-6421.
- [15] 张宏, 黄懿梅, 安韶山, 邢肖毅. 黄土高原森林带植被群落下土壤活性有机碳研究. *水土保持研究*, 2013, 20(3): 65-70.
- [16] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区侵蚀环境不同坡面及坡位土壤理化特征研究. *水土保持学报*, 2008, 22(1): 7-12.
- [17] 严岳鸿, 何祖霞, 苑虎, 邢福武. 坡向差异对广东古兜山自然保护区蕨类植物多样性的生态影响. *生物多样性*, 2011, 19(1): 41-47.
- [18] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征. *生态学报*, 2007, 27(2): 603-612.
- [19] Xing X Y, Huang Y M, An S S, Zhang H. Soil nitrogen concentrations and transformations under different vegetation types in forested zones of the Loess Gully Region. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(22): 7181-7189.
- [20] Rutigliano F A, Castaldi S, D'Ascoli R, Papa S, Carfora A, Marzaioli R, Fioretto A. Soil activities related to nitrogen cycle under three plant cover types in Mediterranean environment. *Applied Soil Ecology*, 2009, 43(1): 40-46.
- [21] 周建斌, 陈竹君, 李生秀. 土壤微生物量氮含量、矿化特性及其供氮作用. *生态学报*, 2001, 21(10): 1718-1725.
- [22] 成毅, 安韶山, 马云飞. 宁南山区不同坡位土壤微生物生物量和酶活性的分布特征. *水土保持研究*, 2010, 17(5): 148-153.
- [23] Park S C, Smith T J, Bisesi M S. Activities of phosphomonoesterase from *Lumricus terrestris*. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992, 24(9): 873-876.
- [24] Aon M A, Colaneri A C. II. Temporal and spatial evolution of enzymatic activities and physico-chemical properties in an agricultural soil. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18(3): 255-270.
- [25] 黄懿梅, 安韶山, 曲东, 赵伟峰. 黄土丘陵区植被恢复过程中土壤酶活性的响应与演变. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 152-155.
- [26] 邹军, 喻理飞, 李媛媛. 退化喀斯特植被恢复过程中土壤酶活性特征研究. *生态环境学报*, 2010, 19(4): 894-898.
- [27] Gao X S, Deng L J, Zhang S R. Soil physical properties and nutrient properties under different utilization styles and slope position. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(2): 53-56. 高雪松, 邓良基, 张世熔. 不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析. *水土保持学报*, 2005, 19(2): 53-56.
- [28] 邱莉萍, 张兴昌, 程积民. 坡向坡位和撂荒地对云雾山草地土壤酶活性的影响. *草业学报*, 2007, 16(1): 87-93.
- [29] Eivazi F, Bayan M R. Effects of long-term prescribed burning on the activity of selected soil enzymes in an oak-hickory forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, 26(10): 1799-1804.
- [30] Frankenberger W T, Dick W A. Relationships between enzyme activities and microbial growth and activity indices in soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, 47(5): 945-951.
- [31] 郭继勋, 姜世成, 林海俊, 金晓明. 不同草原植被碱化草甸土的酶活性. *应用生态学报*, 1997, 8(4): 412-416.
- [32] 安韶山, 黄懿梅, 刘梦云. 宁南山区土壤酶活性特征及其与肥力因子的关系. *中国生态农业学报*, 2007, 15(5): 55-58.