

DOI: 10.11766/trxb201703080015

# 薄层黑土微生物生物量碳氮对土壤侵蚀—沉积的响应\*

冯志珍<sup>1</sup> 郑粉莉<sup>1, 2†</sup> 易 祎<sup>3</sup>

(1 西北农林科技大学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)

(2 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

(3 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要** 研究土壤侵蚀—沉积对土壤微生物生物量的影响可以为科学评估土壤侵蚀的环境效应提供依据。以典型薄层黑土区——黑龙江省宾州河流域为研究区, 利用土壤<sup>137</sup>Cs含量估算侵蚀速率, 通过分析流域不同位置 and 不同坡面部位土壤微生物生物量碳和氮含量以及土壤侵蚀强度的差异, 揭示土壤微生物生物量对土壤侵蚀—沉积的响应规律。结果表明: 流域不同位置 and 不同坡面部位土壤微生物生物量的分布存在明显差异, 并呈现出与土壤侵蚀—沉积空间分布相反的变化趋势。土壤侵蚀速率在流域的分布为上游 > 中游 > 下游, 在坡面的分布为坡中部 > 坡上部 > 坡下部; 土壤微生物生物量碳 (Microbial biomass carbon, MBC) 和微生物生物量氮 (Microbial biomass nitrogen, MBN) 在流域表现为下游 > 中游 > 上游, 在坡面表现为坡下部 > 坡上部 > 坡中部。回归分析表明, MBC、MBN、有机质 (Organic matter, OM) 和全氮 (Total nitrogen, TN) 含量随土壤侵蚀强度的增大而减少。土壤侵蚀对土壤微生物生物量的分布有重要影响, 土壤侵蚀—沉积过程引起土壤养分的迁移和再分布是导致侵蚀区和沉积区土壤微生物生物量分布产生差异的重要原因。

**关键词** 土壤侵蚀—沉积; 土壤侵蚀速率; 微生物生物量碳; 微生物生物量氮; 薄层黑土  
中图分类号 S157 文献标识码 A

东北黑土区是我国重要的商品粮生产基地, 由于过度开垦和自然因素等共同影响, 土壤侵蚀日益严重<sup>[1]</sup>。区内现有水土流失面积 $27.59 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占黑土区总面积的27%<sup>[2]</sup>, 其中水蚀面积 $18.27 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占黑土区总面积的18%, 坡耕地黑土层厚度每年以0.3 ~ 1 cm的速度递减<sup>[3]</sup>。土壤侵蚀使得土壤的表土层随径流流走, 土壤中的营养物质大量流失, 造成土壤物理化学性质改变, 从而导致土壤质量下降、土地退化以及生产力急剧下降, 据统计资料显示, 黑土区每年由于水土流失造成粮食减产高达 $14 \times 10^8 \text{ kg}$ <sup>[4]</sup>。

土壤微生物作为土壤有机质、养分转化和循环的动力, 在土壤生态系统的能量流动和养分转化过程中起着重要作用<sup>[5]</sup>。土壤微生物生物量对

环境变化具有较高的敏感性和响应性, 被认为是比土壤有机质更灵敏的环境变化指示因子<sup>[6]</sup>。研究表明, 土壤微生物生物量可以表征土壤质量的优劣和土壤侵蚀速率的高低, 其空间分布可以反映土壤侵蚀的程度<sup>[7-8]</sup>。因此, 研究土壤微生物生物量与土壤侵蚀—沉积的关系具有重要意义。目前, 关于土壤侵蚀对土壤理化性质的影响已有大量报道<sup>[9-10]</sup>, 但定量地分析土壤侵蚀对土壤微生物生物量影响的研究较少, Hu等<sup>[11-12]</sup>针对黄土丘陵沟壑区开展了相关研究, 有关东北黑土区这方面的研究更是鲜见报道。本文以典型薄层黑土区 (黑土层厚度小于30 cm的黑土区)——黑龙江省宾县宾州河流域为研究区, 利用<sup>137</sup>Cs示踪技术, 通过土壤侵蚀速率表征侵蚀程度, 研究薄层黑土微生物生物量

\* 国家自然科学基金项目 (41571263) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41571263)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 冯志珍 (1986—), 女, 内蒙古呼和浩特人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀对土壤质量的影响评价研究。

E-mail: fzz870508@126.com

收稿日期: 2017-03-08; 收到修改稿日期: 2017-06-11; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2017-08-17

碳 (Microbial biomass carbon, MBC) 和微生物生物量氮 (Microbial biomass nitrogen, MBN) 对土壤侵蚀—沉积的响应, 以期科学评估土壤侵蚀的环境效应提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

黑龙江省哈尔滨市宾县宾州河流域 (127°26'04" ~ 127°32'02"E, 45°43'13" ~ 45°51'37"N) (图1) 位于松嫩平原东部边缘, 属于松花江一级支流<sup>[3]</sup>。该流域面积为375 km<sup>2</sup>, 其中农用地占60%左右。流域内海拔160 ~ 220 m, 地貌特征以漫岗丘陵地形为主, 地势较为平缓, 耕地坡度变化于1° ~ 7°, 坡长可达数百米, 最长可达数千米。气候类型属于中温带大陆性季风气候, 多年平均气温3.9℃, 多年平均降水量548.5 mm, 其中6—9月的降雨量约占全年降水量的80%, 无霜期约148 d。宾州河流域内土壤类型以黑土为主, 占流域面积的60%以上, 其中薄层黑土分布区占流域面积的40%以上, 属典型的薄层黑土区<sup>[13]</sup>。结合农用地和薄层黑土分布面积, 用于本研究采集坡面样品的面积约占流域总面积的30%。土壤质地为粉壤土, 其颗粒组成为 (美国农业部制): 砂粒 (2 ~ 0.05 mm) 含量为5.82%, 粉粒 (0.05 ~ 0.002 mm) 含量为55.3%, 黏粒 (< 0.002 mm) 含量为38.9%。平均耕层土壤容重1.1 g cm<sup>-3</sup>, 有机质含量26.42 g kg<sup>-1</sup>, 全氮含量1.43 g kg<sup>-1</sup>, pH为6.07。

野外调查表明, 宾州河流域土壤侵蚀强度差异较大, 黑土层厚度不但在流域上、中、下游变化明显, 从坡顶至坡脚变化也较为显著, 尤其是坡中部土壤“破皮黄”现象明显<sup>[13-14]</sup>, 坡脚则多发生沉积, 是研究土壤微生物生物量对土壤侵蚀—沉积响应的天然试验场。流域农地耕种历史已有80余年, 主要以种植玉米为主, 一年一熟制。一般于4月底翻地, 5月初播种, 9月底至10月初收获。玉米行距在60 ~ 70 cm之间, 株距在30 ~ 40 cm之间, 垄高在15 ~ 20 cm之间。施肥以N肥 (尿素, 施用量为180 kg hm<sup>-2</sup>), P肥 (磷酸氢二铵, 施用量为75 kg hm<sup>-2</sup>), K肥 (氧化钾, 施用量为60 kg hm<sup>-2</sup>) 为主, 均于播种前作底肥一次性施入, 拔节期追施N肥 (尿素, 180 kg hm<sup>-2</sup>), 除草剂多施用草甘膦

