典型黑土区坡耕地土壤微生物群落数量的空间分布研究

易 祎[1]，郑粉莉[1,2]，王 彬[1]，冯志珍[1]，姜义亮[1]

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院，陕西 杨凌 712100；2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室，陕西 杨凌 712100)

摘 要：选取土壤侵蚀较严重的黑龙江省宾县宾州河流域为研究区，通过采集流域上、中和下游 6 个典型坡面的坡上、坡中和坡下部土壤样品，分析了坡耕地土壤微生物群落数量在流域和坡面尺度上的分布规律，并比较了土壤微生物群落数量空间分布与土壤侵蚀空间分布的关系。结果表明，在流域尺度上，土壤微生物总数量和细菌数量均表现为：下游＞中游＞上游；土壤真菌数量表现为：上游＞下游＞中游；土壤放线菌数量表现为中游最大，而上游和下游数量相当。在坡面尺度上，土壤微生物总数量和细菌数量均呈现：坡中部＜坡上部＜坡下部，土壤真菌数量呈现：坡下部＜坡中部＜坡上部，土壤放线菌数量呈现：坡中部＜坡下部＜坡上部。研究表明，流域土壤微生物总数量和土壤细菌数量的空间分布皆与侵蚀—沉积速率的空间分布相对应，反映出侵蚀—沉积速率是影响该流域土壤微生物群落数量的主要因素。

关键词：典型黑土区；坡耕地；土壤微生物群落数量；土壤侵蚀；空间分布

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2013)06-0042-04 **中图分类号**：S154.1，S154.3

Spatial Distribution of Soil Microbial Community on Sloping Farmlands in Typical Black Soil Region

YI Yi[1], ZHENG Fen-li[1,2], WANG Bin[1], FENG Zhi-zhen[1], JIANG Yi-liang[1]

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

Abstract: Soil samples from different slope positions of the upper, middle and down stream of Binzhou river basin were collected to analyze the spatial distribution of soil microbial communities, as well as to compare the relationship of spatial distribution between soil microbial communities and soil erosion. The results showed that the number of soil microbial communities and bacteria ranked as downstream＞mid-stream＞upper-stream at the watershed scale, the number of fungi ranked as upper-stream＞downstream＞mid-stream at the watershed scale, and the number of actinomycetes was the highest value in the middle of stream. The number of soil microbial communities and bacteria in different slope positions followed the order: down-slope＞upper-slope＞mid-slope, the number of fungi in different slope positions followed the order: upper-slope＞mid-slope＞down-slope, and the number of actinomycetes in different slope positions followed the order: upper-slope＞down-slope＞mid-slope. The results also indicated the spatial distribution of soil bacteria and microbial community corresponds with the spatial distribution of the rate of soil erosion-deposition, which demonstrated that soil erosion—deposition rate was the key factor for governing the spatial distribution of soil microbial community and bacteria in Binzhou river basin.

Keywords: typical black soil region; cropland; soil microbial community populations; soil erosion; spatial distribution

东北黑土区严重的土壤侵蚀造成黑土层变薄、土壤生态系统功能降低，尤其是薄层黑土区有机质层的厚度仅剩 20 cm，甚至部分区域出现黑土层完全消失，露出下层黄土的“破皮黄”现象[1-2]，严重影响了区

收稿日期：2013-06-03 **修回日期**：2013-07-23
资助项目：国家基础科学(973)研究发展计划项目“不同类型区土壤侵蚀过程与机理”(2007CB407201)
作者简介：易祎(1986—)，男(汉族)，黑龙江省依兰县人，硕士研究生，研究方向为土壤侵蚀与土壤质量评价。E-mail：yixiaoyi1986@126.com。
通信作者：郑粉莉(1960—)，女(汉族)，陕西省蓝田县人，教授，博士生导师，主要从事土壤侵蚀过程、预报和土壤侵蚀环境效应评价研究。E-mail：flzh@ms.iswc.ac.cn。

