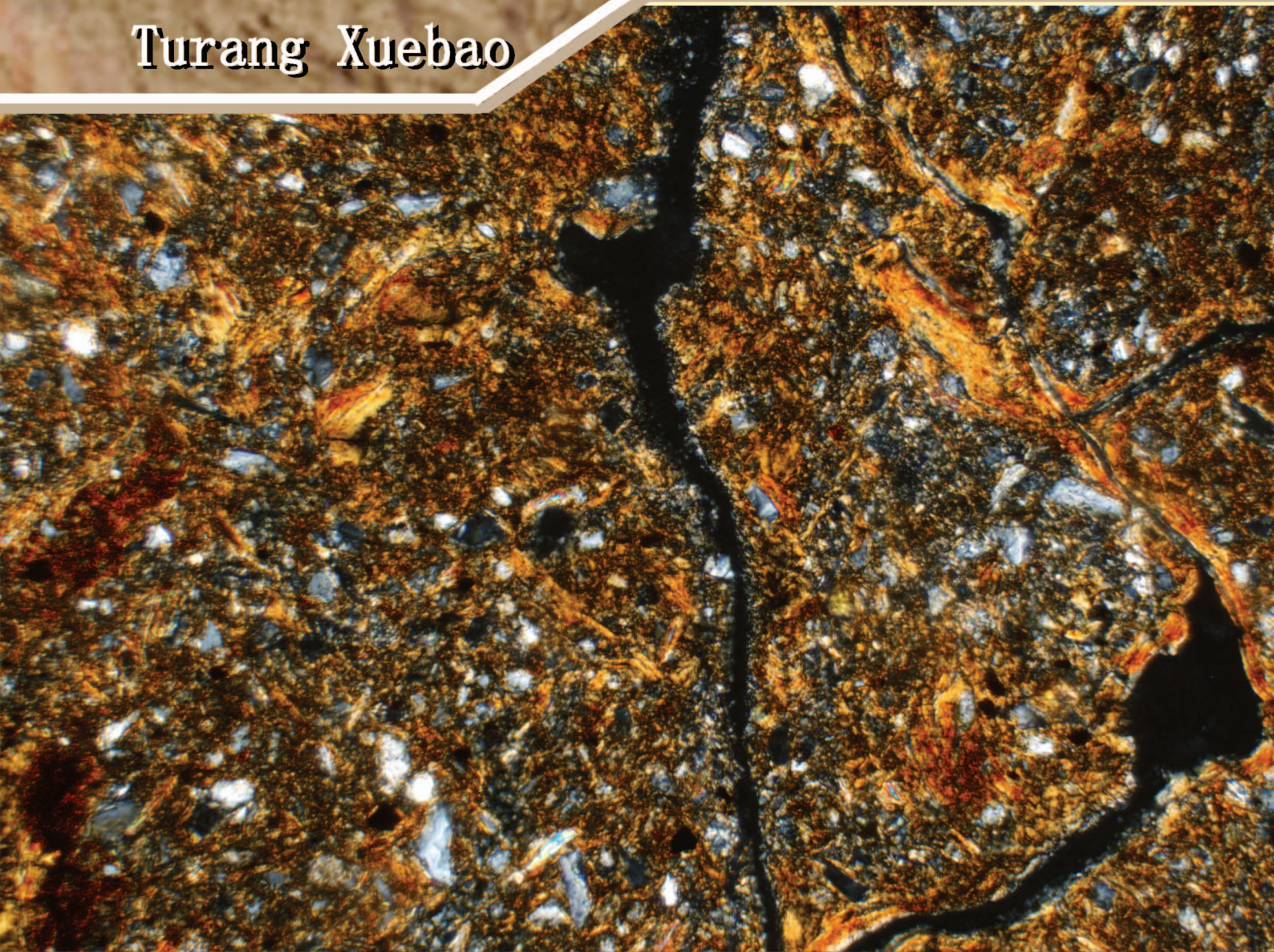


ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会 主办
科学出版社 出版

2015

第52卷 第2期

Vol.52 No.2

《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枏生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第52卷 第2期 2015年3月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 2 Mar., 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址: 南京市北京东路71号 邮政编码: 210008
电话: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史学正
主 管 中国科学院
主 办 中国土壤学会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街16号 邮政编码: 100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总 发 行 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街16号 邮政编码: 100717
电话: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址: 北京399信箱 邮政编码: 100044

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929



9 770564 392156

DOI: 10. 11766/trxb201403100099

水力侵蚀影响下土壤有机碳和微生物数量动态变化特征*

喻 为^{1,2} 李忠武^{1,2†} 黄金权^{1,2} 聂小东^{1,2} 黄 斌^{1,2} 胡延彪^{1,2} 张 雪³

(1 湖南大学环境科学与工程学院,长沙 410082)

(2 环境生物与控制教育部重点实验室(湖南大学),长沙 410082)

(3 信息产业电子第十一设计研究院科技工程股份有限公司,成都 610021)

摘 要 土壤侵蚀是土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)动态过程的重要驱动因素,明确土壤侵蚀如何影响土壤微生物进而作用于 SOC,有助于准确把握土壤侵蚀在全球碳循环中的作用。通过野外径流小区模拟降雨试验,结合定量聚合酶链式反应(quantitative Polymerase Chain Reaction, qPCR)技术,研究了水力侵蚀后短期内(10 d)坡耕地表层土壤微生物数量和 SOC 含量动态变化特征,并在此基础上探讨了微生物与 SOC 间的关系。结果表明:与雨前相比,降雨侵蚀后表层土壤 SOC 含量没有显著差异,而表层土壤细菌数量显著降低,为雨前细菌数量的 58.76% (坡上)、55.22% (坡中)、55.82% (坡下);降雨侵蚀同样显著改变了表层土壤真菌数量,雨后真菌数量为雨前真菌数量的 105.51% (坡上)、2.29% (坡中)、12.20% (坡下);降雨侵蚀后, SOC、细菌和真菌数量均在短时间内显著增加,达到峰值后下降;相关性分析表明,细菌和真菌数量与 SOC 之间的关系均未表现出显著正相关关系,仅有坡下细菌,坡中、坡下以及整个坡面真菌与 SOC 含量表现出显著正相关关系。

关键词 土壤侵蚀;土壤有机碳;细菌数量;真菌数量

中图分类号 S15 **文献标识码** A

早在 20 世纪 70 年代,国外学者^[1]在进行全球碳收支平衡估算研究时发现,全球碳循环体系中存在严重的碳“失汇”问题。国内相关学者^[2]也发现,现代碳循环处于不平衡的状态,即已知的碳汇不能平衡已知的碳源,存在一个很大的未知汇。1998 年,美国泥沙学家 Stallard^[3]指出:土壤侵蚀在长期存在的“碳失汇”问题中扮演中极为重要的角色。至此土壤侵蚀引入到全球碳循环研究上来。然而,长期以来的相关研究并没有最终有效地诠释土壤侵蚀在全球碳循环中角色定性问题^[4-5]。

