

## 南方红壤丘陵区土壤侵蚀-沉积作用对土壤酶活性的影响\*

肖海兵<sup>1, 2</sup> 李忠武<sup>1, 2†</sup> 聂小东<sup>1, 2</sup> 马文明<sup>1, 2, 3</sup> 黄斌<sup>1, 2</sup> 陆银梅<sup>1, 2</sup>

(1 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082)

(2 湖南大学环境生物与污染控制教育部重点实验室, 长沙 410082)

(3 西南民族大学旅游与历史文化学院, 成都 610041)

**摘要** 土壤酶与土壤矿质营养元素循环、能量转移等密切相关。明确土壤酶对土壤侵蚀-沉积作用的响应机制, 有助于进一步把握土壤侵蚀在全球碳循环中的作用。通过分析湘中红壤丘陵区松林坡面侵蚀区及沉积区土壤酶活性的变化特征, 揭示了酶活性与土壤主要养分因子之间的关系, 并在此基础上深入探讨了土壤侵蚀-沉积作用对土壤酶活性的影响。结果表明: 沉积区绝大多数土层土壤有机碳 (soil organic carbon, SOC)、全氮 (total nitrogen, TN)、可溶性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC)、脲酶、酸性磷酸酶及过氧化氢酶活性均要显著高于侵蚀区。土壤沉积作用明显提高了土壤养分含量及酶活性。其次, 侵蚀区与沉积区土壤养分含量及酶活性差异在侵蚀干扰较为严重的表层 (0~30 cm) 土壤表现较为明显, 随着土壤深度的增加差异逐渐减小。侵蚀区与沉积区SOC、TN、DOC及酶活性均随土壤深度的增加呈现总体下降的趋势。相关性分析表明, 土壤脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶之间及其与SOC、TN、DOC之间均存在极显著正相关关系 ( $p < 0.01$ )。此外, 偏冗余分析结果进一步表明SOC是解释土壤酶活性动态变化的主要因子, 其解释量达7.5%, 侵蚀诱导SOC在坡面的再分布是影响土壤酶活性的重要途径之一。

**关键词** 红壤丘陵区; 土壤侵蚀; 酶活性; 土壤理化性质; 土壤碳循环

**中图分类号** S154.2 **文献标识码** A

土壤侵蚀是全球范围内较为普遍的生态环境问题, 是由物理、化学及生物等多重机制相互作用形成的复杂动态过程, 它对土壤生产力和生态环境造成严重威胁<sup>[1]</sup>。1998年, 美国学者stallard<sup>[2]</sup>指出: 土壤侵蚀在长期存在的“碳失汇”问题中扮演着重要的角色。然而, 以往相关研究并未有效地诠释土壤侵蚀在全球碳循环中的角色定性问题。近年来, 研究者开展了大量侵蚀土壤结构退化, 土壤养分再分布等方面研究<sup>[3]</sup>。例如, 刘兆云和章明奎<sup>[3]</sup>通过研究侵蚀-沉积影响地形不同部位土壤碳库的分异特征, 发现侵蚀区土壤总有机碳及各组

分碳随侵蚀坡面自上而下明显下降。喻为等<sup>[4]</sup>通过野外径流小区模拟降雨实验, 发现降雨侵蚀严重改变了红壤丘陵区表层土壤微生物数量及碳在坡面上的分布格局。然而, 已有研究大多集中在侵蚀对泥沙、碳、氮及微生物数量等再分布的直接影响, 对与土壤碳、氮和微生物均有紧密联系的酶活性在侵蚀-沉积作用下的变化机制却所知甚少<sup>[5]</sup>。

土壤酶作为土壤组分最活跃的有机成分之一, 不仅可以表征土壤物质代谢旺盛程度, 而且可以作为评价土壤肥力高低、生态环境质量优劣的一个重要生物指标<sup>[6]</sup>。土壤酶参与了土壤中各种生物化

