

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

成毅¹, 安韶山^{1,2,3}, 马云飞¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 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 陕西 杨陵 712100; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘要:对宁夏固原黄土丘陵区天然草地不同坡位上土壤微生物量和酶活性进行研究,旨在了解坡位对土壤微生物量及酶活的影响,通过分析土壤微生物量及酶活性间的相关关系,进一步了解其内在联系。结果表明,在 3 个坡面地形部位(上坡位,中坡位和下坡位)上,土壤微生物量碳随着坡位的降低而减小;土壤微生物量氮在坡顶和坡底较高,坡中较低;微生物量磷在坡中部和坡底较高,坡顶较低。土壤酶活性基本不随坡位的变化而变化。显著性分析发现,微生物量碳和酶活性没有差异显著性,微生物量氮坡顶和坡底差异显著($P < 0.05, n = 3$),微生物量磷坡顶较坡底和坡中差异显著($P < 0.05, n = 3$)。

关键词:坡位; 土壤养分; 土壤微生物量; 土壤酶活性

中图分类号: S151.9

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)05-0148-06

Soil Microbial Biomass and Enzymatic Activities in the Loess Hilly Area of Ningxia under Different Slope Positions

CHENG Yi¹, AN Shaoshan^{1,2,3}, MA Yunfei¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Soil microbial biomass and enzymatic activities were studied in soils of Guyuan Loess hills of Ningxia Province under natural grassland to understand the slope position by analyzing the soil microbial biomass and enzymatic activities between relationship, further understands its inner link. The results indicated that in the three positions of the topography (up slope position, the middle slope position and down slope position), soil microbial biomass carbon (C_{mic}) reduced with the slope position down; soil microbial nitrogen (N_{mic}) were higher in the up slope position and down slope position and lower in the middle slope position; soil microbial phosphorus (P_{mic}) were higher in the middle slope position and down slope position and lower in the up slope position. Soil enzymatic activities do not change with the position. Significant analysis shows that C_{mic} and enzymatic activities was not significantly different, N_{mic} is significantly different under the up slope position and down slope position ($P < 0.05, n = 3$), and P_{mic} is significantly different under the middle slope position and down slope position ($P < 0.05, n = 3$).

Key words: slope position; soil nutrient; soil microbial biomass; soil enzymatic activities

在山地坡面上,地形部位与土地利用方式是决定土壤理化及生物性质变化的重要因素,沿坡面不同的

土壤成土过程导致了其特征的不同^[1],且不同坡位土壤理化及微生物分布的差异主要是由坡面土壤性质

收稿日期: 2010-07-01

资助项目: 国家自然科学基金项目(40971171, 40701095);“十一·五”国家科技支撑计划重大项目(2006BCA01A07);西北农林科技大学“青年学术骨干支持计划”

作者简介: 成毅(1984-),男,硕士生,研究方向为土壤微生物生态。E-mail: missy0985628@163.com

通信作者: 安韶山(1972-),男,博士,副研究员,主要研究方向为土壤生态学、流域生态与管理。E-mail: shan@ms.iswc.ac.cn

和坡面养分在降雨侵蚀过程中的再分配所造成的。研究不同坡位土壤特征, 探讨不同坡位土壤质量退化原因, 对其进行植被恢复和重建, 将有助于控制土壤退化, 提高土地生产力, 减缓水土流失, 加速退化生态系统的恢复与重建, 改善生态环境。目前关于坡位土壤方面的研究主要集中在坡地植被恢复、退耕地土壤性质变化、养分流失规律和形态、土壤水文效应、养分循环特征以及生物多样性对土壤性质的影响^[2-6]等。但有关黄土丘陵区植被恢复过程中不同坡位土壤微生物量和土壤酶活性方面的研究相对较少。本研究主要从坡顶部、坡中部和坡底部三个方面分析了不同坡位土壤微生物量和土壤酶活性的变化特征, 旨在了解坡位对土壤微生物量及酶活的影响, 通过分析土壤微生物量及酶活性间的相关关系, 进一步了解其内在联系, 为该区及与该区类型相似地区的土地的有效利用和管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及样地设置