土壤侵蚀是指在水力、风力、冻融或重力等外力作用下,包含土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)的土壤颗粒在地表发生破坏、剥蚀、搬运和沉积的过程。它是一个由物理、化学以及生物的多重机制相互作用形成的复杂动态过程^[6],是陆地生态系统中普遍存在的自然地质现象^[7],能够显著改变

全球碳循环^[8]。土壤侵蚀引发的土壤颗粒在地表的迁移和沉积,造成土壤微生物在不同侵蚀部位分布格局不同,进而影响碳封存和矿化。据统计,在全球陆地生态系统中,每年有 27~45 Pg 或更多的碳由于矿化作用而进入大气,占陆地生态系统向大气返还量的一半以上^[9]。

在土壤侵蚀的碳源、碳汇角色问题缺少可靠的理论机制而未能得以明确诠释的背景下,对侵蚀后土壤中有机碳动态和微生物矿化作用的研究,有助于明确土壤侵蚀在全球碳循环中扮演的角色。然而,已有研究^[10-11]大部分集中在侵蚀对碳随泥沙再分布的直接影响以及微生物对碳矿化影响上,鲜有研究将土壤侵蚀-微生物结合起来考察侵蚀对土壤碳动态的影响,而这将成为深入探索侵蚀影响下土壤碳循环过程中一系列不确定性问题的有效途径之一。

* 国家自然科学基金项目(41271294)、中国科学院地理科学与资源研究所自主创新项目(201003010)资助

† 通讯作者, E-mail: lizw@hnu.edu.cn

作者简介:喻 为(1990—),男,湖南长沙人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与碳循环关系研究。E-mail: S12031047@hnu.edu.cn

收稿日期: 2014-03-10; 收到修改稿日期: 2014-07-04

本研究从侵蚀在土壤碳循环体系中扮演角色的不确定性这一核心科学问题出发,以中国南方红壤丘陵区典型坡地为研究对象,采用模拟降雨试验,结合现代生物技术,探讨降雨侵蚀条件下细菌、真菌和 SOC 短期动态变化特征和降雨后微生物与 SOC 之间的相互作用机制,为揭示土壤侵蚀在碳循环过程中的作用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在中国水土保持监测试验站邵阳分站进行,该站位于湖南省邵阳市双清区,地理坐标为北纬 27°03',东经 111°22' (图 1)。该区域属于亚热带湿润季风气候区,夏季雨量充沛且雷阵雨天气频发,年平均降水量 1 218 ~ 1 473 mm,多年平均气温为 17.1 ℃;主要地貌类型为丘陵、岗地。该区土壤以第四纪红色黏土发育而成的地带性红壤、黄壤及第四纪松散堆积物为主,为典型的红壤丘陵区。

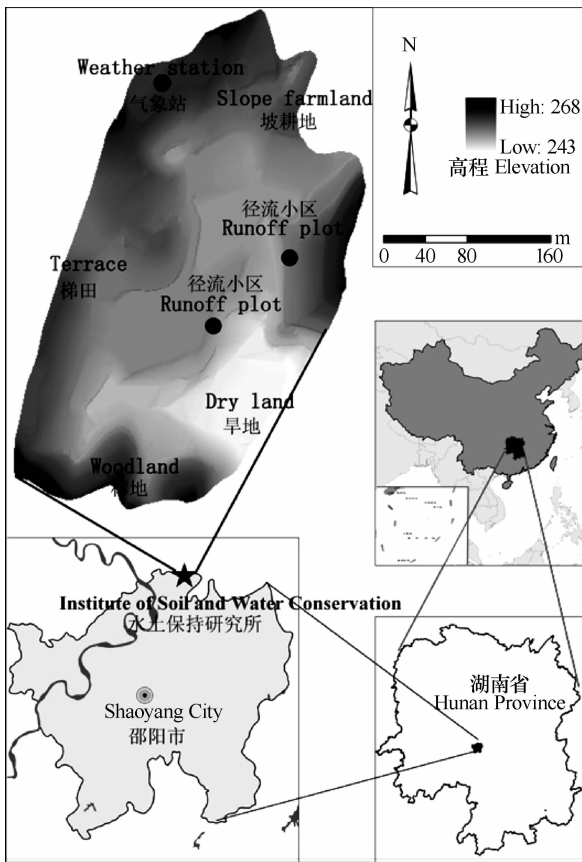
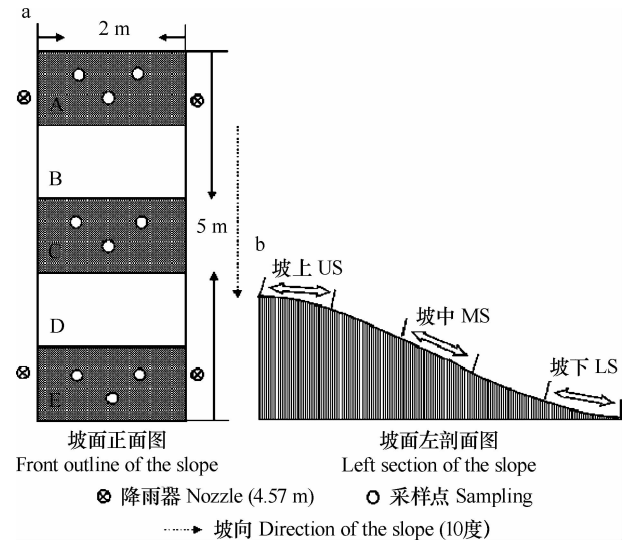


图 1 研究区域位置

Fig. 1 Location of the study area

1.2 模拟降雨试验设计

选取一块面积较大的坡耕地作为本研究的典型地块,该地块在模拟降雨试验前进行长期撂荒。在选定地块上沿坡面最大坡降方向设置一个长 5 m、宽 2 m、平均坡度为 10° 的径流小区(图 2)。小区坡度与该区域平均坡度(10° ~ 15°)相符。小区边界用铁皮围合,铁皮插入地面约 10 cm。人工模拟降雨器^[12]采用 Spraco 喷头(美国 Spraco 公司),其离地高度为 4.57 m,降雨均匀性系数为 0.897,模拟降雨装置的布设如图 2a 所示。综合考虑研究区域近 5 年来降雨雨强变化状况后,确定降雨强度为 1.5 ~ 1.7 mm min⁻¹。正式降雨前移除土壤表面的覆盖物(植物残体、凋落物等),并用水均匀喷洒径流小区用以润湿干燥的土壤,最大程度减缓突发性降雨事件导致干燥土壤中微生物的大量死亡。2011 年 7 月 16 日早上 8 点开始降雨,降雨时长为 1h。试验用水均为深层地下水,可视为对试验无影响的无菌水。