\* 国家自然科学基金项目 (41271294) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41271294)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: lizw@hnu.edu.cn

作者简介: 肖海兵 (1991—), 男, 湖南娄底人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与碳循环关系研究。E-mail: xhb@hnu.edu.cn

收稿日期: 2015-10-27; 收到修改稿日期: 2016-01-17; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2016-03-10

学过程,与有机质矿化分解,矿质营养元素循环、能量转移等密切相关<sup>[7]</sup>。在土壤酶系统中,蔗糖酶、脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶等一直以来均是研究的重点,其中蔗糖酶、脲酶、磷酸酶活性分别表征土壤碳、氮、磷素的供应状况<sup>[8]</sup>。蔗糖酶通过催化水解蔗糖为葡萄糖与果糖来参与土壤碳素循环;脲酶通过催化脲素水解成 $\text{NH}_3\text{-N}$ 参与土壤氮素循环;磷酸酶则通过催化有机磷酸酯或磷酸酐水解,使其生成无机磷参与土壤磷素循环与转化。土壤侵蚀引发土壤颗粒在地表的迁移过程及土壤环境的改变,均将影响土壤酶活性在侵蚀坡面的分布格局,进而影响各营养元素在土壤中的循环过程<sup>[9]</sup>。进一步了解土壤酶活性对土壤侵蚀的响应机制,对于了解碳、氮等元素在土壤中的循环过程以及明确土壤侵蚀在全球碳循环中扮演的角色均具有重要作用。

红壤丘陵区是我国生态环境最脆弱的地区之一。由于长期采用不当的土地管理措施及南方特殊的气候条件,尤其是严重的季节性暴雨,使得该地区土壤侵蚀严重。本研究通过分析湘中红壤丘陵区松林坡面侵蚀区及沉积区土壤酶活性变化特征,揭示了酶活性与土壤主要理化因子之间的关系,并在此基础上深入探讨土壤侵蚀-沉积作用对土壤酶活性的影响,为揭示土壤侵蚀在全球碳循环过程中扮演的角色提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究在湖南省邵阳市水土保持科学研究所(27°03'N, 111°22'E)所在的小流域内进行。研究区气候属于典型的中亚热带季风性气候,年均温度为17.1℃,年均降水量为1 218~1 473 mm,其中降水主要集中在4—9月。由于降水量大且较为集中,该流域内水土流失现象较为严重。小流域地貌以丘陵、岗地为主,属于典型的红壤丘陵地貌。研究区域内地形平均坡度为10°~15°。海拔高度在231.2~276.6 m之间,相对高差45.4 m。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,土层较为深厚,土壤质地以砂壤、壤土为主。20世纪80年代,为了控制水土流失,实行了退耕还林措施,目前流域内植被以马尾松为主。马尾松常生长于微酸性土壤,对土壤要求

不严格,是南方红壤区的典型植被之一。

### 1.2 样品采集与处理

在流域内选择侵蚀较为明显的松林坡面作为研究对象,坡长约为40 m,呈S型(图1),坡度在12°~15°之间,坡向为东偏北27°。在长期水力侵蚀作用下,松林坡面侵蚀区(erosional site, ES)表现出土壤裸露程度高且细沟数量分布较多的特点,而沉积区(depositional site, DS)则表现为土壤相对堆积。2014年5月中旬,在流域松林坡面侵蚀区(坡顶、坡肩、坡中)及沉积区(坡脚、坡趾)各挖取3个1 m×1 m×1 m(长×宽×高)的剖面,呈品字形分布(图1)。分别采集剖面0~5、5~10、10~20、20~30、30~40、40~60、60~80、80~100 cm分层土样,每层土样采用四分法收集约1 kg土壤。采集的土样立即带回实验室,分成两份。一份在自然条件下风干,经研磨,分别过2 mm、1 mm、0.25 mm筛后,用于土壤理化性质的测定;另一份在4℃条件下冷藏,用于分析土壤可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)含量。同时采集剖面各分层土壤环刀样,采集的环刀样带回实验室后立即称重,在105℃烘箱内烘干至恒重,用于计算土壤容重与水分含量。此外,采集0~30 cm层次土壤样品,经风干、研磨、过1 mm筛后进行<sup>137</sup>Cs含量测定。