研究区位于黄土丘陵区宁夏固原市东部的河川乡, 属泾河水系支流小川河的中游, 地处 $106^{\circ}26' - 106^{\circ}30' E$, $35^{\circ}59' - 36^{\circ}3' N$, 海拔 1 534~ 1 822 m, 年均降水量 420 mm, 年均气温 $7^{\circ}C$, 干燥度 1.55~ 2.0, 属半干旱中温带向暖温带过渡季风气候区。研究区由小川河分为两部分, 东部为梁状丘陵, 地形起伏较大, 西部自东向西依次为台、坪、梁地形。试区沟坡地占 90%, 平缓台地仅占 8%, 且 51% 的土地坡度为 $15^{\circ} - 20^{\circ}$, 总土地面积 $716 km^2$ 。土壤类型主要是黄土母质上发育的淡黑垆土和黄绵土。

表 1 试验样地概况

地形	海拔/m	经纬度	坡向/	坡度/ $(^{\circ})$	植被类型
坡顶部	1769	$106^{\circ}29.032' E, 36^{\circ}01.884' N$	北偏东 20°	5	天然草地 (Gra.)
坡中部	1751	$106^{\circ}28.922' E, 36^{\circ}01.852' N$	北偏东 40°	11	天然草地 (Gra.)
坡下部	1734	$106^{\circ}28.866' E, 36^{\circ}01.951' N$	北偏东 35°	14	天然草地 (Gra.)

2 结果与分析

2.1 不同坡位对土壤养分的影响

土地利用方式的变化影响着许多自然现象与生态过程和环境因子, 如土壤、水分、植被之间的相互作用及改变对陆地生态系统结构与功能产生重要影响。许多研究表明, 不同的坡面位置其土壤的化学物理性质变异明显, 包括对干扰扩散的影响, 对水土流失和养分流失的影响。土壤养分是土壤肥力的重要标志, 能供应和协调植物生长的营养条件与环境条件, 对土地的可持续利用具有重要作用。在不同地形位置上,

1.2 土壤样品采集与分析

根据黄土高原的植被分布情况, 选定最具代表性的天然草地作为采样地, 在同一坡面上按照坡顶、坡中和坡底部分别按 S 型路线多点采样, 各采样地均按 0- 5 cm, 5- 20 cm, 20- 40 cm 分别多点采集混合样品。样品经风干去除根系、石块, 研磨过筛分装备用, 各分析项目重复 3 次, 采样时间为 2007 年 7 月, 采样地概况见表 1。

土壤微生物生物量碳、氮含量采用氯仿熏蒸浸提法^[7-8]测定。微生物量碳和氮在水土比 1: 4 的 K_2SO_4 浸提液中提取 30 min, 提取液中土壤可溶性有机碳用总有机碳分析仪 (Phoenix 8000) 测定, 可溶性全氮 (TSN) 采用碱性过硫酸钾氧化法^[9]测定, 土壤可溶性有机氮 (SON) = TSN - 无机氮。土壤微生物生物量磷的测定参照 Brookes^[10] 等方法, 用 0.5 mol/L $NaHCO_3$ (pH 8.5) 作浸提剂, 在 1: 20 的土水比中提取 30 min, 提取液中 P 的测定用钼锑抗显色法测定。土壤微生物生物量碳 $C_{mic} = EC/0.45$, 土壤微生物生物量氮 $N_{mic} = EN/0.45$, 土壤微生物生物量磷 $P_{mic} = EP/0.4$, 其中 0.45 为土壤微生物生物量碳和氮的系数, EC 和 EN 分别为熏蒸和未熏蒸土壤 K_2SO_4 浸提液有机碳和全氮含量的差值, EP 为熏蒸和未熏蒸 $NaHCO_3$ 浸提液微生物量磷的差值, 0.4 为土壤微生物生物量磷的系数。其他化学性质均参照文献[11]进行分析。土壤脲酶活性用靛酚比色法测定, 土壤碱性磷酸酶活性用磷酸苯二钠比色法测定, 转化酶用 $Na_2S_2O_3$ 滴定法, 过氧化氢酶活性的测定采用高锰酸钾滴定法。所得数据用 DPS 和 Excel 进行处理。