注:US:坡上;MS:坡中;LS:坡下。下同 Note: US:Up slope, MS: Middle slope, LS:Lower slope. The same below

图 2 模拟降雨实验设计

Fig. 2 Designing of the rainfall simulation experiment

1.3 样品采集

将小区自上而下平均分成 A、B、C、D、E 5 个带面(图 2a),A、C 和 E 三个带面分别对应图 2b 中坡上、坡中和坡下三个坡位。考虑到试验效果的显著性,仅在 A、C 和 E 三个带面采样。每个采样带设置三个采样点,并按倒“品”字形布设(图 2a)。模拟降雨前,在三个采样点分别采用小孔土钻采取表层 0 ~ 10 cm 土壤样品测定其基本理化性质(表 1)。

降雨前的采样结束后立即用采样点附近的土壤进行填补,尽量减少其对降雨实验的干扰。模拟降雨停止后立即采样,采样方法与雨前一致。降雨结束 35 h 后第二次采样,随后每隔 24 h 采样一次,在降

雨后 10 d 内进行连续 9 次采样。雨前采集的 9 个和雨后的 81 个土样密封保存于事先标记好的 PVC 样品袋中,并立即置于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境中冷冻储存,以备后续相关指标的测定。

表 1 供试土壤的主要理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of experimental soil

位置 Location	土壤有机碳 SOC (g kg^{-1})	全氮 TN (g kg^{-1})	pH	含水率 Moisture content (g g^{-1})	机械组成 Mechanical composition (%)		
					黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand
坡上 US	$8.81 \pm 0.21\text{a}$	$0.78 \pm 0.01\text{a}$	$4.88 \pm 0.01\text{a}$	$0.19 \pm 0.01\text{a}$	$31.27 \pm 0.78\text{b}$	$29.41 \pm 1.93\text{a}$	$39.32 \pm 2.63\text{a}$
坡中 MS	$5.88 \pm 0.54\text{b}$	$0.53 \pm 0.01\text{b}$	$4.95 \pm 0.02\text{a}$	$0.21 \pm 0.01\text{a}$	$35.08 \pm 0.52\text{a}$	$29.28 \pm 2.85\text{a}$	$35.64 \pm 2.78\text{c}$
坡下 LS	$4.54 \pm 0.21\text{c}$	$0.49 \pm 0.08\text{b}$	$4.90 \pm 0.01\text{a}$	$0.19 \pm 0.01\text{a}$	$37.12 \pm 0.76\text{a}$	$24.21 \pm 5.97\text{b}$	$38.67 \pm 6.11\text{b}$

注:同列不同字母表示在 $p < 0.05$ 水平上差异显著 Note: The different letters in the same column mean significant difference at $p < 0.05$ levels

1.4 样品分析

冷冻储存的所有土壤样品进行真空冷冻干燥预处理,干燥后样品经研磨后重新置于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境中冷冻储存。雨前样品用于测定土壤基本理化性质,雨后样品用于测定土壤中 SOC 含量、细菌和真菌数量。采用 Walkley-Black 重铬酸钾外加加热法^[13]测定 SOC 含量, Kjeldahl 法^[14]测定全氮含量,每个样品均重复测量三次求取平均值以减少测量误差。按照 1:2.5 (w/v) 加入灭菌超纯水,用 pH 计 (Woonsocket, RI, USA) 测定 pH。土壤机械组成采用吸管法^[15]测定。采用荧光定量 PCR 技术^[16]测定土壤中细菌和真菌的数量。

1.5 数据处理

将 SOC 含量和微生物数量这两种不同来源和尺度的数据统一到一个参考体系下,选择用多属性决策法对 SOC 含量和微生物数量进行归一化处理,具体方法如下:将所有土样的 SOC 含量与微生物数量分别进行归一化,得到单个样本归一化后的 SOC 含量与微生物数量,其计算公式如下:

$$X_i' = X_i / \sum X_i \quad (i = 1, 2, \dots, 8) \quad (1)$$

X_i 表示单个样本归一化后的 SOC 含量或者微生物数量, X_i 表示同个坡位 SOC 含量或者微生物数量, i 则表示雨后不同时间点采集土样编号。采用 Sigmaplot10 软件进行归一化微生物数量与归一化 SOC 含量之间的关系分析。对微生物数量进行 \lg_{10} 取对数后采用 Sigmaplot10 进行微生物数量和 SOC 短期动态变化制图。采用 SPSS11.5 进行数据的方差分析,所有统计分析的显著性水平检验均控制在 95% ($p < 0.05$) 以上。

2 结果与讨论

2.1 侵蚀后坡面土壤有机碳的变化特征

降雨前三个坡位 SOC 含量有明显差异,坡上 SOC 含量为 8.81 g kg^{-1} 显著大于坡中 5.88 g kg^{-1} 和坡下 4.54 g kg^{-1} 。降雨侵蚀后坡上、坡中和坡下 SOC 初始值与降雨前相比虽然不具有统计学上显著性差异但依然有较大不同,降雨后坡上和坡中 SOC 含量大于雨前,坡下 SOC 含量则小于雨前。从图 3 可以看出,降雨后三个坡位 SOC 在短时间内有一个上升的趋势,这种趋势在坡上和坡下表现尤为明显。在雨后 155 h 内,各带 SOC 均呈现波动增长,坡上和坡下在 131 h 达到最大,并均显著大于初始值,坡中在 155 h 达到最大,显著大于初始值。三个

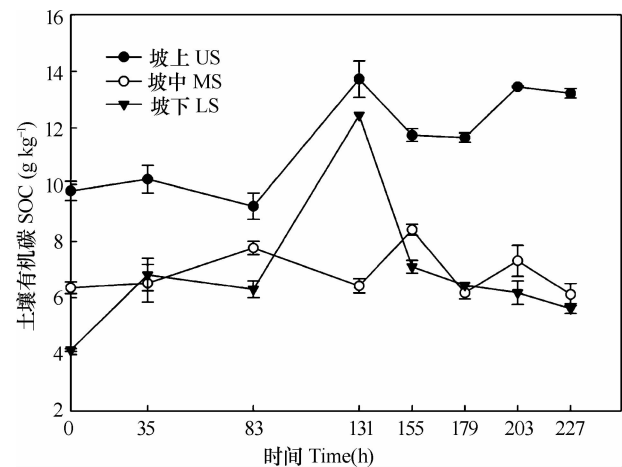


图 3 侵蚀后土壤有机碳动态变化

Fig. 3 Dynamics of soil organic carbon after rainfall erosion

坡位 SOC 达到最大后开始减少,坡上部位小幅度下降后又回升,在 227 h 坡上 SOC 含量与最大值没有显著差异($p > 0.05$),显著大于初始值;坡中 SOC 含量在 179 h 后与初始值没有显著差异,显著小于最大值;坡下 SOC 含量在 131 h 达到最大值后显著下降,155 h 后 SOC 含量显著小于最大值,并在 227 h 开始与初始值没有显著差异。