异丙胺盐。玉米在整个生育期内无灌溉, 主要依靠自然降水。

### 1.2 样地设置与样品采集

本研究以黑龙江省哈尔滨市宾县1:1万比例尺地形图和土壤类型图为基础, 以地形部位、表层黑土层厚度和土壤侵蚀空间分布特征为依据, 在流域的上游、中游、下游各选取2个典型农耕地坡面作为采样坡面 (图1)。采样坡面坡度在3° ~ 5°之间, 坡长在200 ~ 300 m之间, 开垦历史在80 a左右, 种植作物为玉米, 且农地施肥水平和管理措施基本相同。根据坡长, 每个坡面沿纵断面线在坡上部、坡中部和坡下部分别设置采样点, 共计18个采样点, 每个采样点设置3个重复。采样点基本情况见表1。

位于宾州河流域的黑龙江省水土保持科学研究院科技园的观测资料显示, 该流域土壤在冬季处于冻土状态, 春季4月份一般仍有降雪覆盖。夏季气温较高, 微生物代谢比较旺盛, 玉米处于抽雄期, 秋季气温降低, 微生物代谢减弱, 玉米处于成熟期。据此, 本研究分别于2011年和2012年的夏季 (7月) 和秋季 (10月) 采集土壤微生物生物量样品, 采样深度为0 ~ 20 cm, 将采集的五份土样进行混合, 四分法取适量土壤装入灭菌铝盒, 4℃冰箱保存待测; 于2012年夏季 (7月) 采集土壤理化性质样品, 采样深度为0 ~ 20 cm, 采集五份土样进行混合, 四分法取适量土壤带回, 自然风干后, 去除石块、土壤表面凋落物和植物根系等杂物, 研磨粉碎后过0.25 mm筛子待测; 于2012年夏季 (7月) 采集<sup>137</sup>Cs土壤样品, 采样深度为0 ~ 30 cm, 具体参照安娟<sup>[15]</sup>的采样方法。该流域2011年7月和10月降雨量分别为143.3和24.8 mm, 平均气温分别为24.5和8.9℃; 2012年7月和10月降雨量分别为129.9和25.3 mm, 平均气温分别为23.9和6.4℃。

### 1.3 分析方法

土壤微生物生物量采用氯仿熏蒸浸提法测定<sup>[16]</sup>。将新鲜土壤样品置于25℃恒温培养箱培养7 d后 (电子天平测量精度为0.001 g), 用去乙醇氯仿在-0.07 MPa、25℃真空干燥器内熏蒸24 h, 熏蒸与未熏蒸的土壤均用K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液浸提。浸提液中土壤MBC使用总有机碳自动分析仪 (TOC) 测定 (TOC测量精度为0.01 g), 转换系数取0.45<sup>[17]</sup>, 土壤MBN采用过硫酸钾氧化法测定<sup>[16]</sup> (紫外分光光度计测量精度为0.001 g), 转换系数取0.54<sup>[17]</sup>。

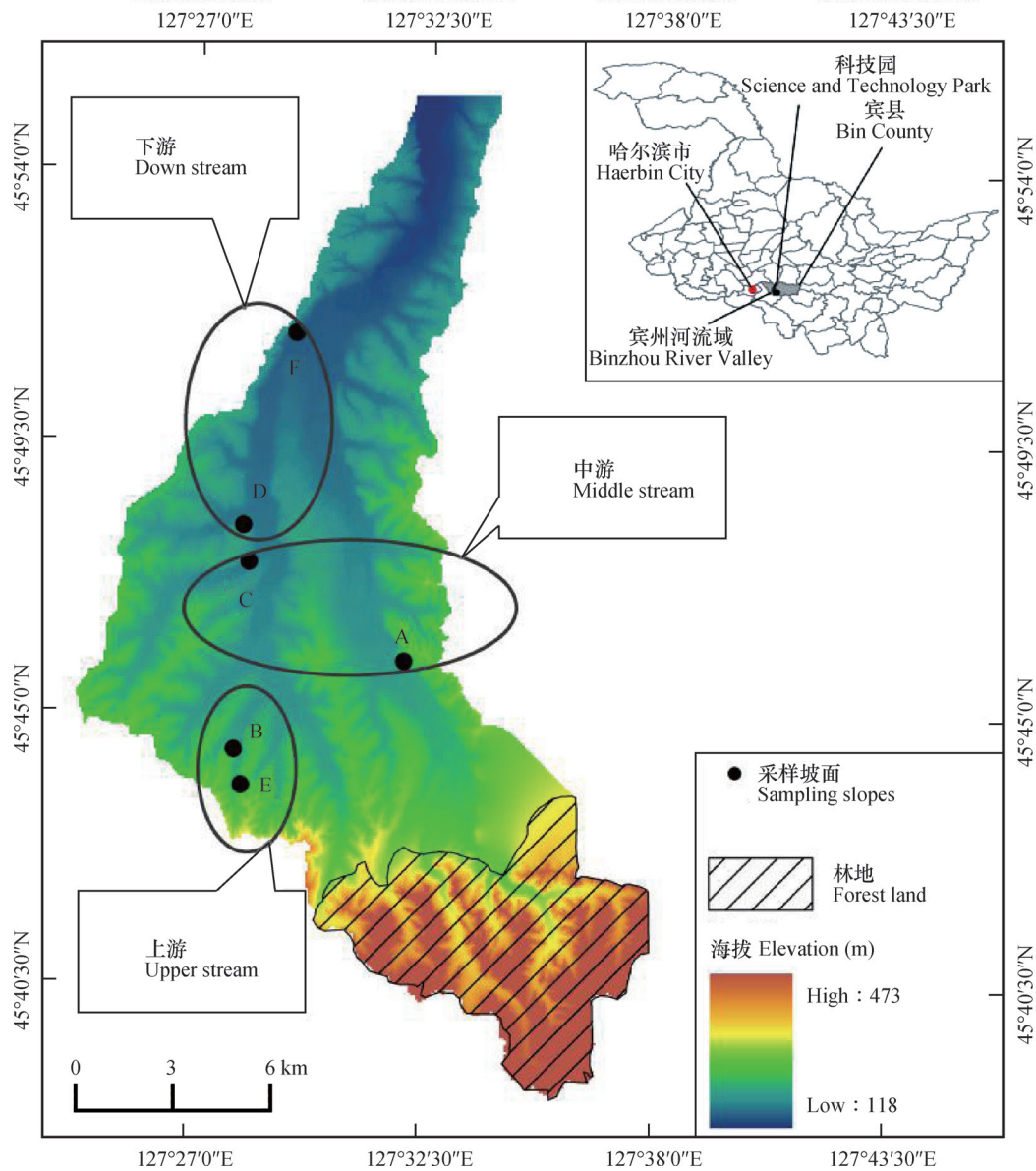


图1 研究区位置和采样坡面分布图

Fig. 1 Location of the study area and distribution of sampling slopes

土壤有机质 (Organic matter, OM) 采用重铬酸钾外加热氧化法测定<sup>[18]</sup>, 全氮 (Total nitrogen, TN) 采用半微量凯氏法测定<sup>[18]</sup> (凯氏定氮仪测量精度为0.0001 g), 样品重复测量误差为95%, 置信水平 ± 5%。

土壤中<sup>137</sup>Cs含量的测定: 称取250 g土样装入φ40 mm × 81 mm的有机玻璃盒中 (电子天平测量精度为0.001 g), 用胶带密封后, 使用经LabSOCS后的γ谱仪 (BE5030, CANBERRA, USA) 测量密封盒中土壤的<sup>137</sup>Cs能量, 测定<sup>137</sup>Cs的能量为661 keV, 测定时间为43 152 ~ 45 346 s。测量完成后, 使用DSA-1000数字化谱仪解谱, Genie-2000谱分析软