养分条件与水热条件的差异是造成这种小尺度微地形上景观差异的主要原因^[12-13]。Pierson 和 Mulla 发现与顶坡相比较, 底坡与上坡的土壤有较高的有机质含量^[14], 这和表 2 显示结果相似。通过表 2 还可以看出, 在 0- 5 cm 土层中, 全氮和速效钾从坡顶到坡底逐渐减小, 有机质和速效磷则在坡底含量稍大, 其次为坡顶, 最后为坡中部, 碱解氮在坡顶最高, 次之为坡底, 坡中部最低, 但从量的角度来说, 变化都不大, 相差甚微。5- 20 cm 土层中, 碱解氮、全氮和速效钾都呈现从坡顶到坡底递减的趋势, 有机质和速效磷在坡顶和坡底相差无几, 坡中部稍低。20- 40 cm 土层

中,有机质、碱解氮、速效磷和速效钾也相差较小,其中碱解氮和有机质在坡顶稍有增加,但都未达到显著水平($P < 0.05, n = 3$),只有全氮从坡顶到坡底的递减排比较明显,均达到了显著水平($P < 0.05, n = 3$)。总体上,除全氮在不同坡位的不同土层中差异显著之

外,有机质、速效磷和速效钾均未达到显著水平($P < 0.05, n = 3$),碱解氮只在 0-5 cm 的土层中差异显著($P < 0.05, n = 3$),可见,坡位对有机质、碱解氮、速效磷和速效钾的影响甚小,对全氮的影响较大,都呈现从坡顶到坡底递减的趋势。

表 2 不同植被恢复措施下不同土层土壤养分状况

土层/cm	坡位	有机质/ ($g \cdot kg^{-1}$)	碱解氮/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	全氮/ ($g \cdot kg^{-1}$)	速效钾/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	速效磷/ ($g \cdot kg^{-1}$)
0-5	坡上	28.95±4.06a	112.21±14.57a	1.89±0.27a	126.52±26.11a	11.03±0.59a
	坡中	27.28±7.61a	100.60±34.21b	1.51±0.12a	125.75±18.75a	10.35±1.55a
	坡下	29.42±6.41a	105.13±26.22b	0.58±0.03b	122.11±16.32a	11.19±3.24a
5-20	坡上	20.37±3.86a	80.74±19.70a	1.43±0.22a	81.37±29.04a	9.50±1.50a
	坡中	19.31±4.99a	77.15±17.96a	1.20±0.09a	73.98±20.81a	8.33±1.74a
	坡下	20.50±3.31a	76.90±14.98a	0.46±0.07b	66.64±15.97a	9.32±1.37a
20-40	坡上	12.52±3.22a	48.50±15.23a	0.94±0.21a	44.90±13.76a	7.78±1.28a
	坡中	12.39±6.20a	44.23±16.21a	0.56±0.25ab	44.58±10.00a	7.58±0.31a
	坡下	12.62±3.66a	52.24±33.11a	0.36±0.05b	40.63±7.57a	7.67±1.28a

2.2 不同坡位土壤微生物量的差异

2.2.1 不同坡位下土壤微生物生物量碳的差异 从图 1 可以看出,微生物量碳在 0-5 cm 和 5-20 cm 土层中,从坡顶到坡底逐渐递减,但变化量都很小,差异不显著,这种差异可能是由光照时间引起的。在 20-40 cm 土层中,坡顶和坡底较坡中都偏小,但也未达到显著水平。可见,微生物量碳在坡位上的变化不大。在同一坡位的三个不同土层中,差异则较为明显,表层(0-5 cm)一般较中层(5-20 cm)土壤大 1 倍多,较深层(20-40 cm)土壤大 3~4 倍。