土壤在水力侵蚀作用下,从土壤颗粒分离到最后在低洼部位沉积经历了土壤颗粒的分离、团聚体破坏、泥沙的迁移和再分布及在低洼地沉积等过程,在此过程中,SOC 随径流发生选择性迁移。已有研究^[7]表明,水力侵蚀条件下,侵蚀区 SOC 随着径流和泥沙流失 SOC 含量降低,伴随部分 SOC 在沉积区沉积下来使得沉积区 SOC 含量增高。本研究中得出的结论却有所不同,雨后坡上和坡中部位表层 SOC 含量大于雨前,坡下小于雨前。造成此种结果的原因可能为:坡上表层土在降雨侵蚀作用下和 SOC 含量较高(10.86 g kg^{-1})的次表层土发生混合,坡中部位则有部分富含 SOC 的土壤颗粒沉积,导致降雨侵蚀后坡上和坡中部位 SOC 含量增加。在坡下部位,雨后表层 SOC 含量降低,可能与坡下部位过水量大,土壤有机碳在水力侵蚀下进行选择性迁移^[17],富含 SOC 的土壤细颗粒物优先迁移,导致坡下部位 SOC 流失较多,同时表层 SOC 向底层土壤垂向渗滤,这一作用将显著降低表层土壤有机碳含量^[18]。

降雨后径流小区表层 SOC 处于一种不稳定的状态,在短期内(131 h)坡面不同位置 SOC 含量均存在不同程度的增长。Lal 等^[19]认为土壤 SOC 的增长来自于土壤表面动植物残留物和土壤内部根系生物的腐殖化。长期以来土壤中植物残体一直被认为是土壤有机碳的主要来源,土壤生物尤其是土壤微生物量及其代谢产物等对有机碳积累的贡献在一定程度上被忽视^[20]。降雨侵蚀后,土壤理化性质较为稳定,在水分含量充沛和温度适宜的条件下,微生物快速同化土壤中动植物残体,经过一系列生物作用转变成 SOC。微生物在进行同化作用的同时,会在细胞表面分泌黏性物质吸附 SOC 颗粒,大量不易分解的菌丝成为土壤的组成成分^[21],有助于 SOC 的累积。131 h 后坡面不同位置 SOC 含量随时间的推移而逐渐降低,其中坡上部位 SOC 降低幅度不明显。未扰动土壤中 SOC 的分解矿化主要是它的降解,包括物理、化学和生物降解,其中主要是生物降解^[22],在 131 h 后,微生物的异化作用,快

速将有机物分解成无机物归还到无机环境并释放能量,致使表层 SOC 含量减少。土壤侵蚀对 SOC 的影响极为复杂,加上研究时段较短,对侵蚀后碳短期和长期的动态变化特征及相应的微观机制,尚需进一步研究探索。

2.2 侵蚀后坡面细菌和真菌数量变化特征

雨后细菌初始值与雨前相比显著降低,雨后细菌数量为雨前的 58.76% (坡上)、55.22% (坡中)、55.82% (坡下);雨后真菌数量为雨前的 105.51% (坡上)、2.29% (坡中)和 12.20% (坡下),雨后坡中和坡下真菌数量与雨前相比显著降低。从图 4 可以看出,在降雨侵蚀后短期内细菌和真菌随时间总体上均呈现出先增后减的趋势,不同坡位细菌和真菌增减的幅度却有所不同。三个坡位细菌数量均在 131 h 达到最大值,显著大于初始值,为初始值的 12.55 倍(坡上)、14.38 倍(坡中)、46.53 倍(坡下)。坡上和坡下真菌在 131 h 达到最大值,坡中在 155 h 达到最大值,显著大于初始值,为初始值的 2.07 倍(坡上)、61.22 倍(坡中)、16.32 倍(坡下)。细菌在 131 ~ 179 h 之间极显著下降,在 179 ~ 227 h 之间三个坡位细菌数量波动较大。真菌在 131 ~ 155 h 间数量没有显著变化,在 155 ~ 179 h 急剧下降,179 h 后波动较平稳。

降雨侵蚀显著改变了细菌和真菌在坡上、坡中和坡下表层土壤中的分布。土壤团聚体是土壤微生物富集与生存的重要场所^[23],降雨过程中径流和泥沙迁移作用使得大量贮存于土壤表层团聚体的微生物发生迁移流失^[24]。同时,土壤微生物对土壤环境因子的变化极为敏感,土壤的微小变动均会造成其巨大的变化^[25]。尽管雨前对土壤进行了润湿,然而突发的降雨极大的改变了微生物的生存环境,仍有部分微生物不能适应降雨产生的渗透压的急剧变化而死亡^[26]。这可能是导致降雨前后微生物数量巨大差异的原因。Franzluebbers 等^[27]和 Fierer 等^[28]的研究表明,干燥-湿润过程均会引起微生物生物量的增加,这种增长趋势会在短时间内结束。本研究中,降雨后细菌和真菌数量短时间内呈现上升的趋势,不同部位细菌和坡上、坡下真菌数量均在 131 h 达到最大值,坡中真菌数量在 155 h 达到最大值,这与上述文献结果是一致的。模拟降雨显著地改变了三个坡位土壤含水率,雨后较雨前坡上、坡中、坡下分别增加了 107.8%、65.0%、53.8%。含水率是影响微生物活性的重要因素,在适宜的水分条件下微生物活性较强^[29]。降雨侵蚀破坏保护 SOC

稳定的土壤团聚体,使得这部分碳被释放以供微生物在自然条件下利用。绝大多数土壤微生物处于休眠状态^[30],突发性降雨使得部分微生物从休眠中“醒来”恢复活性。这些由降雨侵蚀引发的变化均为微生物的迅速增长提供了极为有利的条件。土壤可溶性有机碳作为易被微生物快速吸收利用的有机碳组分^[31],它的生物有效性比较高^[32],并与 SOC 呈显著正相关^[33]。在降雨后短时间内土壤 SOC 含量增加,休眠中“醒来”和原本活跃的细菌和真菌在水分充沛、活性碳源丰富和温度适宜的条件下,适应土壤环境后在短期内迅速增加。微生物数量在 131 h 后(坡中真菌在 155 h 后),随着时间的推移而逐渐降低。降雨试验在夏天进行,土壤中水分蒸发作用强烈,表层土壤含水率迅速降低。不同