件分析谱数据, 得到<sup>137</sup>Cs的比活度和不确定度, 计算测量分析误差 (不确定度/比活度 × 100)<sup>[19]</sup>, 样品重复测量误差为95%, 置信水平 ± 5%。

1.4 数据处理

基于张信宝和文安邦<sup>[20]</sup>质量平衡模型估算土壤侵蚀速率, 模型表达式如下:

$$A = A_0\varphi_1(1 - \varphi_2 \frac{h}{D})^{n-1963} \quad (1)$$

式中, A为侵蚀区<sup>137</sup>Cs的活度 (Bq m<sup>-2</sup>); A<sub>0</sub>为采样年<sup>137</sup>Cs的背景值 (Bq m<sup>-2</sup>), 参考安娟<sup>[15]</sup>和杨维鸽<sup>[21]</sup>在相同研究区的结果, 即为2 379.0 Bq m<sup>-2</sup>; φ<sub>1</sub>为混入耕层的<sup>137</sup>Cs与总沉降量之比; φ<sub>2</sub>为侵蚀



表1 采样点基本概况

Table 1 Basic information of the sampling sites

流域位置	坡面编号	样点编号	坡面位置	经/纬度	海拔	有机质	全氮	
Location in the valley	Slope No.	Sample No.	Position on a slope	Longitude/Latitude	Elevation (m)	Organic matter (g kg <sup>-1</sup> )	Total nitrogen (g kg <sup>-1</sup> )	
上游	B	B-1	坡上部	127°28'32.7"E/45°44'32.2"N	186	16.43	1.21	
		B-2	坡中部	127°28'26.4"E/45°44'30.2"N	182	20.85	1.35	
		B-3	坡下部	127°28'17.1"E/45°44'26.4"N	173	22.72	1.24	
	E	E-1	坡上部	127°28'01.5"E/45°44'16.4"N	183	19.64	1.08	
		E-2	坡中部	127°28'04.9"E/45°44'15.1"N	180	19.85	1.03	
		E-3	坡下部	127°28'08.0"E/45°44'15.2"N	176	36.27	1.07	
	中游	A	A-1	坡上部	127°32'02.4"E/45°45'49.6"N	173	21.24	1.36
			A-2	坡中部	127°31'57.4"E/45°45'48.0"N	169	24.25	1.17
			A-3	坡下部	127°31'52.7"E/45°45'46.3"N	163	28.84	1.34
C		C-1	坡上部	127°28'15.7"E/45°47'38.7"N	164	20.67	1.16	
		C-2	坡中部	127°28'20.3"E/45°47'35.5"N	152	23.30	1.08	
		C-3	坡下部	127°28'19.1"E/45°47'28.8"N	150	27.87	1.37	
下游	D	D-1	坡上部	127°28'14.2"E/45°48'03.0"N	156	23.33	1.36	
		D-2	坡中部	127°28'20.5"E/45°48'12.8"N	152	27.36	1.20	
		D-3	坡下部	127°28'19.0"E/45°48'24.5"N	150	41.60	1.61	
	F	F-1	坡上部	127°29'11.9"E/45°51'28.9"N	154	21.52	1.58	
		F-2	坡中部	127°28'53.1"E/45°51'32.4"N	145	26.71	1.29	
		F-3	坡下部	127°28'35.4"E/45°51'36.1"N	139	35.85	1.73	

分选颗粒的校正因子;  $h$ 为年平均土壤侵蚀深度 ( $\text{m a}^{-1}$ );  $D$ 为年均犁底层深度 ( $\text{cm}$ );  $n$ 为采样年份。

土壤侵蚀速率计算公式如下:

$$E=hp \quad (2)$$

式中,  $E$ 为土壤侵蚀速率 ( $\text{kg m}^{-2} \text{a}^{-1}$ );  $h$ 同式(1);  $\rho$ 为土壤容重 ( $\text{kg m}^{-3}$ )。

采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和最小显著性差异法 (Least-Significant Difference, LSD) 进行显著性检验, 利用回归分析研究土壤微生物生物量和养分与土壤侵蚀速率之间的关系。上述统计分析由SPSS 20.0统计软件完成。

## 2 结 果

### 2.1 流域土壤微生物生物量碳氮基本特征

宾州河流域土壤MBC在2011年和2012年夏秋两季的波动范围分别为76.9~346.1  $\text{mg kg}^{-1}$ 和

94.9~438.1  $\text{mg kg}^{-1}$ , 平均值分别为210.3  $\text{mg kg}^{-1}$ 和234.7  $\text{mg kg}^{-1}$ ; MBN在2011年和2012年夏秋两季的波动范围分别为1.8~33.8  $\text{mg kg}^{-1}$ 和5.7~23.1  $\text{mg kg}^{-1}$ , 平均值分别为12.0  $\text{mg kg}^{-1}$ 和13.0  $\text{mg kg}^{-1}$ 。MBC和MBN在秋季均显著低于夏季, 而在两年间的相同季节之间变化不显著 ( $p < 0.05$ ) (表2)。

### 2.2 土壤微生物生物量碳氮空间分布

由于受气温和地温的影响, 研究流域春季和冬季不适合采集土壤微生物生物量样品, 而MBC和MBN含量在2011年和2012年相同季节之间差异不显著, 所以用2011年和2012年夏秋两季各采样点MBC和MBN含量的平均值, 分析土壤微生物生物量碳和氮的空间分布规律。结果表明, 宾州河流域上游、中游和下游MBC含量的波动范围分别为175.0~221.9、166.6~266.1和204.9~314.8  $\text{mg kg}^{-1}$ , 平均值分别为190.9、215.6和261.0  $\text{mg kg}^{-1}$ ; MBN含量的波动范围分别为10.1~13.4、9.4~15.2和12.5~18.0  $\text{mg kg}^{-1}$ , 平均值分别为11.2、11.9和

表2 研究流域土壤微生物生物量碳和氮基本特征

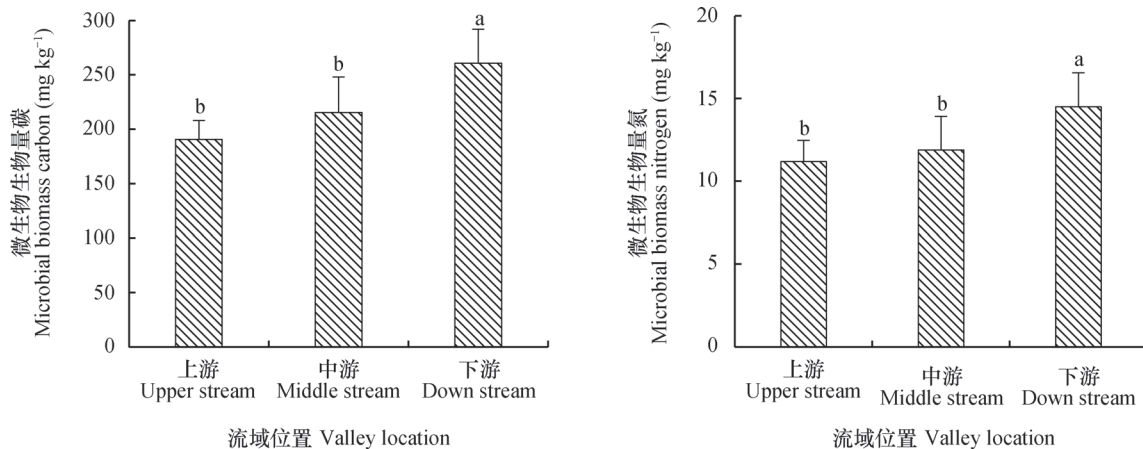
Table 2 Basic characteristics of soil microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen in the studied valley