### 1.3 样品分析

风干过0.25 mm筛的土样,送湖南省农业科学院农化检测中心分析土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)和全氮(total nitrogen, TN)含量。SOC的测定采用油浴重铬酸钾外加热法<sup>[10]</sup>; TN的测定采用凯氏定氮法<sup>[11]</sup>。

风干过1 mm筛的土样,用于分析土壤脲酶、过氧化氢酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶活性及<sup>137</sup>Cs含量。脲酶采用苯酚钠一次氯酸钠比色法;过氧化氢酶采用 $\text{KMnO}_4$ 滴定法<sup>[12]</sup>;酸性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法<sup>[13]</sup>;蔗糖酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定<sup>[14]</sup>。土样<sup>137</sup>Cs含量测定采用美国PerkinElmer公司生产的GMX50型高纯锗探测器与DSPEC型数字化谱仪,该谱仪的能量分辨率为2.17 keV(<sup>60</sup>Co),峰康比为59.29:1,<sup>137</sup>Cs的检测下限为0.71 Bq kg<sup>-1</sup>,样品重复测量误差小于5%。<sup>137</sup>Cs含量采用661.6 keV的γ射线的峰面积计算,被测样品的质量为300 g左右,测量时间大于20 000 s。

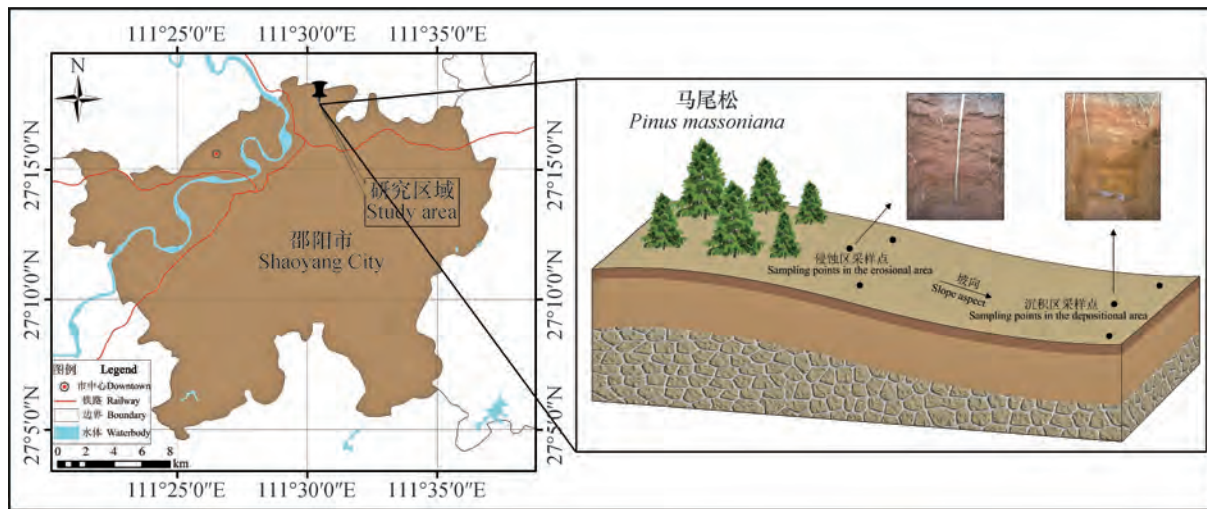


图1 松林坡面及采样点位置示意图

Fig. 1 Sketch of the slope under pine forest and sampling sites

风干过2 mm筛的土样，用于分析土壤pH和颗粒组成。pH采用电极电位法；土壤颗粒组成采用吸管法测定。土壤可溶性有机碳含量测定方法简述如下<sup>[15]</sup>：称取相当于15 g干土的冷藏土样，放入150 ml离心管中，加入60 ml 0.5 M K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液（水土比为4：1），25 °C下以250 r min<sup>-1</sup>速度震荡1 h后，在4 000 r min<sup>-1</sup>速度下离心25 min，取悬浮液过0.45 μm微孔滤膜，用TOC分析仪（TOC-VCPH，日本岛津）测定滤液中的总有机碳含量。