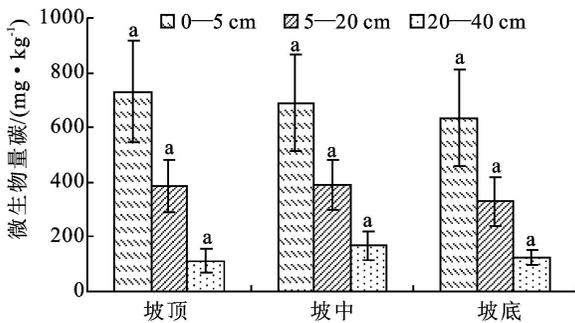


图 1 不同坡位条件下的土壤微生物生物量碳

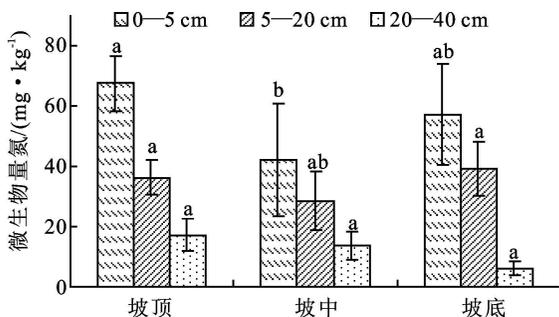


图 2 不同坡位条件下的土壤微生物生物量氮

2.2.2 不同坡位下土壤微生物生物量氮的差异

生物量氮较微生物量碳在不同的坡位上差异比较明显,通过图 2 可以看出,在表层(0-5 cm)土壤中,微生物量氮含量坡顶>坡底>坡中,而且坡顶和坡底差异显著($P < 0.05, n = 3$),中层(5-20 cm)土壤中,微生物量氮含量坡底>坡顶>坡中,坡顶和坡底较坡中部土壤微生物量氮差异显著($P < 0.05, n = 3$)。深层(20-40 cm)土壤则表现为从坡顶到坡底递减的趋势,但差异不显著。从整体上看,微生物量氮呈现两边(坡顶和坡底)大中间(坡中)小的趋势,这可能与氮素的转化循环及水土流失有关。

2.2.3 不同坡位下土壤微生物生物量磷的差异 从图 3 可见,在表层(0-5 cm)土壤中,微生物量磷在坡中部含量最大,次之为坡底,坡顶则最低,且坡顶较坡底和坡中差异显著($P < 0.05, n = 3$)。中层(5-20 cm)和深层(20-40 cm)土壤中,坡中和坡底微生物量氮含量相当,坡顶最小,和 0-5 cm 土层一样,坡顶较坡底和坡中差异显著($P < 0.05, n = 3$)。可见,微生物量磷和微生物量碳、氮不一样,会随着坡位的降低稍有增加,在坡中部最高,表层(0-5 cm)土壤表现尤为明显。

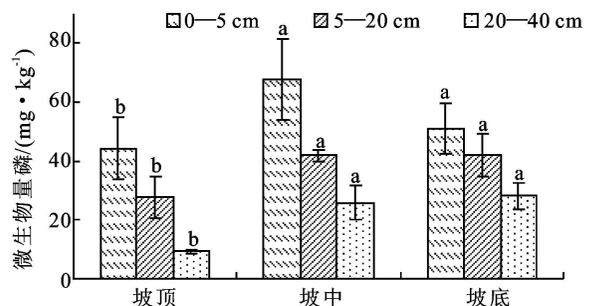


图 3 不同坡位条件下的土壤微生物生物量磷

2.3 不同坡位土壤酶活性的差异

2.3.1 不同坡位土壤中转化酶的差异 图 4 的结果显示, 坡位对土壤转化酶的影响不大, 基本上呈现从坡顶到坡底递减的趋势, 但这种差异很小。在同一坡位的不同土层中转化酶的变化比较明显, 其中, 深层(20-40 cm)土壤的转化酶含量最小, 且和表层(0-5 cm)与中层(5-20 cm)土壤的转化酶含量相比, 相差较大, 分别不及一半多。可见, 土壤转化酶主要集中在浅层土壤中。