时间 Time	微生物生物量碳MBC ( $\text{mg kg}^{-1}$ )			微生物生物量氮MBN ( $\text{mg kg}^{-1}$ )		
	平均值 $\pm$ 标准差 Mean $\pm$ SD	最大值 Max	最小值 Min	平均值 $\pm$ 标准差 Mean $\pm$ SD	最大值 Max	最小值 Min
2011年夏季 Summer in 2011	254.5 $\pm$ 44.8 a	318.7	160.4	17.3 $\pm$ 5.1 a	33.8	11.3
2011年秋季 Autumn in 2011	166.2 $\pm$ 64.2 b	346.1	76.9	6.8 $\pm$ 3.4b	14.6	1.8
2012年夏季 Summer in 2012	274.6 $\pm$ 67.8 a	438.2	187.7	17.5 $\pm$ 3.2 a	23.1	11.4
2012年秋季 Autumn in 2012	194.8 $\pm$ 80.1b	359.7	94.9	8.6 $\pm$ 3.0 b	14.9	5.7

注：同一列不同字母表示显著性差异 ( $p < 0.05$ ) Note: Different letters in the same column represent significant difference at 0.05 level

14.5  $\text{mg kg}^{-1}$ 。MBC和MBN在流域的分布皆为下游 > 中游 > 上游，二者在流域下游均显著高于上游和中游，上游与中游之间差异不显著 ( $p < 0.05$ )。

与下游MBC和MBN含量相比，MBC在上游和中游含量分别减少了26.9%和17.4%，MBN在上游和中游含量分别减少了22.9%和18.1% (图2)。



注：不同字母表示显著性差异 ( $p < 0.05$ )。下同 Note: Different letters represent significant difference at 0.05 level. The same below

图2 流域不同位置土壤微生物生物量碳和氮的对比

Fig. 2 Microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen in soil relative to location in the valley

在坡面尺度上，坡面上部、中部和下部MBC含量的波动范围分别为166.6 ~ 272.4、175.0 ~ 224.4和181.1 ~ 314.8  $\text{mg kg}^{-1}$ ，平均值分别为216.3、200.3和250.9  $\text{mg kg}^{-1}$ ；MBN含量在坡面上部、中部和下部的波动范围分别为10.3 ~ 18.0、9.4 ~ 13.1和12.0 ~ 15.6  $\text{mg kg}^{-1}$ ，平均值分别为12.5、11.2和13.9  $\text{mg kg}^{-1}$ 。MBC和MBN在坡面的分布皆为坡下部 > 坡上部 > 坡中部，二者在坡下部均显著高于

坡中部，坡上部与坡中部和坡下部之间差异不显著 ( $p < 0.05$ )。与坡下部MBC和MBN含量相比，MBC在坡上部和坡中部含量分别减少了13.8%和20.2%，MBN在坡上部和坡中部含量分别减少了10.0%和19.5% (图3)。

### 2.3 流域土壤侵蚀—沉积空间分布

土壤侵蚀速率是评价土壤侵蚀强度的最重要指标。基于对 $^{137}\text{Cs}$ 估算宾州河流域土壤侵蚀速

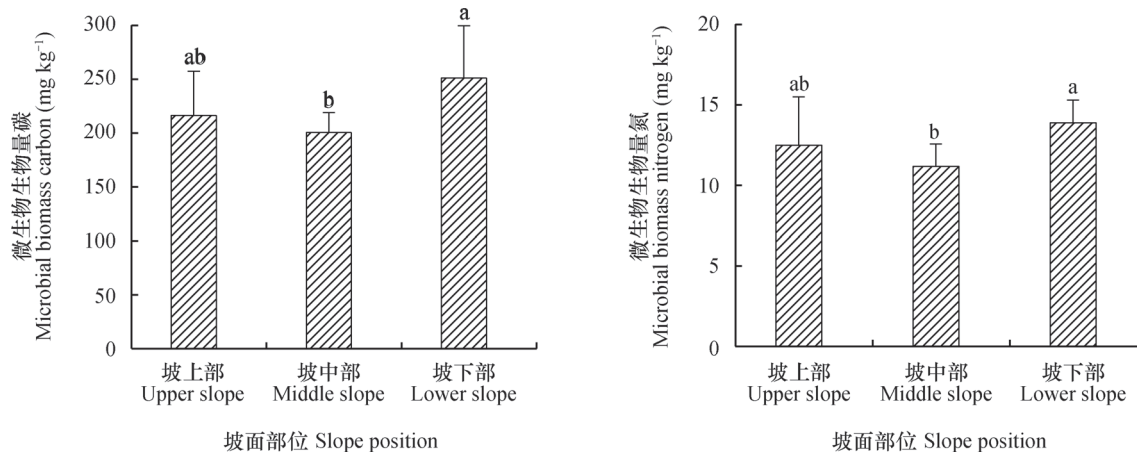


图3 不同坡面部位土壤微生物生物量碳和氮的对比

Fig. 3 Microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen in soil relative to position on a slope

率的数据分析，发现土壤侵蚀速率在流域的分布表现为上游 > 中游 > 下游，且三者之间差异显著 ( $p < 0.05$ ) (图4A)。流域上游侵蚀最为严重，侵蚀速率介于315 ~ 8 088 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>之间 (正值代表侵蚀，负值代表沉积)，平均值为3 265 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>；中游侵蚀程度次之，伴有明显的沉积现象，侵蚀沉积速率介于-1 831 ~ 5 072 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>之间，平均值为1 622 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>；下游侵蚀较弱，侵蚀和沉积现象并存，侵蚀沉积速率介于-3 905 ~ 2 823 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>之间，平均值为154 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。

土壤侵蚀速率在坡面的分布表现为坡中部 > 坡上部 > 坡下部，且三者之间差异显著 ( $p < 0.05$ ) (图4B)。坡中部侵蚀最为严重，侵蚀速率介于2 527 ~ 8 088 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>之间，平均值为4 817 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>；坡上部侵蚀相对较轻，侵蚀速率介于964 ~ 2 362 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>之间，平均值为1 657 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>；坡下部表现出明显的沉积，侵蚀沉积速率介于-3 905 ~ 344 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>之间，平均值为-1 433 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。可见，土壤侵蚀强度随着坡长的增加，分布呈现弱—强—弱的变化趋势，坡面上存在明显

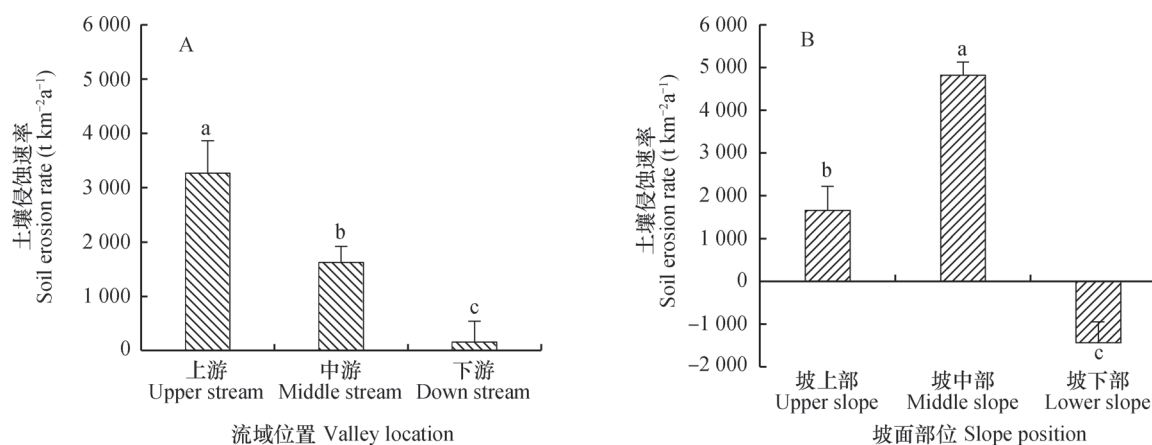


图4 不同流域位置 (A) 和不同坡面部位 (B) 土壤侵蚀速率的分布

Fig. 4 Distributions of soil erosion rate in the valley relative to location (A) and position on a slope (B)