#### 1.4 数据处理

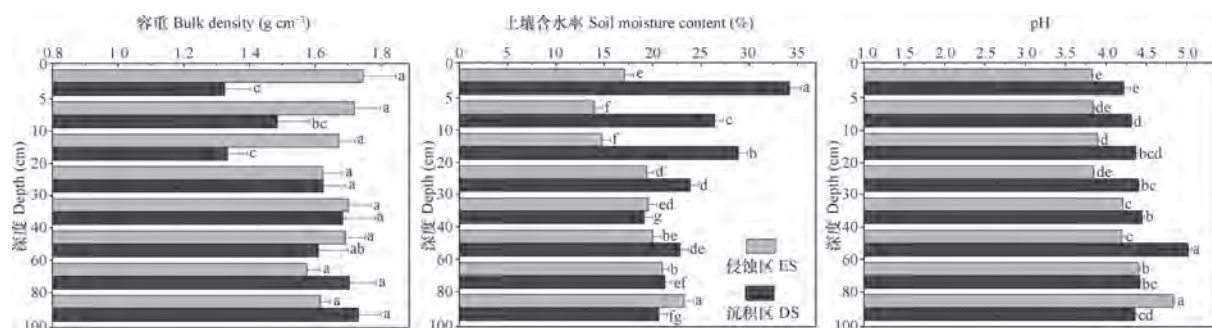
采用SPSS 19.0 软件对数据进行单因素方差分析，并对土壤酶活性及土壤主要理化因子进行Pearson相关性分析，其显著性水平均设为0.05。采用Canoco 4.5进行偏冗余分析，进一步解释单个理化因子对土壤酶活性的影响程度，并采用Origin 8.5软件进行绘图。

## 2 结果

### 2.1 侵蚀-沉积作用对土壤基本理化特征的影响

<sup>137</sup>Cs在坡面不同部位存在明显的分异特征。侵蚀区土壤<sup>137</sup>Cs含量为317 ± 87 Bq m<sup>-2</sup>，明显低于背景值1920 ± 126 Bq m<sup>-2</sup>，两者相差6.06倍；沉积区土壤<sup>137</sup>Cs含量为2619 ± 192 Bq m<sup>-2</sup>，明显高于背景值，两者相差1.36倍。侵蚀区与沉积区土壤<sup>137</sup>Cs含量变异性高达87.9%。在水力侵蚀作用下，侵蚀区土壤颗粒及其吸附的<sup>137</sup>Cs随降雨径流一同迁移至坡底，从而引起<sup>137</sup>Cs在坡面的再分布<sup>[16]</sup>。侵蚀区<sup>137</sup>Cs含量低，土壤损失严重；沉积区<sup>137</sup>Cs含量相对较高，土壤相对堆积或净堆积。

在长期水力侵蚀影响下，侵蚀区与沉积区土壤基本理化特征表现出显著差异。如图2所示，在0~60 cm土层，沉积区土壤含水率、pH要明显高



注：相同区域不同字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ ) Note: Different letters in the same site mean significant difference at 0.05 level

图2 侵蚀区与沉积区土壤基本理化特征

Fig. 2 Basic physico-chemical properties of the soils at the erosional and depositional sites



于侵蚀区；而土壤容重却明显低于侵蚀区。侵蚀区与沉积区土壤基本理化特征差异在0~30 cm土层表现尤为明显，随土壤深度的增加差异逐渐缩小。侵蚀区表层土壤含水率、pH要显著低于深层土壤，随土壤深度的增加呈上升趋势；而沉积区表层土壤含水率显著高于深层土壤，表现出与侵蚀区相反的变化规律。