坡位的表层土壤中有有机碳含量在 131 h 后也存在不同程度的降低。微生物数量在降雨后急剧增长,随着时间的推移微生物种间和种内竞争极为激烈。基于以上几点原因,微生物数量增长到峰值后便开始降低。真菌在 179 h 后基本达到稳定的状态,而细菌在观测时段末期至结束均未表现出这种稳定的状态,表明不同种类微生物适应能力不同,真菌具有更强的适应和恢复稳定的能力。

上述研究表明,在中国南方红壤中,降雨侵蚀会使微生物数量和 SOC 含量在短期内有一个明显的增长,这个增长会在短时间内结束。同时,降雨侵蚀通过改变微生物丰度和活动,进而影响 SOC 在不同坡位的分解与矿化。

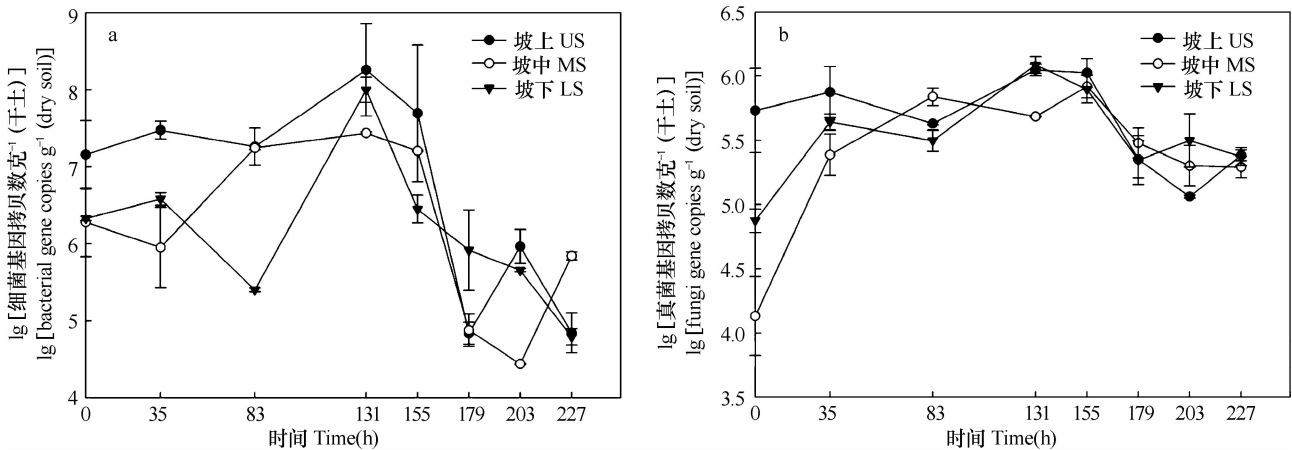


图 4 侵蚀后微生物动态变化(a:细菌,b:真菌)

Fig. 4 Dynamics of soil microbes after rainfall erosion (a: Bacteria, b: Fungi)

2.3 侵蚀后坡面尺度微生物与 SOC 关系

降雨后不同坡位经归一化后的细菌和真菌数量与 SOC 含量未表现出较一致的正相关关系。从表 2 可以看出:坡下细菌和坡中、坡下及整个坡面的真菌与 SOC 含量表现出显著正相关关系。在同一坡位细菌和真菌与 SOC 相关性不尽相同,坡上部分,细菌和真菌与 SOC 均没有显著正相关关系;坡中部位,细菌与 SOC 没有显著正相关关系,而真菌则相反;坡下部分,细菌和真菌与 SOC 均表现出显著正相关关系。在整个坡面,真菌和 SOC 表现出显著正相关,而细菌则没有。

土壤微生物是土壤中重要且活跃的部分,在陆地生态系统乃至整个生物圈的物质循环与能量流动过程中起着关键作用。微生物不仅推动着 SOC 的周转^[34],而且直接参与 SOC 的固定^[35],在它的生命周期内与 SOC 密切相关。已有植被演替与土地

利用方式下土壤微生物的变化研究表明^[36],土壤微生物数量与土壤有机碳质量分数显著正相关。李为等^[37]也监测到丫吉试验场微生物总数与有机碳之间的正相关关系。本研究中,降雨后不同坡位细菌和真菌数量与 SOC 未表现出一致的正相关关系,这与上述文献的研究结果有所不同。这些不一致的研究结果表明,降雨侵蚀通过直接和间接的方式影响细菌、真菌和 SOC,进而干扰了细菌和真菌与 SOC 的关系。造成此种研究结果的原因还可能有,在不同的土壤生态系统中,土壤微生物与 SOC 由于地上植物残留物的成分、土壤中细菌和真菌种类和群落结构、土壤的理化性质等的差异在空间上具有高度变异性。坡下经归一化后的细菌和真菌数量与 SOC 呈显著正相关,而坡上部位的细菌和真菌数量与 SOC 未表现出显著正相关关系,这可能与坡下部位高效的土壤团聚作用能够有效地保护微生物

物种多样性^[38]有关。

不同坡位侵蚀机制存在差异导致各坡位细菌、真菌和 SOC 对侵蚀作用的响应特征有所不同,同时

长期的地表过程形成了各自的土壤和微生物群落特性,导致细菌与 SOC 的关系和真菌与 SOC 的关系在不同坡位表现不同。

表 2 土壤有机碳含量与微生物数量的相关关系

Table 2 Correlation coefficient between SOC content and number of soil microbes

	细菌 Bacteria				真菌 Fungi			
	坡上	坡中	坡下	坡面	坡上	坡中	坡下	坡面
	US	MS	LS	Slope	US	MS	LS	Slope
有机碳 SOC	0.135	0.160	0.529 *	0.431	0.000 026	0.609 *	0.651 *	0.692 *

注: * 表示 $p < 0.05$ 显著相关 Note: * Significant correlation at 0.05 level

3 结 论

降雨侵蚀显著改变了红壤丘陵区表层土壤中微生物数量在坡面上的分布格局。在降雨后,不同坡位间的 SOC、细菌和真菌总体上在短时间内均有一个明显的增长趋势。降雨侵蚀对细菌和真菌与 SOC 之间的关系有极大的扰动,导致雨后不同坡位细菌和真菌与 SOC 的关系并未与其他研究^[37-41]一致,并未都呈现正相关关系。总之,土壤侵蚀不仅直接影响 SOC 在地表的迁移分布,还通过改变微生物的丰度和活动进而影响 SOC 的分解和矿化。因而,在研究碳循环中土壤侵蚀如何影响碳动态变化时,应注重土壤微生物对 SOC 的具体作用及相应微观机制的研究。