的侵蚀强弱交替变化规律。

#### 2.4 土壤微生物生物量碳氮对侵蚀—沉积的响应

将土壤微生物生物量碳和氮空间分布与土壤侵蚀—沉积的空间分布进行对比后发现，流域尺度

上，土壤微生物生物量碳和氮在侵蚀强度较大的流域上游含量较低，在侵蚀强度较小的流域中游含量居中，在主要表现为沉积的流域下游含量较高；坡面尺度上，土壤微生物生物量碳和氮在侵蚀强度较

大的坡中部含量较低,在侵蚀强度较小的坡上部含量居中,在以沉积为主的坡下部含量较高。说明土壤侵蚀强度的空间分布对土壤微生物生物量的分布有重要影响。

分别将MBC、MBN、OM和TN与土壤侵蚀速率进行回归分析(图5),发现MBC、MBN、OM和

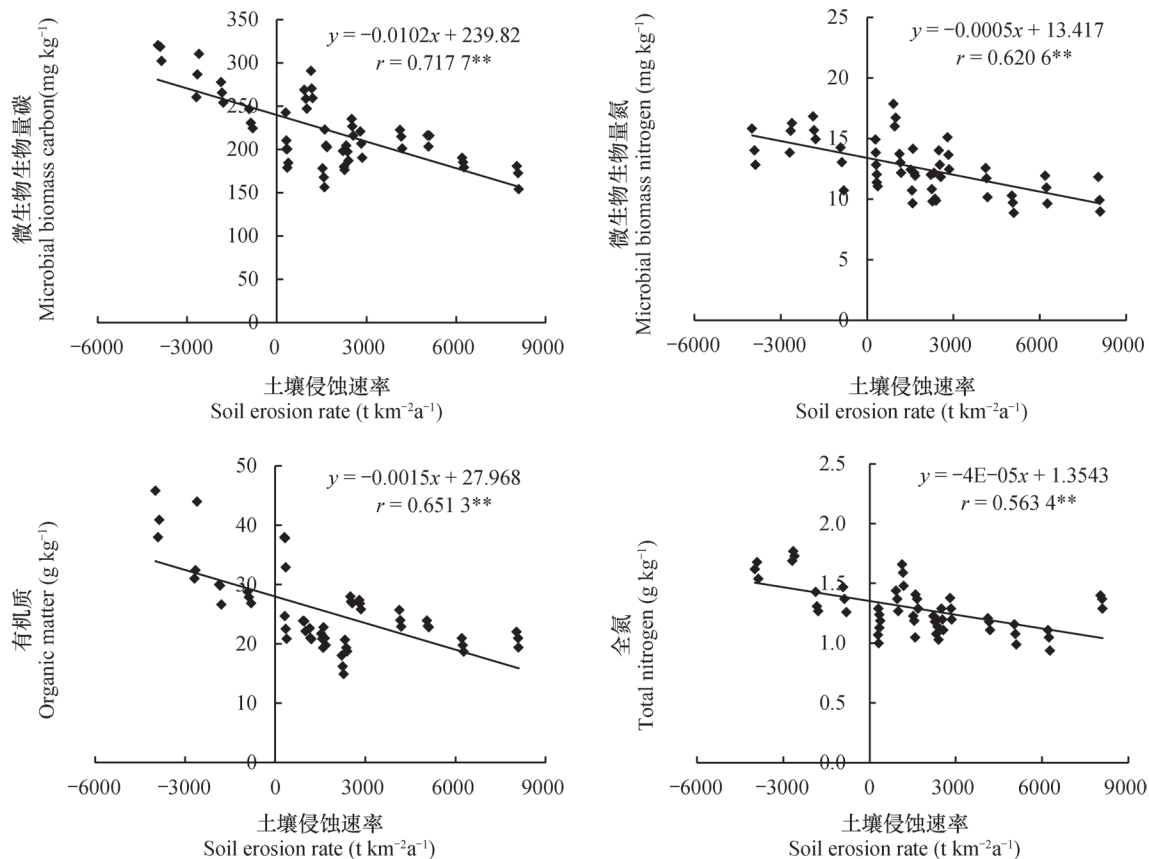


图5 土壤微生物生物量、有机质和全氮与土壤侵蚀速率的关系

Fig. 5 Relationships of soil microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen, organic matter and total nitrogen with soil erosion rate

分别将MBC和MBN与OM和TN进行回归分析(图6),发现MBC和MBN与OM之间均存在极显著的线性关系( $p < 0.01$ ),相关系数分别为0.7139和0.5520;MBC和MBN与TN之间也均存在极显著的线性关系( $p < 0.01$ ),相关系数分别为0.7444和0.6015。MBC和MBN含量随土壤养分含量的减少而减少,说明严重的土壤侵蚀通过影响土壤养分含量而影响土壤微生物生物量的含量。

### 3 讨论

#### 3.1 土壤微生物生物量分布特征

不同地区不同生态系统中,影响土壤微生物生

TN与土壤侵蚀速率之间均存在极显著的线性关系( $p < 0.01$ ),相关系数分别为0.7177、0.6206、0.6513和0.5634。MBC、MBN、OM和TN含量随土壤侵蚀强度的增大而减少。可见,土壤微生物生物量和养分含量与土壤侵蚀密切相关,坡耕地土壤侵蚀显著影响土壤微生物生物量和养分含量。

物量变化的主导环境因素存在差异,从而形成不同的土壤微生物生物量空间变化格局。本研究中MBC和MBN在流域和坡面尺度均呈现出一致的变化规律,而胡婵娟等<sup>[22]</sup>的研究中二者在黄土丘陵沟壑区坡面尺度上呈现出不一致的分布趋势。流域不同位置 and 不同坡面部位的侵蚀环境存在差异,导致土壤微生物生物量在流域和坡面尺度上呈现出相应的空间分布特征。本研究中MBC和MBN在流域尺度上的分布规律皆为下游 > 中游 > 上游,这与张孝存<sup>[23]</sup>和易祯<sup>[24]</sup>在东北黑土区的研究结果一致;MBC和MBN在坡面尺度上的分布规律皆为坡下部 > 坡上部 > 坡中部,这与张孝存<sup>[23]</sup>和易祯<sup>[24]</sup>的研究结果略有差异,但总体呈现坡下部含量较高,