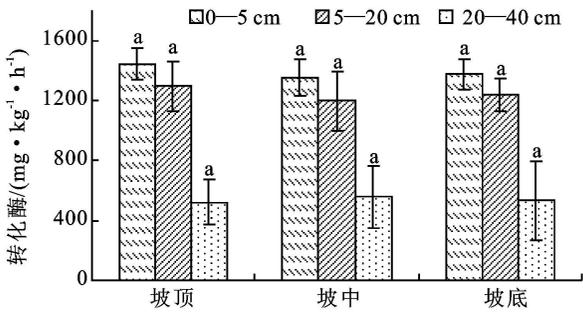


图 4 不同坡位条件下的土壤转化酶

2.3.2 不同坡位土壤中碱性磷酸酶的差异 从图 5 可以看出, 坡位对土壤碱性磷酸酶的影响也很小, 表层(0-5 cm)土壤中, 坡底只略高于坡顶和坡中, 但差异不显著, 中层(5-20 cm)与深层(20-40 cm)土壤几乎没有差别。可见, 坡位对碱性磷酸酶基本上没有影响。

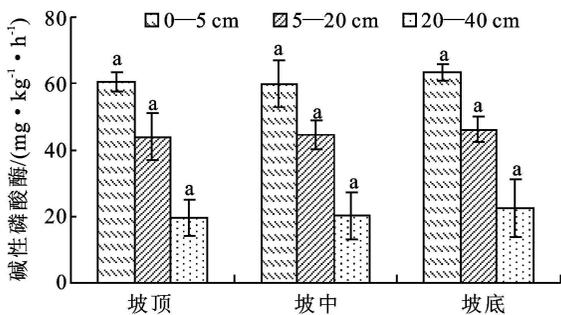


图 5 不同坡位条件下的土壤碱性磷酸酶

2.3.3 不同坡位土壤中过氧化氢酶的差异 图 6 结果显示, 过氧化氢酶在坡位的变化中, 坡中部略高于坡顶和坡底, 这点在表层(0-5 cm)和 中层(5-20 cm)土壤中较为明显, 但差异都不显著。深层(20-40 cm)土壤中的过氧化氢酶在坡中部也高于坡顶和坡底, 但与表层和 中层土壤想比较差量较小。在同一坡位的不同土层土壤中, 从表层(0-5 cm)土壤到深层(20-40 cm)逐渐递减, 且不同坡位的递减量相当。

2.3.4 不同坡位土壤中脲酶的差异 通过图 7 可以发现不同坡位土壤中脲酶的含量变化和转化酶相似, 也呈现从坡顶到坡底递减的趋势, 但差量都很小, 差异都不显著, 在同一坡位的不同土层中, 变化也较为