域粮食生产和农业可持续发展。因此,迫切需要开展农耕地土壤侵蚀对土壤质量和生产力影响的研究。目前东北黑土区土壤性质的空间分布研究大多集中在土壤物理和化学性质方面[3-5],而关于土壤微生物群落数量空间分布特征研究的报道较少。土壤微生物对环境变化敏感,能较早地指示土壤生态系统功能和结构的变化,因此土壤微生物群落数量及其结构能够表征土壤质量的优劣[6]。再者,由于流域上、中和下游及其坡面不同部位侵蚀强度和立地条件的差异,使土壤微生物群落数量及其结构在不同坡位存在差异性[7]。因此,迫切需要开展土壤微生物在流域和坡面尺度的空间分布特征研究。为此,选取东北黑土侵蚀严重区的宾州河流域坡耕地为研究对象,分析土壤微生物群落数量在流域和坡面尺度的分布特征,以期为农田环境综合评价提供科学依据[8]。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

本研究选取黑龙江省宾县宾州河流域的坡耕地为研究对象,宾州河流域(127°26′04″—127°32′02″E,45°43′13″—45°51′37″N)属松嫩平原东部边缘,属于黑土区典型的侵蚀严重区。流域面积 329 km^2,地形多为漫岗丘陵,地势平缓,耕地坡度多变化于 1°～7°,坡长 500～1 000 m。气候属寒温带大陆季风气候,气温年较差大,年均气温 3.9 ℃,无霜期约 148 d。年均降雨量 548.5 mm,年际变化大且分布不均,多集中于 6—9 月份,占全年降水量的 78.7%。流域土壤以黑土为主,占流域面积的 2/3 以上,黑土层厚度多变化于 10～50 cm;农耕地以玉米种植为主,耕种方式多为顺坡垄作,耕层土壤容重约 1.1 g/cm^3,有机质含量为 1%～7%,流域侵蚀强度变化于 458.5～6 121.6 $t/(km^2 \cdot a)$[2]。

1.2　样地选取和样品采集

于 2011 年夏季,以宾州河流域 1∶1 万地形图及土壤类型图为工作底图,在野外调查的基础上,初步在流域上、中、下游选取 6 个典型坡面为采样坡面。为了充分反映出流域上、中和下游土壤微生物群落数量空间分布特征,以地形部位、黑土层厚度及侵蚀环境差异作为参考依据,最终在宾州河流域上、中和下游各选 2 个典型坡面作为土壤样品采集坡面(表 1),6 个坡面均位于阳坡。同时,为了研究土壤微生物群落数量在坡面不同部位的分布特征,根据坡面侵蚀—沉积分布规律,在每个坡面,分别选取坡上、坡中和坡下 3 个坡位进行土壤样品采集,每个坡位样品采集设计 2 个重复,即共采集农耕地耕层(0—20 cm)土壤样品数 36 个。在每个采样点,按 S 形采集 5 个耕层土样进行混合,并用四分法取适量混合土样装入无菌铝盒中,保存于 4 ℃冰箱中待测。

1.3　土壤性质测定与数据处理

土壤有机质含量用重铬酸钾容量法测定,土壤全氮采用半微量凯氏法测定,土壤 pH 值用电位法测定[9];土壤微生物群落数量采用稀释平板法测定[10]。所有实验数据均用 SPSS 19.0 进行统计分析,用 LSD 法进行显著性检验。

表 1　采样点基本情况

土样编号	流域位置	坡面编号	坡面位置	海拔/m	坡长/m	坡度/(°)	pH 值	土壤有机质/($g \cdot kg^{-1}$)	土壤全氮/($g \cdot kg^{-1}$)
1	上游	A	上	183	93	5	5.89	19.40	0.98
2			中	180	83	6	5.40	37.86	0.85
3			下	176	100	3	5.70	19.44	1.03
4		B	上	186	125	6	5.86	16.53	1.25
5			中	182	115	7	5.51	21.44	1.38
6			下	173	140	3	5.62	22.96	1.21
7	中游	C	上	173	90	4	6.02	20.63	1.17
8			中	169	93	6	5.52	23.14	1.02
9			下	163	100	2	5.64	27.66	1.31
10		D	上	164	100	4	5.49	21.34	1.38
11			中	152	100	5	5.41	24.65	1.16
12			下	150	115	2	5.65	29.74	1.37
13	下游	E	上	156	218	3	5.51	23.82	1.65
14			中	152	210	5	5.66	27.55	1.19
15			下	150	245	1	5.42	69.88	1.32
16		F	上	154	200	3	5.64	21.51	1.57
17			中	145	198	4	5.83	26.34	1.22
18			下	139	215	2	6.21	43.98	1.72