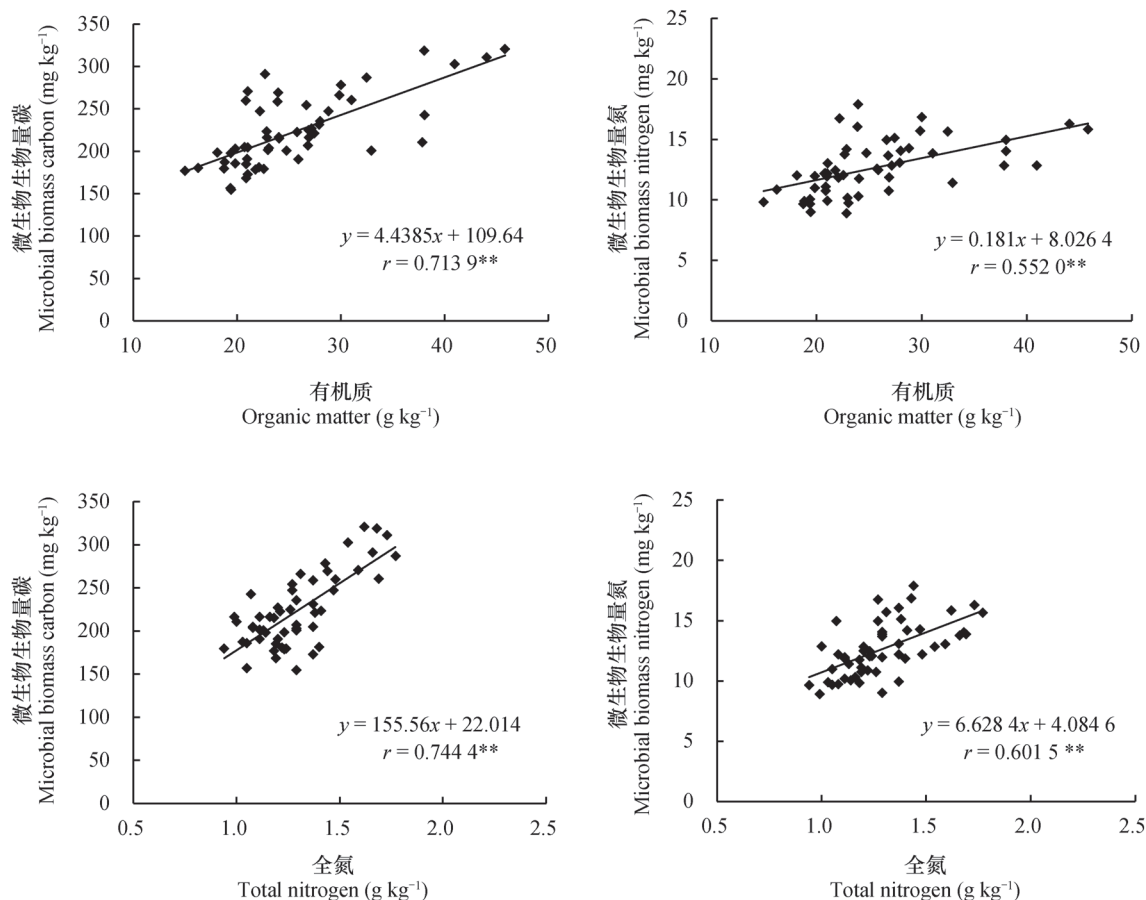


图6 土壤微生物生物量与有机质和全氮的关系

Fig. 6 Relationships of soil microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen with organic matter and total nitrogen

坡上部和坡中部含量较低的变化趋势。不同研究区坡上部和坡中部土壤微生物生物量的分布存在差异，其原因可能与坡面土壤侵蚀—沉积分布特征有关。

### 3.2 流域土壤侵蚀—沉积分布特征

本研究流域土壤侵蚀速率在流域尺度的分布特征为上游 > 中游 > 下游，在坡面尺度的分布特征为坡中部 > 坡上部 > 坡下部。这与安娟<sup>[15]</sup>和王禹等<sup>[25]</sup>利用<sup>137</sup>Cs示踪法研究东北黑土区土壤侵蚀分布特征的结论相一致，在水力侵蚀作用下，侵蚀区土壤颗粒及其吸附的<sup>137</sup>Cs随侵蚀泥沙迁移至流域下游和坡面下部，从而引起<sup>137</sup>Cs的再分布<sup>[26]</sup>，导致土壤中<sup>137</sup>Cs含量在流域侵蚀区较低，沉积区则较高。并与王彬<sup>[27]</sup>和杨维鸽<sup>[21]</sup>分别利用土壤可蚀性K值和土壤质量综合指数研究东北黑土区土壤质量的结论相符，说明流域上游土壤侵蚀严重，导致土壤质量较差，其中坡中部是土壤侵蚀发生最严重的部位，部分区域已出现“破皮黄”现象，土壤质

量最差。土壤侵蚀导致土壤质量的退化势必影响土壤养分和土壤微生物生物量的含量。因此，今后应强化侵蚀退化土壤评价研究。

### 3.3 土壤微生物生物量与侵蚀—沉积的关系

OM和TN含量随土壤侵蚀强度的增大而减少，其主要原因在于以碳、氮元素为主的OM以不同的形式存在于土壤中，细颗粒 (< 0.002 mm) 土壤中OM相对富集，土壤侵蚀导致耕地表层肥沃土壤中细颗粒物质流失，土壤养分通过径流泥沙携带发生流失，造成土壤养分含量的减少。McCarty和Ritchie<sup>[28]</sup>与Papiemik等<sup>[29]</sup>研究证实，土壤及其养分具有从侵蚀区迁移至沉积区的趋势。葛方龙等<sup>[30]</sup>研究表明，OM、TN等养分含量在不同坡位之间差异显著，且均与<sup>137</sup>Cs面积浓度存在较好的线性关系。可见，坡面水流的剥蚀、搬运和沉积过程显著地改变了土壤养分在流域和坡面的分布状况，使土壤养分产生明显的空间变异，导致沉积区土壤养分含量明显高于侵蚀区。



MBC和MBN含量随土壤侵蚀强度的增大而减少,二者的分布与土壤侵蚀—沉积的空间分布特征截然相反,具体为:土壤微生物生物量在侵蚀强度较大的流域上游和坡中部含量较低,在侵蚀强度较小的流域中游和坡上部含量居中,在以沉积为主的流域下游和坡下部含量较高。由于本研究所选农耕地的施肥水平与田间管理方式基本相同,因而,土壤微生物生物量碳和氮分布的差异主要与土壤养分在降雨侵蚀过程中的再分配有关。一方面,水力侵蚀使得侵蚀区表层土壤结构遭到破坏,表层土壤团聚体受到雨滴的击溅及降雨径流的冲刷作用而破碎,土壤细颗粒及轻质有机质等养分随径流迁移,导致侵蚀区土壤发生粗骨化过程,细颗粒的流失,使土壤持水能力和养分含量降低,土壤质量变差<sup>[31-32]</sup>;另一方面,随径流迁移至流域下游和坡下部的土壤细颗粒及有机质等养分促进了沉积区土壤团聚体的形成,使其具有较好的土壤结构与较高的持水能力,导致沉积区土壤水分和养分含量较高,土壤质量较好<sup>[32-34]</sup>。Zeller等<sup>[35]</sup>研究显示,结构良好、有机碳和水分含量较高的土壤能够为微生物活动提供优良的生境,有利于土壤微生物的生长。因此,诸如流域上游、中游、坡上部和坡中部等侵蚀区土壤养分贫瘠,不利于微生物生长和繁殖,导致土壤微生物生物量含量减少;流域下游和坡下部等沉积区土壤养分富集,良好的土壤环境促进了微生物的生长和繁殖,反过来,土壤微生物也会促进土壤养分的矿化和固持作用,改善土壤的结构和养分状况,使得沉积区土壤微生物生物量含量明显高于其他部位。此外,本研究流域坡面上部和中部均属侵蚀区,土壤受降雨侵蚀和径流侵蚀影响,以侵蚀—搬运过程为主,但是坡中部明显土壤侵蚀强度较大,侵蚀较为严重。主要原因是坡中部坡度较大,平均坡度为5.0°。研究表明,坡度越大,雨滴落地的入射角越小,雨滴分散土壤颗粒的分力相应增大,加上上方来水的汇集,径流挟沙力强,水蚀作用加强<sup>[36]</sup>。坡中部侵蚀强度最大,势必造成该部位土壤养分大量流失,土壤微生物生物量含量随之减少,从而呈现坡下部>坡上部>坡中部的变化趋势。