稳定, 从表层(0-5 cm)土壤到深层(20-40 cm)逐渐递减, 这种递减程度较坡位的变化更为明显。

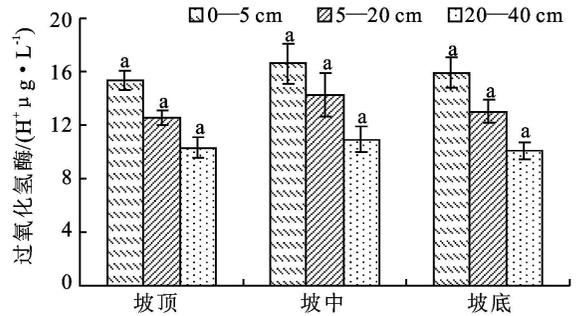


图 6 不同坡位条件下的土壤过氧化氢酶

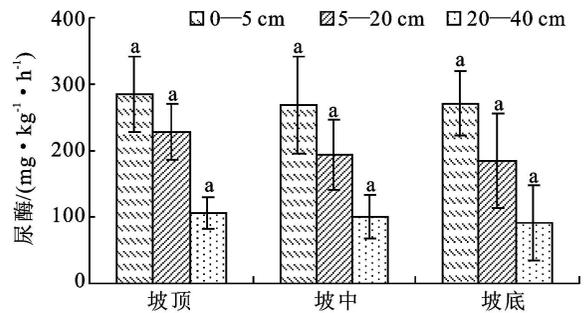


图 7 不同坡位条件下的土壤脲酶

2.4 不同坡位土壤中土壤化学性质、土壤微生物量和土壤酶活性的相关性比较

由表 3 可知, 土壤有机质除与全氮没有相关性之外, 与所有的生物量及酶活性都呈极显著相关; 碱解氮与全氮呈显著相关, 与其他的生物量及酶活性都呈极显著相关; 全氮与速效钾、微生物量碳、转化酶和脲酶呈显著相关, 与其他指标没有相关性; 速效钾、微生物量碳、转化酶和脲酶与全氮呈显著相关, 与其他所有指标都呈现极显著相关; 速效磷、微生物量氮、微生物量磷、碱性磷酸酶和过氧化氢酶除与全氮没有相关性之外, 与其他所有指标都呈极显著相关。以上分析表明, 在坡位的变化过程中, 土壤化学性质、土壤微生物生物量和土壤酶活性在土壤中的改善程度比较一致, 土壤微生物代谢活动对土壤化学性质和土壤酶活性有显著影响, 且土壤微生物对土壤肥力的演变反应也较敏感。以上结果说明微生物量碳、氮、磷及酶活性在作为评价土壤质量的生物学指标时具有可行性和协同性。

3 讨论

微生物本身是有机物分解、养分转化的中介者, 它们的数量及其活性直接影响着进入土壤中有机物和污染物的分解转化速度, 因而影响植被的生长和 环境质量。土壤微生物量反映微生物群落的状态和功 能, 可作为反映人类活动影响的生态学指标。已发现

表 3 土壤微生物生物量与土壤化学性质及酶活性的相关性分析

指标	有机质	碱解氮	全氮	速效钾	速效磷	微生物碳	微生物氮	微生物磷	转化酶	磷酸酶	过氧化氢酶	脲酶
有机质	1.000	0.991 [*]	0.533	0.981 ^{**}	0.980 ^{**}	0.980 ^{**}	0.953 ^{**}	0.836 ^{**}	0.920 ^{**}	0.986 ^{**}	0.950 ^{**}	0.976 ^{**}
碱解氮		1.000	0.599	0.972 ^{**}	0.966 ^{**}	0.978 ^{**}	0.956 ^{**}	0.806 ^{**}	0.937 ^{**}	0.984 ^{**}	0.934 ^{**}	0.982 ^{**}
全氮			1.000	0.624 [*]	0.493	0.642 [*]	0.549	0.140	0.574 [*]	0.516	0.536	0.653 [*]
速效钾				1.000	0.955 ^{**}	0.992 ^{**}	0.914 ^{**}	0.785 ^{**}	0.872 ^{**}	0.953 ^{**}	0.950 ^{**}	0.968 ^{**}
速效磷					1.000	0.940 ^{**}	0.965 ^{**}	0.783 ^{**}	0.884 ^{**}	0.949 ^{**}	0.874 ^{**}	0.954 ^{**}
微生物碳						1.000	0.919 ^{**}	0.796 ^{**}	0.895 ^{**}	0.962 ^{**}	0.962 ^{**}	0.970 ^{**}
微生物氮							1.000	0.689 ^{**}	0.888 ^{**}	0.925 ^{**}	0.840 ^{**}	0.933 ^{**}
微生物磷								1.000	0.783 ^{**}	0.870 ^{**}	0.859 ^{**}	0.767 ^{**}
转化酶									1.000	0.962 ^{**}	0.893 ^{**}	0.960 ^{**}
磷酸酶										1.000	0.961 ^{**}	0.976 ^{**}
过氧化氢酶											1.000	0.933 ^{**}
脲酶												1.000