2 结果与讨论

2.1 土壤微生物群落数量的流域分布特征

表 2 表明，宾州河流域土壤微生物总数量在流域上的分布规律表现为：上游＜中游＜下游；其中，土壤微生物总数量在上游变化于 $0.75\times10^7\sim2.00\times10^7$ 个/g，平均 1.43×10^7 个/g，在中游为 $0.89\times10^7\sim2.37\times10^7$ 个/g，平均 1.78×10^7 个/g，下游为 $1.63\times10^7\sim2.66\times10^7$ 个/g，平均 1.91×10^7 个/g。土壤微生物总数量在下游与上游和中游的差异皆达到显著水平（$p<0.05$），而土壤微生物总数量在上游和中游未达到显著性差异。

从土壤微生物群落组成上看，土壤细菌数量、真菌数量和放线菌数量在流域的分布规律各不相同。土壤细菌数量的流域分布规律与土壤微生物总数量的流域分布规律一致，其中，土壤细菌数量在流域上游变化于 $0.65\times10^7\sim1.66\times10^7$ 个/g，平均为 1.21×10^7 个/g，在中游为 $0.69\times10^7\sim2.06\times10^7$ 个/g，平均值 1.52×10^7 个/g；在下游为 $1.26\times10^7\sim2.41\times10^7$ 个/g，平均值 1.69×10^7 个/g。流域下游土壤细菌数量与上游、中游的差异皆达到显著水平，而上游和中游土壤细菌数量未达到显著性差异。

土壤真菌数量在流域的分布规律为：上游＞下游＞中游；其中，流域上游土壤真菌数量变化于 $1.94\times10^5\sim4.81\times10^5$ 个/g，平均为 2.28×10^5 个/g，中游为 $0.85\times10^5\sim2.69\times10^5$ 个/g，平均值 1.38×10^5 个/g，下游为 $0.94\times10^5\sim3.76\times10^5$ 个/g，平均值 1.92×10^5 个/g。中游和下游土壤真菌数量与上游的差异皆达到显著水平，而其在中游与下游差异未达到显著水平。

流域土壤放线菌表现为上游和下游数量相当而中游数值最高。其中，流域上游放线菌数量变化于 $0.82\times10^6\sim3.10\times10^6$ 个/g，平均为 1.98×10^6 个/g，中游为 $1.30\times10^6\sim3.44\times10^6$ 个/g，平均值 2.44×10^6 个/g，下游为 $1.15\times10^6\sim2.45\times10^6$ 个/g，平均值为 1.98×10^5 个/g。中游土壤放线菌数量与上游和下游的差异分别达到显著水平，而其在上游和下游的差异未达到显著水平。

表 2 土壤微生物群落数量在流域上、中、下游的变化

流域位置	细菌数量/(10^7个·g^{-1})			真菌数量/(10^5个·g^{-1})			放线菌数量/(10^6个·g^{-1})			微生物总数量/(10^7个·g^{-1})		
	平均值±SD	最大值	最小值	平均值±SD	最大值	最小值	平均值±SD	最大值	最小值	平均值±SD	最大值	最小值
上游	1.21±0.42b	1.66	0.65	2.28±0.88a	4.81	1.94	1.98±0.80b	3.10	0.82	1.43±0.49b	2.00	0.75
中游	1.52±0.51b	2.06	0.69	1.38±0.49b	2.69	0.85	2.44±0.81a	3.44	1.30	1.78±0.57b	2.37	0.89
下游	1.69±0.40a	2.41	1.26	1.92±0.69b	3.76	0.94	1.98±0.55b	2.45	1.15	1.91±0.43a	2.66	1.63

注：数据为流域同一位置（上游、中游、下游）两个坡面数据的平均值；同列不同小写字母表示在 $p<0.05$ 水平时有差异。SD 为标准差。下同。

2.2 土壤微生物群落数量的坡面分布特征

表 3 表明，宾州河流域土壤微生物总数量在坡面上的分布规律为坡中＜坡上＜坡下；其中，土壤微生物总数量在坡上部变化于 $8.90\times10^6\sim2.31\times10^7$ 个/g，平均 1.68×10^7 个/g，在坡中部为 $7.50\times10^6\sim2.37\times10^7$ 个/g，平均 1.60×10^7 个/g，在坡下部为 $1.35\times10^7\sim2.66\times10^7$ 个/g，平均 1.83×10^7 个/g。土壤微生物总数量在坡中部与坡上部和下部的差异皆达到显著水平（$p<0.05$），而土壤微生物总数量在坡上部和坡下部未达到显著性差异。