综上所述,土壤侵蚀对土壤养分和微生物生物量含量的分布有重要影响,土壤侵蚀—搬运—沉积过程导致了土壤养分的迁移和再分布,从而影响了侵蚀区和沉积区的土壤环境,进而影响侵蚀区和沉

积区土壤微生物生物量的分布。王超华等<sup>[8]</sup>研究了黄土丘陵区侵蚀坡面MBC的分布特征,即为沉积区(坡脚)>对照区(坡顶)>侵蚀区(坡中)。Li等<sup>[37]</sup>通过对南方红壤丘陵区的研究发现,土壤沉积有利于提高土壤微生物生物量含量,土壤侵蚀则导致土壤微生物生物量含量减少。有关东北黑土区土壤侵蚀—沉积作用下土壤微生物生物量的变化及其机制却所知甚少,因此,有必要加强这方面研究。

## 4 结 论

黑龙江省宾州河流域内,土壤侵蚀—沉积作用显著地改变了流域各位置和坡面各部位土壤微生物生物量含量的分布。流域不同位置和不同坡面部位土壤微生物生物量的分布存在明显差异,并呈现出与土壤侵蚀—沉积空间分布相反的变化趋势。土壤微生物生物量含量与土壤养分含量呈极显著正相关关系,且二者皆与土壤侵蚀速率呈极显著负相关关系。土壤侵蚀—沉积导致了土壤养分的迁移和再分布,继而影响土壤微生物生物量的分布,其对土壤微生物生物量碳和氮的具体影响机理有待进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] Fang H J, Yang X M, Zhang X P, et al. Using <sup>137</sup>Cs tracer technique to evaluate erosion and deposition of black soil in Northeast China. *Pedosphere*, 2006, 16 (2): 201—209
- [2] 范昊明,蔡强国,王红闪.中国东北黑土区土壤侵蚀环境.水土保持学报,2004,18(2):66—70  
Fan H M, Cai Q G, Wang H S. Condition of soil erosion in phaeozem region of Northeast China (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18 (2): 66—70
- [3] 水利部,中国科学院,中国工程院.中国水土流失与生态安全:东北黑土卷.北京:科学出版社,2010:77,148  
Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Engineering. *Chinese soil erosion and ecological security: Northeast black soil volume (In Chinese)*. Beijing: Science Press, 2010: 77, 148
- [4] 崔明,蔡强国,范昊明.东北黑土区土壤侵蚀研究进展.水土保持研究,2007,14(5):29—34

- Cui M, Cai Q G, Fan H M. Research progress on the soil erosion in black soil region of Northeast China (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14 (5): 29—34
- [ 5 ] Harris J A, Birch P. Soil microbial activity in opencast coal mine restoration. *Soil Use and Management*, 1989, 5 (4): 155—160
- [ 6 ] Zhao X, Wang Q, Kakubari Y. Stand-scale spatial patterns of soil microbial biomass in natural cold-temperate beech forests along an elevation gradient. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41 (7): 1466—1474
- [ 7 ] Pankhurst C E, Lynch J M. The role of soil microbiology in sustainable intensive agriculture. *Advances in Plant Pathology*, 1995, 11: 229—247
- [ 8 ] 王超华, 许明祥, 冉宜凡, 等. 黄土丘陵区不同有机碳水平侵蚀坡面土壤微生物量碳的分布特征. *环境科学学报*, 2015, 35 (10): 3284—3291  
Wang C H, Xu M X, Ran Y F, et al. Distribution of soil microbial biomass on eroded sloping land with different organic carbon contents in the hilly Loess Plateau region (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35 (10): 3284—3291
- [ 9 ] Yang W G, Han Y, Zheng F L, et al. Investigating spatial distribution of soil quality index and its impacts on corn yield in a cultivated catchment of the Chinese Mollisol Region. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, 88: 317—327
- [ 10 ] Lu J, Zheng F L, Li G F, et al. The effects of raindrop impact and runoff detachment on hillslope soil erosion and soil aggregate loss in the Mollisol region of Northeast China. *Soil & Tillage Research*, 2016, 161: 79—85
- [ 11 ] Hu C J, Fu B J, Liu G H, et al. Vegetation patterns influence on soil microbial biomass and functional diversity in a hilly area of the Loess Plateau, China. *Journal of Soils & Sediments*, 2010, 10: 1082—1091
- [ 12 ] 胡婵娟, 刘国华, 郭雷, 等. 土壤侵蚀对土壤理化性质及土壤微生物的影响. *干旱区研究*, 2014, 31 (4): 702—708  
Hu C J, Liu G H, Guo L, et al. Effects of soil erosion on soil physicochemical properties and soil microorganisms (In Chinese). *Arid Zone Research*, 2014, 31 (4): 702—708
- [ 13 ] 王彬, 郑粉莉, 王玉玺. 东北典型薄层黑土区土壤可蚀性模型适用性分析. *农业工程学报*, 2012, 28 (6): 126—131  
Wang B, Zheng F L, Wang Y X. Adaptability analysis on soil erodibility models in typical thin layer black soil area of Northeast China (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 (6): 126—131
- [ 14 ] Zhang Y G, Wu Y Q, Liu, B Y, et al. Characteristics and factors controlling the development of ephemeral gullies in cultivated catchments of black soil region Northeast China. *Soil & Tillage Research*, 2007, 96: 28—41
- [ 15 ] 安娟. 东北黑土区土壤侵蚀过程机理和土壤养分迁移研究. 陕西杨凌: 中国科学院水利部水土保持研究所, 2012  
An J. Processes and mechanisms of soil erosion and nutrient transportation in the black soil region of Northeast China (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 2012
- [ 16 ] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社, 2006  
Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, et al. Soil microbial biomass—Methods and application (In Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2006
- [ 17 ] 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. *Soil Biology & Biochemistry*, 1985, 17 (6): 837—842
- [ 18 ] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000  
Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [ 19 ] 李勇, 耿肖臣. 样品厚度对实验室无源效率刻度技术测定<sup>137</sup>Cs和<sup>210</sup>Pb的影响. *原子能科学技术*, 2010, 44 (1): 80—83  
Li Y, Geng X C. Effect of sample thickness on determination of <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pb using LabSOCS (In Chinese). *Atomic Energy Science and Technology*, 2010, 44 (1): 80—83
- [ 20 ] 张信宝, 文安邦. 黄土崩坡农地侵蚀与坡长的关系. *中国水土保持*, 1998 (1): 17—25  
Zhang X B, Wen A B. Relation between erosion of slope farmland of loess mound and slope length (In Chinese). *Soil and Water Conservation in China*, 1998 (1): 17—25
- [ 21 ] 杨维鸽. 典型黑土区土壤侵蚀对土壤质量和玉米产量的影响研究. 陕西杨凌: 中国科学院水利部水土保持研究所, 2016  
Yang W G. Investigating the impacts of soil erosion on soil quality and corn yield in the typical black soil