* 表示差异达显著水平 ($P < 0.05$), ** 表示差异达极显著水平 ($P < 0.01$)。

微生物量与土壤有机碳之间有着很密切的相关性,但其内在机理仍不完全清楚。这一现象的基础可能为:在稳定的条件下,土壤微生物除受长期向土壤投入的有机碳影响外,还受到气候条件、土壤质地、轮作措施以及污染物如重金属元素等影响。由于坡位的不同,其植被也会呈现规律性的递变,从而会影响到不同坡位土壤有机物质的摄入量,进而影响到土壤微生物量的变化。在本研究中,微生物量碳在 0-5 cm 和 5-20 cm 土层中,从坡顶到坡底逐渐递减,但变化量都很小,差异不显著,这种差异可能是由光照时间引起的。由于坡顶较坡底要有较长的光照时间,更有利于植物进行光合作用合成有机物,从而增加了土壤有机物质的输入。同样,坡位对微生物量氮的影响也会随坡位的变化呈现一定的规律。自然界氮素形态间的转化包括生物成因和非生物成因,但在陆地生态系统氮循环中微生物主导了氮的矿化和固定^[15]。一方面,微生物矿化有机质释放出矿质营养以满足作物和土壤中微生物的需求;另一方面,微生物对无机氮肥的生物固定减少了氮肥的损失。有研究表明,土壤微生物不仅是土壤氮素的微生物矿化和固持的执行人,而且是提供植物营养元素的活性库^[16-17],直接调节土壤氮素的供给。因此土壤微生物生物量氮的活性及其消长被认为是土壤氮素内循环的本质内容^[18]。在该研究区域中,微生物量氮的变化和微生物量碳有所差异,在表层(0-5 cm)土壤中,微生物量氮含量坡顶>坡底>坡中,中层(5-20 cm)土壤中,微生物量氮含量坡底>坡顶>坡中,深层(20-40 cm)土壤则表现为从坡顶到坡底递减的趋势。这可能与氮素的转化循环及水土流失有关。土壤磷大部分以无机形态存在,有机磷一般占全磷的 20%~50%,只有很小一部分易于矿化。土壤微生物量磷则是有机磷中最活跃的部分,据 He^[19]等估算作物每年从土壤带走的磷一

般为 5~20 kg/hm²,仅是土壤微生物量磷的 10%~50%。影响土壤微生物磷含量的因素较多,一些研究结果表明,土壤微生物量磷的含量及周转速率受气候、耕作等多种因素的影响^[20-21]。本研究中,微生物量磷在坡中部含量最大,次之为坡底,坡顶则最低,且坡顶较坡底和坡中差异显著,这可能与水土流失有关,经过大雨的冲刷,磷和碳氮相比,可能更容易随水土沿着坡面向下迁移。

土壤酶催化土壤中的一切生物化学反应,酶活性高低是土壤肥力的重要标志^[22]。同时其活性受多种因素的影响^[23-25]。脲酶能促进有机分子中肽键的水解,促其水解成氨和 CO₂,过氧化氢酶的活性表征土壤腐殖质化强度大小和有机质积累程度,转化酶可增加土壤中易溶性营养物质,对土壤中的碳循环有重要作用,它与土壤有机质、氮、磷含量、微生物数量及土壤呼吸强度有关,碱性磷酸酶广泛存在于微生物和动物界,它催化磷酸单脂的水解及磷酸基团的转移反应。在本研究中,通过前面的分析可以看出,不同坡位之间的土壤酶活性差异基本都不大,不同土层之间土壤酶活性随土层深度的加深而降低,可见土壤酶活性在坡地土壤的分布并没有在坡面流失和坡底富集的趋势,这可能与土壤酶的来源、生物学特征和微地形的变化有关。

4 结论

(1) 土壤养分在不同坡位之间除了全氮随着坡位的降低而降低之外,有机质、碱解氮、速效钾和速效磷差异很小。

(2) 在不同坡位之间土壤微生物量碳随着坡位的降低而减小;土壤微生物量氮在坡顶和坡底较高,坡底较低;微生物量磷在坡中部和坡底较高,坡顶较低。

(3) 不同坡位上的土壤转化酶、磷酸酶、过氧化氢

酶和脲酶相差甚小, 可见土壤酶活性基本不随坡位的变化而变化。

参考文献:

- [1] Brubaker S C, Jones A J, Lewis D T, et al. Soil properties associated with landscape position[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 235-239.
- [2] 万雪琴, 胡庭兴, 张健, 等. 退耕地退耕还林后的植被恢复[J]. *林业科学*, 2005, 41(2): 191-194.
- [3] 彭文英, 张科利, 陈瑶, 等. 黄土退耕地退耕还林后土壤性质变化研究[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(2): 272-278.
- [4] Flanagan D C, Foster G R. Storm pattern effect on nitrogen and phosphorus losses in surface runoff [J]. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32: 535-544.
- [5] Sharpley A N, Smith S J, Jones O R, et al. The transport of bioavailable phosphorus in agricultural runoff[J]. *Journal Environment Quality*, 1992, 21: 30-35.
- [6] 王国梁, 刘国彬, 常欣, 等. 黄土丘陵区小流域植被建设的土壤水文效应[J]. *自然资源学报*, 2002, 17(3): 339-345.
- [7] Brookes P C, Landman A, Pruden G, et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen, a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil[J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1985, 17: 837-842.
- [8] Jenkinson D S, Powlson D S. The effect of biocidal treatments on metabolism in soil, a method for measuring soil biomass [J]. *Soil Biol Biochem.*, 1976, 8: 189-202.
- [9] 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研究[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2005, 33(12): 107-111.
- [10] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Phosphorus in the soil microbial biomass[J]. *Soil Biol Biochem.*, 1984, 16(2): 169-175.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [12] 张胜利. 开矿对小流域水沙的影响研究[J]. *水土保持学报*, 1992, 6(2): 76-79.
- [13] 陈浩. 流域系统水沙过程变异规律研究进展[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(5): 102-107.
- [14] Pierson F B, Mulla D J. Aggregate stability in the Palouse region of Washington: effect of landscape position [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54: 1407-1412.
- [15] Buther S S, Challson R J, Orians G H, et al. *Global Biochemical Cycles* [M]. San Diego: Academic Press, 1992: 263-284.
- [16] Singh J S, Raghubanshi A S, Singh R S, et al. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna [J]. *Nature*, 1989, 33: 499-500.
- [17] Srinstava S C, Singh J S, Microbial C. N and P in dry tropical forest soils: Effects of alternate land uses and nutrient flux [J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1991, 23: 117-124.
- [18] Mary B, Recous S, Robin D. A methods for calculating nitrogen fluxes in soil using ^{15}N tracing [J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1998, 30: 1963-1979.
- [19] He Z L, Wu J, O' Donnell A G, et al. Measurement of microbial biomass phosphorus in low pH [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 24: 358-363.
- [20] Collins H P, Rasmussen P E. Crop rotation and residue management effects on soil carbon and microbial dynamics [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 783-788.
- [21] Garcia F O, Rice C W. Microbial biomass dynamics in tallgrass prairie [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58: 816-824.
- [22] 薛立, 赖日石, 陈红跃. 不同坡位造林地酶活性与土壤养分的关系[J]. *土壤通报*, 2002, 33(4): 278-280.
- [23] Park S C, Smith T J, Bisesi M S. Activities of phosphorrrrmonoesterase from *Lumricus terrestris* [J]. *Soil Biol. & Biochem.*, 1992, 24: 873-876.
- [24] Nannipieri P, Kandeler E, Ruggiero P. Enzyme activities and microbiological and biochemical processes in soil [M]// Burns R G, Dick R P. *Enzymes in the Environment. Activity, Ecology and Applications*. New York: Marcel Dekker, 2002: F 33.
- [25] Aon M A, Colaneri A C. Temporal and spatial evolution of enzymatic activities and physicochemical properties in an agricultural soil II [J]. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18: 255-270.