从土壤微生物群落组成上看，土壤细菌数量、真菌数量和放线菌数量在坡面的分布规律各不相同。土壤细菌数量的坡面分布规律与土壤微生物总数量的坡面分布规律一致，其中，土壤细菌数量在坡上部变化于 $6.90\times10^6\sim1.96\times10^7$ 个/g，平均为 1.42×10^7 个/g；在坡中部为 $6.50\times10^6\sim2.06\times10^7$ 个/g，平均值 1.39×10^7 个/g；在坡下部为 $1.21\times10^7\sim2.41\times10^7$ 个/g，平均值 1.60×10^7 个/g。土壤细菌数量在坡中部与坡上部和坡下部的差异皆达到显著水平，而土壤细菌数量在坡上部和坡下部未达到显著性差异。土壤真菌数量在坡面的分布规律表现为：坡上＞坡中＞坡下。

其中，土壤真菌数量在坡上部变化于 $1.04\times10^5\sim3.76\times10^5$ 个/g，平均 2.32×10^5 个/g，在坡中部为 $8.50\times10^4\sim4.81\times10^5$ 个/g，平均值 1.86×10^5 个/g，在坡下部为 $9.40\times10^4\sim2.15\times10^5$ 个/g，平均值 1.40×10^5 个/g。坡中部和坡下部土壤真菌数量与坡上部的差异皆达到显著水平，而其在坡中部与坡下部未达到显著水平。土壤放线菌数量在坡面的分布规律表现为：坡中＜坡下＜坡上；其中，土壤放线菌数量在坡上部变化于 $1.77\times10^6\sim3.44\times10^6$ 个/g，平均为 2.33×10^6 个/g，在坡中部为 $8.20\times10^5\sim3.02\times10^6$ 个/g，平均值 1.92×10^6 个/g；在坡下部为 $1.15\times10^6\sim3.10\times10^6$ 个/g，平均值 2.15×10^6 个/g。坡上部和坡下部土壤放线菌数量与坡中部的差异皆达到显著水平，而其在坡上部与坡下部未达到显著水平。

表 3　土壤微生物群落数量在坡面上、中、下部位的变化

坡面位置	细菌数量/(10^7 个·g^{-1})			真菌数量/(10^5 个·g^{-1})			放线菌数量/(10^6 个·g^{-1})			微生物总数量/(10^7 个·g^{-1})		
	平均值±SD	最大值	最小值	平均值±SD	最大值	最小值	平均值±SD	最大值	最小值	平均值±SD	最大值	最小值
上部	1.42±0.43a	1.96	0.69	2.32±0.99a	3.76	1.04	2.33±0.63a	3.44	1.77	1.68±0.48a	2.31	0.89
中部	1.39±0.58b	2.06	0.65	1.86±0.68b	4.81	0.85	1.92±0.78b	3.02	0.82	1.60±0.64b	2.37	0.75
下部	1.60±0.44a	2.41	1.21	1.40±0.44b	2.15	0.94	2.15±0.80a	3.10	1.15	1.83±0.47a	2.66	1.35

注:数据为 6 个坡面相同坡位(均上部、坡中部、坡下部)数值的平均值。

2.3　流域土壤侵蚀空间分布对土壤微生物群落数量的影响

根据安娟[11]的研究结果,黑土区典型流域上游以侵蚀过程为主,平均侵蚀速率为 1 922.0 t/(km^2·a),流域中游平均侵蚀速率为 1 330.6 t/(km^2·a),而流域下游主要发生沉积,沉积速率平均为 1 348.5 t/(km^2·a)。可以看出,宾州河流域土壤微生物总数量在流域的分布与土壤侵蚀—沉积速率的空间分布相对应。土壤细菌数量、真菌数量和放线菌数量在流域的分布与土壤侵蚀—沉积速率空间分布的对应关系各不相同。其中,土壤细菌数量在流域的分布与土壤侵蚀—沉积速率的分布相对应,土壤真菌数量在侵蚀速率最大的上游达到最大值,反映了土壤侵蚀是影响土壤细菌数量和真菌数量在流域分布的主要因素。土壤放线菌数量在流域的侵蚀区(上游)和沉积区(下游)基本相同,而在流域侵蚀—沉积复合区(中游)达到最大值,说明土壤放线菌数量在流域的分布基本上不受侵蚀的影响,其可能与土壤养分、水热状况等其它土壤环境因素有关。