- region (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 2016
- [ 22 ] 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. 水土保持学报, 2009, 23 ( 3 ) : 148—152  
Hu C J, Fu B J, Liu G H, et al. Distribution of soil microbe on hill slope scale on the hilly area of the Loess Plateau (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23 ( 3 ) : 148—152
- [ 23 ] 张孝存. 东北典型黑土区流域侵蚀—沉积对土壤质量的影响. 西安: 陕西师范大学, 2013  
Zhang X C. Effects of soil erosion—deposition on soil quality in the typical black soil area of Northeast China (In Chinese). Xi' an: Shaanxi Normal University, 2013
- [ 24 ] 易祎. 东北黑土区典型流域农耕地土壤微生物指标的空间变化特征研究. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2013  
Yi Y. A study on the spatial distribution of soil microbial indicators at the typical watershed of black soil region (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2013
- [ 25 ] 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. 核农学报, 2010, 24 ( 1 ) : 98—103  
Wang Y, Yang M Y, Liu P L. The wavelet analysis on the soil erosion intensity in the black soil straight cultivated slope (In Chinese). Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2010, 24 ( 1 ) : 98—103
- [ 26 ] Gaspar L, Navas A, Walling D E, et al. Using  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  to assess soil redistribution on slope at different temporal scales. Catena, 2013, 102 ( 1 ) : 46—54
- [ 27 ] 王彬. 东北典型薄层黑土区土壤可蚀性关键因子分析与土壤可蚀性计算. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2009  
Wang B. Key factors and calculation of soil erodibility in the typical eroded black soil area of Northeast China (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2009
- [ 28 ] McCarty G W, Ritchie J C. Impact of soil movement on carbon sequestration in agricultural ecosystems. Environmental Pollution, 2002, 116 ( 3 ) : 423—430
- [ 29 ] Papiemik S K, Lindstrom M J, Schumacher J A, et al. Variation in soil properties and crop yield across an eroded prairie landscape. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 60 ( 6 ) : 388—395
- [ 30 ] 葛方龙, 张建辉, 苏正安, 等. 坡耕地紫色土养分空间变异对土壤侵蚀的响应. 生态学报, 2007, 27 ( 2 ) : 459—464  
Ge F L, Zhang J H, Su Z A, et al. Response of change in soil nutrients to soil erosion on a purple soil of cultivated slope land (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 ( 2 ) : 459—464
- [ 31 ] Ma W, Li Z, Ding K, et al. Effect of soil erosion on dissolved organic carbon redistribution in subtropical red soil under rainfall simulation. Geomorphology, 2014, 226: 217—225
- [ 32 ] Wang X, Cammeraat E L H, Cerli C, et al. Soil aggregation and the stabilization of organic carbon as affected by erosion and deposition. Soil Biology & Biochemistry, 2014, 72: 55—65
- [ 33 ] 肖海兵, 李忠武, 聂小东, 等. 南方红壤丘陵区土壤侵蚀—沉积作用对土壤酶活性的影响. 土壤学报, 2016, 53 ( 4 ) : 881—890  
Xiao H B, Li Z W, Nie X D, et al. Effects of soil erosion and deposition on soil enzyme activity in the hilly red soil region of southern China (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 ( 4 ) : 881—890
- [ 34 ] Khalil-Rad M, Nourbakhsh F, Jalalian A, et al. The effects of slope position on soil biological properties in an eroded toposequence. Arid Land Research and Management, 2011, 25 ( 3 ) : 308—312
- [ 35 ] Zeller V, Bardgett R D, Tappeiner U. Site and management effects on soil microbial properties of subalpine meadows: A study of land abandonment along a north—south gradient in the European Alps. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33 ( 4/5 ) : 639—649
- [ 36 ] 阎百兴, 汤洁. 黑土侵蚀速率及其对土壤质量的影响. 地理研究, 2005, 24 ( 4 ) : 499—506  
Yan B X, Tang J. Study on black soil erosion rate and the transformation of soil quality influenced by erosion (In Chinese). Geographical Research, 2005, 24 ( 4 ) : 499—506
- [ 37 ] Li Z W, Xiao H B, Tang Z H, et al. Microbial responses to erosion—induced soil physico—chemical property changes in the hilly red soil region of southern China. European Journal of Soil Biology, 2015, 71: 37—44

## Responses of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen to Erosion and Deposition in Black Soil Thin in Depth

FENG Zhizhen<sup>1</sup> ZHENG Fenli<sup>1, 2†</sup> YI Yi<sup>3</sup>

( 1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China )

( 2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China )

( 3 College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China )

**Abstract** 【Objective】 Soil erosion is a serious problem, causing soil and nutrient losses and altering physical, chemical and biological properties of the soil. Numerous reports have been published on effects of soil erosion on soil physicochemical properties. However, little has been done on quantitative analysis of how soil erosion and deposition affect soil microbial biomass in the black soil region of China. Soil microbial biomass is a sensitive indicator of changes in the environment, compared with soil organic matter. The study on impacts of soil erosion and deposition on soil microbial biomass is expected to be able to provide certain important basis for scientific evaluation of the environmental effects of soil erosion. Therefore, the study was oriented to investigate response of soil microbial biomass carbon and nitrogen to soil erosion and deposition, by analyzing soil microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen and erosion rate of the soils at different locations ( the upper stream, middle stream and downstream reaches ) in the valley and different positions ( the upper, middle, and lower slope position ) on a slope. 【Method】 The Binzhou River Valley, a typical region of black soil thin in soil layer in Northeast China, was taken as the research area. Contents of microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen in the soils of the sampling sites different in slope position and location in the valley were measured using the chloroform fumigation extraction method and erosion rates of the soils estimated using the <sup>137</sup>Cs tracer method. 【Result】 Results show significant differences exist between the soils in spatial distribution of soil microbial biomass, and negative relationships of the spatial distributions of soil microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen with that of soil erosion and deposition. On the watershed scale, soil erosion rate declined drastically from the upper stream down to the middle stream and the lower stream, while both soil microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen exhibited a reverse trend, being significantly higher in the downstream than in the upper stream and middle stream. The content of soil microbial biomass carbon was 26.9% and 17.4% lower, respectively, in the upper stream and the middle stream than in the downstream, and the content of soil microbial biomass nitrogen 22.9% and 18.1% lower. On the slope scale, soil erosion rate descended significantly from the middle slope position to the upper slope position and to the lower slope position; but both soil microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen acted reversely, too, being significantly higher at the lower slope than at the middle slope. The content of soil microbial biomass carbon was 13.8% and 20.2%, respectively, lower at the upper slope and the middle slope than at the lower slope, and the content of soil microbial biomass nitrogen 10.0% and 19.5% lower. Regression analysis shows that the contents of soil microbial biomass and nutrient decreased linearly with increasing soil erosion rate. Microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen, organic matter and total nitrogen in the soil were negatively related with soil erosion rate at an extremely significant level (  $p < 0.01$  ), respectively. 【Conclusion】 Obviously



soil erosion has some profound impacts on spatial distributions of the microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen in the soil. The removal and redistribution of soil nutrients caused by the processes of soil erosion and deposition is the main reason why spatial distribution of soil microbial biomass differ between erosion and deposition areas.

**Key words** Soil erosion and deposition; Soil erosion rate; Microbial biomass carbon; Microbial biomass nitrogen; Black soil thin in soil layer

(责任编辑: 卢 萍)