参 考 文 献

- [1] Reiners W A. A summary of the world carbon cycle and recommendations for critical research. Woodwell G W, Pecan E V. Carbon and the biosphere. AEC Symposium Series. Virginia: NTIS US Department of Commerce, 1973(30):368—382
- [2] 方精云, 郭兆迪. 寻找失去的陆地碳汇. 自然杂志, 2006, 29(1): 1—6. Fang J Y, Guo Z D. Looking for missing carbon sinks from terrestrial ecosystems (In Chinese). Nature Magazine, 2006, 29(1): 1—6
- [3] Stallard R F. Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: Coupling weathering and erosion to carbon burial. Global Biogeochemical Cycles, 1998, 12(2): 231—257
- [4] Lal R, Pimentel D. Soil erosion: A carbon sink or source? Science, 2008, 319(5866): 1040
- [5] Van Oost K, Six J, Govers G, et al. Soil erosion: A carbon sink or source? Response. Science, 2008, 319(5866): 1042—1042
- [6] 贾松伟, 贺秀斌, 陈云明. 侵蚀逆境下土壤有机碳的迁移. 生态环境, 2004, 13(1): 78—80. Jia S W, He X B, Chen Y M. Soil erosion and carbon cycling (In Chinese). Ecology and Environment, 2004, 13(1): 78—80

- [7] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget. Environment International, 2003, 29(4): 437—450
- [8] Quinton J N, Govers G, van Oost K, et al. The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling. Nature Geoscience, 2010, 3(5): 311—314
- [9] 杨钙仁, 童成立, 吴金水, 等. 陆地碳循环中的微生物分解作用及其影响因素. 土壤通报, 2005, 36(4): 605—609. Yang G R, Tong C L, Wu J S, et al. Decomposition of organic matter by soil microorganisms in terrestrial carbon cycling and its influence factors (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(4): 605—609
- [10] 方海燕, 盛美玲, 蔡强国, 等. ¹³⁷Cs 和 ²¹⁰Pb_{ex} 示踪黑土区坡耕地土壤侵蚀对有机碳的影响. 应用生态学报, 2013, 24(7): 1856—1862. Fang H Y, Sheng M L, Cai Q G, et al. Using ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb_{ex} to trace the impact of soil erosion on soil organic carbon at a slope farmland in the black soil region (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(7): 1856—1862
- [11] 吴凤至, 史志华, 岳本江, 等. 坡面侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究. 土壤学报, 2012, 49(5): 1235—1240. Wu F Z, Shi, Z H, Yue B J, et al. Particle characteristics of sediment in erosion on hill slope (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(5): 1235—1240
- [12] 张雪, 李忠武, 申卫平, 等. 红壤有机碳流失特征及其与泥沙径流流失量的定量关系. 土壤学报, 2012, 49(3): 465—473. Zhang X, Li Z W, Shen W P, et al. Characteristics of loss of organic carbon in red soil and quantitative relationships with sediment and runoff generation (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(3): 465—473
- [13] Walkley A, Black I A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science, 1934, 37(1): 29—38
- [14] Kjeldahl J. Neue methode zur bestimmung des stickstoffs in organischen körnern. Fresenius' Journal of Analytical Chemistry, 1883, 22(1): 366—382
- [15] Gee G W, Bauder J W. Particle-size analysis// Klute A. Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. Madison, Wis, USA: AMERICAN Society of Agronomy

- and Soil Science Society of America, 1986: 383—411
- [16] Huang J, Li Z W, Zeng G M, et al. Microbial responses to simulated water erosion in relation to organic carbon dynamics on a hilly cropland in subtropical China. *Ecological Engineering*, 2013, 60: 67—75
- [17] Zhang X, Li Z, Tang Z, et al. Effects of water erosion on the redistribution of soil organic carbon in the hilly red soil region of southern China. *Geomorphology*, 2013, 197: 137—144
- [18] Zhang J, Quine T A, Ni S, et al. Stocks and dynamics of SOC in relation to soil redistribution by water and tillage erosion. *Global Change Biology*, 2006, 12(10): 1834—1841
- [19] Lal R, Follett R F, Stewart B A, et al. Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security. *Soil Science*, 2007, 172(12): 943—956
- [20] Kindler R, Miltner A, Thullner M, et al. Fate of bacterial biomass derived fatty acids in soil and their contribution to soil organic matter. *Organic Geochemistry*, 2009, 40(1): 29—37
- [21] Jastrow J D, Amonette J E, Bailey V L. Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration. *Climatic Change*, 2007, 80(1/2): 5—23
- [22] 吴建国,张小全,徐德应.六盘山林区几种土地利用方式对土壤有机碳矿化影响的比较. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 530—538. Wu J G, Zhang X Q, Xu D Y. The mineralization of soil organic carbon under different land uses in the Liupan Mountain forest zone (In Chinese). *Journal of Plant Ecology*, 2004, 28(4): 530—538
- [23] Six J, Frey S D, Thiet R K, et al. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agro ecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(2): 555—569
- [24] Abu-Ashour J, Lee H. Transport of bacteria on sloping soil surfaces by runoff. *Environmental Toxicology*, 2000, 15(2): 149—153
- [25] Lopez-Sangil L, Rousk J, Wallander H, et al. Microbial growth rate measurements reveal that landuse abandonment promotes a fungal dominance of SOM decomposition in grazed Mediterranean ecosystems. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(2): 129—138
- [26] Schimel J P, Gullledge J M, Clein-Curley J S, et al. Moisture effects on microbial activity and community structure in decomposing birch litter in the Alaskan taiga. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31(6): 831—838
- [27] Franzluebbers A J, Haney R L, Honeycutt C W, et al. Flush of carbon dioxide following rewetting of dried soil relates to active organic pools. *Soil Science Society of American Journal*, 2000, 64(2): 613—623
- [28] Fierer N, Schimel J P. A proposed mechanism for the pulse in carbon dioxide production commonly observed following the rapid rewetting of a dry soil. *Soil Science Society of American Journal*, 2003, 67(3): 798—805
- [29] Sugihara S, Funakawa S, Shinjo H, et al. Short-term dynamics of soil organic matter and microbial biomass after simulated rainfall on tropical sandy soils. 18th World Congress of Soil Science, Philadelphia, Pennsylvania, EEUU. 2005
- [30] Steenwerth K L, Jackson L E, Calderón F J, et al. Response of microbial community composition and activity in agricultural and grassland soils after a simulated rainfall. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(12): 2249—2262
- [31] 吴金水,肖和艾.土壤微生物生物量碳的表观周转时间测定方法. *土壤学报*, 2004, 41(3): 401—407. Wu J S, Xiao H A. Measuring the gross turnover time of soil microbial biomass C under incubation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(3): 401—407
- [32] Nelson P N, Dector M C, Soulas G. Availability of organic carbon in soluble and particle-size fractions from a soil profile. *Soil Biology & Biochemistry*, 1994, 26(11): 1549—1555
- [33] 李忠佩,张桃林,陈碧云.可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系. *土壤学报*, 2004, 41(4): 544—552. Li Z P, Zhang T L, Chen B Y. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 544—552
- [34] Blagodatskaya E V, Blagodatsky S A, Anderson T H, et al. Priming effects in Chernozem induced by glucose and N in relation to microbial growth strategies. *Applied Soil Ecology*, 2007, 37(1): 95—105
- [35] DeDeyn G B, Cornelissen J H C, Bardgett R D. Plant functional traits and soil carbon sequestration in contrasting biomes. *Ecology Letters*, 2008, 11(5): 516—531
- [36] 张成娥,陈小莉,郑粉莉.子午岭林区不同环境土壤微生物生物量与肥力关系研究. *生态学报*, 1998, 18(2): 218—222. Zhang C E, Chen X L, Zheng F L. Study on relationship between soil microbial biomass and fertility in different environments of Ziwuling forest area (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(2): 218—222
- [37] 李为,余龙江,周蓬蓬,等.西南岩溶区土壤微生物生态作用的初步研究——以桂林丫吉村岩溶试验场为例. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 112—114, 132. Li W, Yu L J, Zou P P, et al. Preliminary study on soil microbial ecological effect in Karst areas of Southwest China: A case of the Yaji karst experimental site (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3): 112—114, 132
- [38] Tang X, Liu S, Liu J, et al. Effects of vegetation restoration and slope positions on soil aggregation and soil carbon accumulation on heavily eroded tropical land of Southern China. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(3): 505—513