根据王禹等人[12]的研究结果,黑土区坡面土壤侵蚀程度随着坡长的增加呈现出较弱—强—弱的变化趋势,即坡上部土壤侵蚀强度较轻,坡中部土壤侵蚀速率最大,坡下部侵蚀速率最小。由于土壤侵蚀在坡面上存在明显的强弱交替变化规律,进而影响了土壤微生物群落数量在坡面的分布特征。据安娟[13]的研究结果,坡上部平均侵蚀速度为 1 156.7 t/(km^2·a);坡中部侵蚀最严重,侵蚀速率为 3 068.7 t/(km^2·a);而坡下部表现出明显的沉积,沉积速率为 1 884.7 t/(km^2·a)。可以看出,宾州河流域土壤微生物总数量在坡面上的分布与土壤侵蚀—沉积速率的空间分布相对应。土壤细菌数量、真菌数量和放线菌数量在坡面上的分布与土壤侵蚀—沉积速率空间分布的对应关系各不相同,其中,土壤细菌数量在坡面上的分布与土壤侵蚀—沉积速率的分布相对应,土壤沉积速率最大的坡下部土壤真菌数量最少,反映了土壤侵蚀—沉积速率是影响土壤细菌和真菌数量在坡面分布的主要因素。土壤放线菌数量在坡面上部(侵蚀区)最大,坡下部(沉积区)次之,在坡中部(侵蚀区)最小,说明土壤放线菌数量在坡面分布基本不受坡面侵蚀的影响,这可能与土壤养分、水热状况等其它环境因素有关。由此可见,侵蚀—沉积速率在流域不同位置和坡面不同部位间的差异直接导致了土壤细菌数量和真菌数量在空间分布上的差异,进一步揭示了土壤侵蚀是影响研究区耕层土壤微生物群落数量空间分布的主要因素。

3　结 论

(1) 宾州河流域土壤微生物总数量在流域上的分布规律为:上游<中游<下游。从土壤微生物群落组成看,土壤细菌数量的空间分布规律与土壤微生物总数量的分布规律一致,土壤真菌数量在流域的分布规律为:上游>下游>中游,土壤放线菌数量在流域的分布规律为上游和下游数量相当而中游数值最高。

(2) 宾州河流域土壤微生物总数量在坡面上的分布规律为:坡中<坡上<坡下。从土壤微生物群落组成看,土壤细菌数量的坡面分布规律与土壤微生物总数量的坡面分布规律一致,土壤真菌数量在坡面的分布规律为:坡上>坡中>坡下,土壤放线菌数量在坡面的分布规律为:坡中<坡下<坡上。

(3) 宾州河流域土壤微生物总数量在流域和坡面上的分布皆与侵蚀—沉积速率的空间分布相对应。从土壤微生物群落组成看,土壤细菌在流域和坡面上的分布皆与侵蚀—沉积速率的空间分布相对应;土壤真菌数量在土壤侵蚀速率最大的上游数值最大,在土壤沉积速率最大的坡下部数值最小;土壤放线菌数量在流域和坡面上的分布基本不受侵蚀的影响。由此可见,侵蚀—沉积是影响研究流域土壤微生物总数量、土壤细菌数量和土壤真菌数量空间分布的主要因素。

[参 考 文 献]

[1] 黑龙江省土地局,黑龙江省土壤普查办公室. 黑龙江土壤[M]. 北京:中国农业出版社,1992.

[2] 水利部,中国科学院,中国工程院. 中国水土流失防治与生态安全:东北黑土卷[M]. 北京:科学出版社,2010:41-55,209-230.

(下转第 50 页)

要水力学参数和水动力学根源。

细沟侵蚀是极其重要的坡面侵蚀过程之一，是国际土壤侵蚀研究的重要对象。细沟侵蚀过程中的水流剪切力在不同坡度与流量条件下的不同是，并且影响调节着细沟侵蚀率。本研究采用具有定流量人工放水的组合小区模拟降雨试验方法，对黄土坡面细沟水流剪切力及其侵蚀效应进行了试验分析，取得了相应的研究结果。然而，由于试验的坡度、雨强等条件范围所限，其结果还不能代表任何条件下的规律特征，还需进一步研究，以全面揭示汇沙对细沟侵蚀的作用，为进一步全面认识和治理细沟侵蚀提供依据。

[参 考 文 献]

[1] 郑粉莉，唐克丽，周佩华. 坡耕地细沟侵蚀的发生、发展和防治途径的探讨[J]，水土保持学报，1987，1(1)：36-48.