严重的水力侵蚀使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裂解，土壤细颗粒及轻质有机质等随径流迁移，导致侵蚀区土壤粗颗粒含量增多，透水性增强，土壤持水能力降低<sup>[17]</sup>。降雨过后温度升高时，土壤水分易在较短的时间内散失。而随径流

迁移至坡底的土壤细颗粒和有机质却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<sup>[18]</sup>，故沉积区表层土壤水分含量要明显高于侵蚀区。对于受侵蚀影响较小的深层土壤，侵蚀区与沉积区土壤含水率并没有显著差异。其次，降雨径流对土壤颗粒的迁移再分布同样影响着土壤容重的变化。在长期水力侵蚀影响下，沉积区表层土壤黏粒含量要显著高于侵蚀区，而砂粒含量却表现出与其相反的变化规律（图3）。砂粒含量高、水分含量较低的坡上侵蚀区表层土壤容重要明显高于坡底沉积区；而对于受侵蚀影响较小的深层土壤，侵蚀区与沉积区土壤容重差异较小。

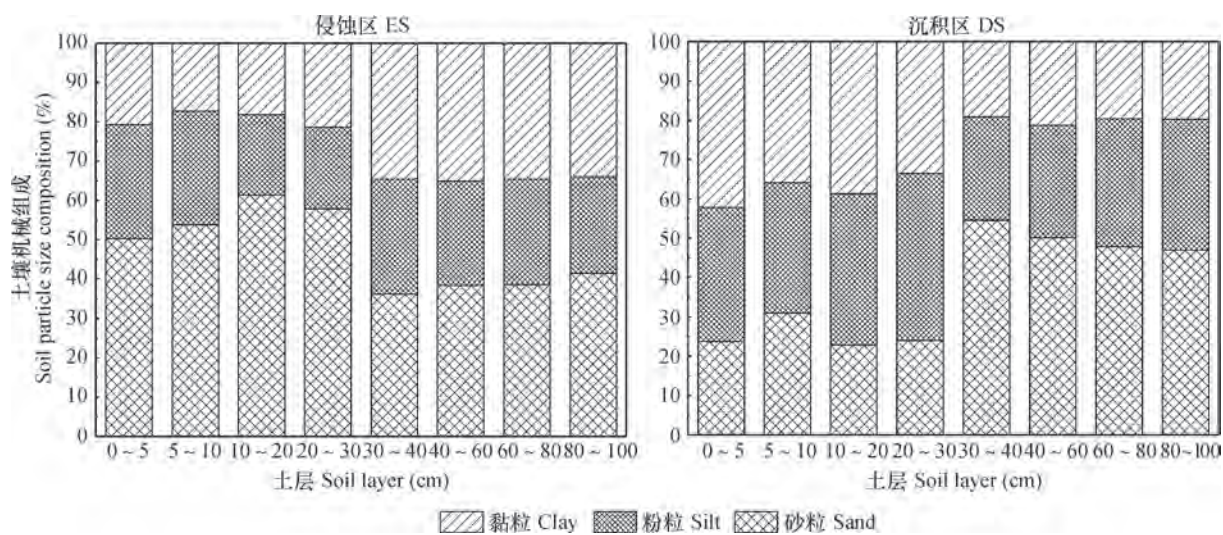


图3 侵蚀区与沉积区土壤机械组成

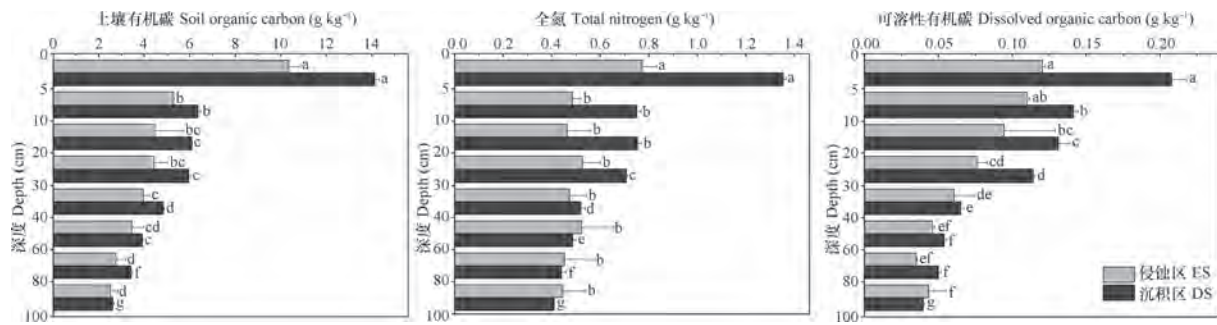
Fig. 3 Particle size compositions of the soils at the erosional and depositional sites

## 2.2 侵蚀—沉积作用对土壤养分分布的影响

土壤侵蚀显著地改变了SOC、TN、DOC等养分在长坡面各坡位的分布状态。沉积区0~40 cm表层土壤SOC、TN、DOC要明显高于侵蚀区，且其随土壤深度的增加逐渐降低（图4）。在0~30 cm土层，SOC、TN、DOC等在侵蚀区与沉积区土壤中的差异表现得尤为明显，随土壤深度的增加，差异逐渐缩小，以致在80~100 cm深层土壤，侵蚀区与沉积区各养分含量并无显著差异。这一结果与以往大多数研究存在一致性。刘兆云和章明奎<sup>[3]</sup>通过研究侵蚀—沉积影响地形不同部位土壤碳库的分异特征，证实侵蚀区土壤总有机碳及各组分碳自上而下明显下降，其中坡底堆积区碳含量最高。Ritchie等<sup>[19]</sup>通过研究水力侵蚀对坡耕地土壤有机碳分布