DYNAMICS OF SOIL MICROBIAL POPULATION AND ORGANIC CARBON UNDER WATER EROSION

Yu Wei^{1,2} Li Zhongwu^{1,2†} Huang Jinquan^{1,2} Nie Xiaodong^{1,2} Huang Bin^{1,2} Hu Yanbiao^{1,2} Zhang Xue³

(1 College of Environment Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

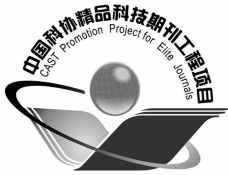
(2 Key Laboratory of environment Biology and Pollution Control, Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China)

(3 The IT Electronics Eleventh Design & Research Institute Scientific and Technological Engineering Corporation Limited, Chengdu 610021, China)

Abstract Soil erosion is an important driving factor of soil organic carbon (SOC) dynamics and plays an extremely important role in the long-standing problem of “missing of carbon sink”. Transport and deposition of soil particles on the earth’s surface triggered by soil erosion cause variation of soil microbes in distribution with the position of soil erosion, which in turn affects carbon sequestration and mineralization on the soil. Therefore, it is necessary to figure out how soil erosion affects soil microorganisms and then acts on soil organic carbon. The knowledge will help understand correctly the role of soil erosion in global carbon recycling. A field simulated rainfall experiment was conducted on a runoff plot (2m × 5m) in a red soil hilly region of South China, to study dynamic changes in SOC and number of microbes in the surface soil of the plot within a short time period (10 days) as affected by rainfall and the resultant soil erosion with the aid of quantitative Polymerase Chain Reaction (qPCR) technology. On such a basis, relationship between soil microbes and SOC was analyzed, so as to provide some fundamental theoretical basis for the exploration of the role of soil microbes in SOC dynamics as affected by soil erosion. The plot was evenly divided into five sections along the slope, namely, A, B, C, D, and E (each 1 m long). Prior to rainfall simulation, soil samples were collected separately from the soil layers (0 ~ 10 cm depth) of Sections A (Up slope, US), C (Middle slope, MS), and E (Lower slope, LS) for analysis of basic soil properties. Boreholes left by the samples were immediately filled up with soil from nearby and carefully leveled so as to minimize any possible impact of the sampling on effect of the later rainfall simulation. Soil samples were collected again in the same manner as soon as the simulated rainfall stopped. The second batch of samples were collected 35 h after the rainfall stopped, and then the third, forth……batches were at 24 h intervals within the 10 days after the simulated rainfall. The soil samples were all analyzed for basic soil properties and number of soil microbes immediately as they were collected. Results show that after the rainfall, SOC content in the surface soil layer increased in Sections US and MS, but decreased in Section in LS, as a result of rainfall erosion, however, the changes were not significant. Meanwhile, the rainfall and its resultant erosion significantly changed the distribution pattern of soil microbes. The number of soil bacteria in the surface soil layer dropped significantly down to 58.76% (US), 55.22% (MS) and 55.82% (LS) of that, respectively, before the rainfall, and the number of fungi increased to 105.51% in Section US, and fell to 2.29% in Section MS, and 12.20% in Section LS. After the rain, SOC content number of bacteria and number of fungi all significantly increased and peaked within a short time period, and then decreased, however, the peaks of the three appeared differently in time, which may be attributed to the difference between bacteria and fungi in multiplication rate and magnitude. In addition, correlation analysis shows that rainfall erosion disturbed greatly the relationships of SOC with soil bacteria and fungi, as a result, the post-rainfall relationships of SOC with soil bacteria and fungi in different sections varied from what was found in other studies and no positive correlation was found between them, except for the umber of bacteria in Section LS and the number of fungi in Sections MS and LS and the whole runoff plot, which were found positively related to SOC. In a word, soil erosion does not only directly affect SOC distribution on the earth’s surface, but also alter the abundance and activity of soil microbes and hence further influence SOC decomposition and mineralization. Therefore, more attention should be paid to the role of soil microbe in global carbon recycling as affected by soil erosion. However, this experiment was quite limited in simulation of soil erosion. More efforts should be devoted in future to studies on dynamics of soil microbes and SOC in soils under different extents of soil erosion with foci on specific role of soil microorganisms in SOC dynamics and related microscopic mechanism.

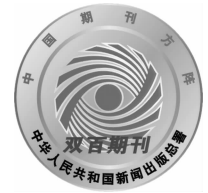
Key words Soil erosion; Soil organic carbon; Number of bacteria; Number of fungi

(责任编辑: 檀满枝)



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 2 期 2015 年 3 月

目次

综述与评论

- 理论施氮量的改进及验证——兼论确定作物氮肥推荐量的方法 巨晓棠(249)
- 森林土壤氧化亚氮排放对大气氮沉降增加的响应研究进展 方华军 程淑兰 于贵瑞等(262)