[2] 郑良勇，李占斌，李鹏. 黄土高原陡坡土壤侵蚀特性试验研究[J]. 水土保持研究，2003，10(2)：47-49.

[3] 张晴雯，雷廷武，潘英华，等. 细沟侵蚀可蚀性参数及土壤临界抗剪应力的有理(实验)求解方法[J]. 中国科学院研究生院学报，2004，21(40)：468-474.

[4] 陈力，刘青泉，李家春. 坡面细沟侵蚀的冲刷试验研究[J]. 水动力学研究与进展. 2005，20(6)：761-766.

[5] 王瑄，李占斌，郑良勇. 土壤剥蚀率与水流剪切力关系室内模拟试验[J]. 沈阳农业大学学报，2007，38(4)：577-580.

[6] 王瑄，李占斌. 坡面水蚀输沙动力过程实验研究[M]. 北京：科学出版社，2009：48-54.

[7] 杨春霞，姚文艺，肖培青，等. 坡面径流剪切力分布及其与土壤剥蚀率关系的试验研究[J]. 中国水土保持科学，2010，8(6)：53-57.

[8] Lyle W M，Smerdon E T. Relation of compaction and other soil properties to erosion resistance of soils[J]. Trans. of the ASAE，1965(8)：419-422.

[9] Foster G R，Meyer L D. Transport of soil particles by shallow flow [J]. Trans. of the ASAE，1972，15(1)：99-102.

[10] Savat J. The hydraulics of sheet flow on a smooth surface and the effect of simulated rainfall [J]. Earth Surf. Proc.，1977(2)：125-140.

[11] Savat J，Ploey J D. Sheet Wash and Rill Development by Surface Flow[C]// Eryan R B，Yair A. Banland Geomorphology and Piping. Geobooks，Norwich，1982：113-126.

[12] Foster G R. Modeling the Erosion Process[C]// Haan C T. Hydrologic Modeling of Small Watersheds. ASAE. Monogr. No. 5. ASAE，St. Joseph M L. 1982：296-380.

[13] Cantalice J R B，Cassol E A，Reichert J M，et al. Flow hydraulics and sediment transport in rills of a sandy clay loam soil[J]. Revista Brasileira De Ciencia Do Solo，2005，29(4)：597-607.

(上接第 45 页)

[3] 赵军，张久明，孟凯，等. 地统计学及 GIS 在黑土区域土壤养分空间异质性分析中的应用：以海伦市为例[J]. 水土保持通报，2004，24(6)：53-57.

[4] 吴晓磊，王大庆，徐博，等. 漫岗丘陵区黑土村级农田土壤养分空间变异研究[J]. 土壤通报 2010，41(4)：825-829.

[5] 孟凯，张兴义. 黑龙江海伦农田黑土水分特征[J]. 土壤通报，2003，34(1)：11-14.

[6] Pankhurst C E，Hawke B G，McDonald H J. Evaluation of soil biological properties as potential bio-indicators of soil health[J]. Aust. J. Exp. Agri.，1995，35(7)：1015-1028.

[7] 刘继亮，李锋瑞. 坡向和微地形对大型土壤动物空间分布格局的影响[J]. 中国沙漠，2008，28(6)：1104-1112.

[8] 郭银宝，许小英. 祁连林区不同植被类型下三种土壤微生物群落的数量分布[J]. 青海农林科技，2005(3)：16-18.

[9] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海：上海科学技术出版社，1978.

[10] 李阜棣，喻子牛. 农业微生物实验技术[M]. 北京：中国农业出版社，1996.

[11] 安娟. 东北黑土区土壤侵蚀过程机理和土壤养分迁移研究[D]. 陕西 杨凌：中国科学院水土保持与生态环境研究中心，2012.

[12] 王禹，杨明义，刘普灵. 典型黑土直型坡耕地土壤侵蚀强度的小波分析[J]. 核技术，2010，24(1)：98-103.

[13] 安娟，卢嘉，郑粉莉，等. 不同地表处理下黑土区坡耕地侵蚀过程中土壤团聚体迁移研究[J]. 水土保持学报，2011，25(6)：100-104.