研究论文

- 商丹盆地黄土母质发育土壤的微形态特征及其诊断意义 庞奖励 黄春长 查小春等(272)
- 基于土壤氮素平衡的氮肥推荐方法——以水稻为例 宁运旺 张永春(281)
- 三峡库区紫色土的碎石分布特征 王小燕 王天魏 蔡崇法等(293)
- 黄土区坡耕地土壤结皮对入渗的影响 吴秋菊 吴佳 王林华等(303)
- 基于局部加权回归的土壤全氮含量可见-近红外光谱反演 陈颂超 冯来磊 李硕等(312)
- 五价砷在中国南方两类典型土壤中的迁移特征 李璐璐 张华 周世伟等(321)
- 柠檬酸盐对黑云母表面溶解及微结构变化的影响 李继福 张文君 鲁剑巍等(329)
- 活化过硫酸钠氧化土壤对挥发性有机污染物吸附特性的影响 丁浩然 王磊 龙涛等(336)
- 退化喀斯特森林植被自然恢复中土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值特征 黄宗胜 喻理飞 符裕红等(345)
- 缓释复合肥对茄子产量和不同采果期品质的影响 王菲 李银科 王正银等(355)
- 氮肥和秸秆施用对稻麦轮作体系下土壤剖面 N_2O 时空分布的影响 潘晓健 刘平丽 李露等(364)
- 应用 ^{15}N 示踪法研究咸水滴灌棉田氮肥去向 张文 周广威 闵伟等(372)
- 中国南方基础工程建设中土壤生态修复技术体系与实践 徐国钢 程睿 赖庆旺等(381)
- 黑土农田施加 AM 菌剂对大豆根际菌群结构的影响 宋福强 程蛟 常伟等(390)
- 自生固氮菌对土壤钾的活化作用 张亮 袁玲 黄建国(399)
- 长期保护性耕作对纤维素降解基因 *cbh 1* 多样性的影响 陈坤 李传海 朱安宁等(406)
- 模拟条件下土壤硝化作用及硝化微生物对不同水分梯度的响应 刘若萱 张丽梅 白刃等(415)
- 水力侵蚀影响下土壤有机碳和微生物数量动态变化特征 喻为 李忠武 黄金权等(423)

研究简报

- 土壤制图中土壤类型配色模型构建与应用 徐爱国 张维理 张怀志等(431)
- 土壤专题图中采样点点位标识模型的构建 张怀志 张维理 徐爱国等(440)
- 非对称混合电解质体系中恒电荷颗粒表面与 Stern 电位的测定 樊会敏 赵艳 刘新敏等(446)
- 植被重建下露天煤矿排土场边坡土壤碳储量变化 李俊超 党廷辉 薛江等(453)
- 滨海盐渍化土壤理化性质与小麦生产间的关系 谢文军 张衍鹏 张森等(461)

信息

- 第 20 届国际土壤与耕作研究组织大会 (414)
- 《土壤学报》2014 年度审稿专家名录 (467)

封面图片: 陕西丹凤盆地土壤黏化层典型微形态(由庞奖励提供)

CONTENTS

Reviews and Comments

- Improvement and validation of theoretical N rate (TNR)—Discussing the methods for N fertilizer recommendation Ju Xiaotang(261)
- Study on the responses of nitrous oxide emission to increased nitrogen deposition in forest soils; A review Fang Huajun, Cheng Shulan, Yu Guirui, et al. (270)

Research Articles

- Micromorphological features of soils derived from loess in Shangdan Basin and their significance in soil diagnosis Pang Jiangli, Huang Chunchang, Zha Xiaochun, et al. (279)
- Soil nitrogen balance based recommendation of nitrogen fertilization; A case study of rice ... Ning Yunwang, Zhang Yongchun(292)
- Spatial distribution of rock fragments in purple soil in Three Gorges Reservoir Area Wang Xiaoyan, Wang Tianwei, Cai Chongfa, et al. (301)
- Effects of soil crusts on infiltration in slope land in the Loess Area Wu Qiuju, Wu Jia, Wang Linhua, et al. (311)
- Vis-NIR spectral inversion for prediction of soil total nitrogen content in laboratory based on locally weighted regression Chen Songchao, Feng Lailei, Li Shuo, et al. (319)
- Migration of pentavalent antimony in two types of soils typical to South China Li Lulu, Zhang Hua, Zhou Shiwei, et al. (327)
- Effects of citrate dissolving surface and altering microstructure of biotite Li Jifu, Zhang Wenjun, Lu Jianwei, et al. (335)
- Effect of soil oxidation with reactivated sodium persulfate on sorption of volatile organic contaminants Ding Haoran, Wang Lei, Long Tao, et al. (343)
- Characteristics of $\delta^{13}\text{C}$ value of soil organic carbon under naturally restoring degenerative karst forest Huang Zongsheng, Yu Lifei, Fu Yuhong, et al. (353)
- Effects of slow-release compound fertilizer on yield and quality of eggplant relative to timing of harvest Wang Fei, Li Yinke, Wang Zhengyin, et al. (362)
- Spatial and temporal distributions of soil profile N_2O as affected by N fertilization and straw incorporation in the rice-wheat rotation system Pan Xiaojian, Liu Pingli, Li Lu, et al. (371)
- Fate of fertilizer N in saline water drip-irrigated cotton field using ^{15}N tracing method Zhang Wen, Zhou Guangwei, Min Wei, et al. (379)
- Soil ecology remediation technical system and its practice in infrastructure construction in South China Xu Guogang, Cheng Rui, Lai Qingwang, et al. (389)
- Impact of inoculation with AM fungi on microbial community structure in soybean rhizosphere in farmland of black soil Song Fuqiang, Cheng Jiao, Chang Wei, et al. (397)
- Mobilization of potassium in soils by *Azotobacter* Zhang Liang, Yuan Ling, Huang Jianguo(404)
- Effects of long-term conservation tillage on diversity of cellulose degradating gene *cbh I* in Fluvo-aquic soil Chen Kun, Li Chuanhai, Zhu Anning, et al. (413)
- Response of nitrification and nitrifier to change in soil moisture content under simulated conditions Liu Ruoxuan, Zhang Limei, Bai Ren, et al. (421)
- Dynamics of soil microbial population and organic carbon under water erosion Yu Wei, Li Zhongwu, Huang Jinquan, et al. (430)

Research Notes

- Construction of a color matching model for soil types and its application to soil mapping Xu Aiguo, Zhang Weili, Zhang Huaizhi, et al. (439)
- Development of soil sampling point labeing model for the matic soil maps Zhang Huaizhi, Zhang Weili, Xu Aiguo, et al. (445)
- Principle for determination of surface potential and Stern plane potential of constant charged particles in asymmetric mixed electrolyte solutions Fan Huimin, Zhao Yan, Liu Xinmin, et al. (452)
- Variability of soil organic carbon storage in dump slope of opencast coal mine under revegetation Li Junchao, Dang Tinghui, Xue Jiang, et al. (460)
- Relationships between soil physicochemical properties and wheat production in coastal saline soil Xie Wenjun, Zhang Yanpeng, Zhang Miao, et al. (466)

Cover Picture: Typical micromorphological photos in Horizon Bt of the soil profile in Danfeng Basin, Shaanxi Province, China (by Pang Jiangli)