特征的影响，同样指出坡下堆积区土壤有机碳含量要显著高于坡上侵蚀区。

南方红壤丘陵区季节性的大暴雨，易使坡面产生较大径流。坡上土壤受到雨滴的击溅以及降雨径流的冲刷作用，易随径流一同迁移至坡下沉积区。聂小东等<sup>[20]</sup>指出泥沙态有机碳是土壤有机碳流失的主要方式，泥沙态有机碳流失量占总有机碳流失量的84%以上，最高达97.6%。故径流引起土壤迁移的同时也显著地改变了土壤养分在坡面的分布状态，使得坡下沉积区SOC、TN含量要明显高于侵蚀区。此外，土壤中各养分主要来源于动植物残体及其分泌物，而动植物主要活跃于水分、空气充足的表层土壤<sup>[21]</sup>，这使得表层土壤SOC、TN、DOC等养分含量要显著高于深层土壤，且随土壤深度增加



注：相同区域不同字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ ) Note: Different letters in the same site mean significant difference at 0.05 level

图4 侵蚀区与沉积区土壤养分含量

Fig. 4 Nutrient contents of the soils at the erosional and depositional sites

呈递减趋势。

### 2.3 侵蚀-沉积作用对土壤酶活性的影响

土壤侵蚀-沉积过程使坡面各部位酶活性产生明显差异。如图5所示，除5~40 cm土层外，沉积区各层土壤脲酶活性要明显高于侵蚀区。侵蚀区表层土壤脲酶活性明显高于深层土壤，随土壤深度

增加总体呈下降趋势。土壤酸性磷酸酶、过氧化氢酶与脲酶在坡面各部位土壤中的分布规律具有一致性，其两两之间均呈极显著正相关关系（表1）。在0~60 cm土层，沉积区酸性磷酸酶活性要显著高于侵蚀区，且侵蚀区与沉积区磷酸酶活性均随土壤深度增加而减小。除5~10 cm、20~40 cm土层，

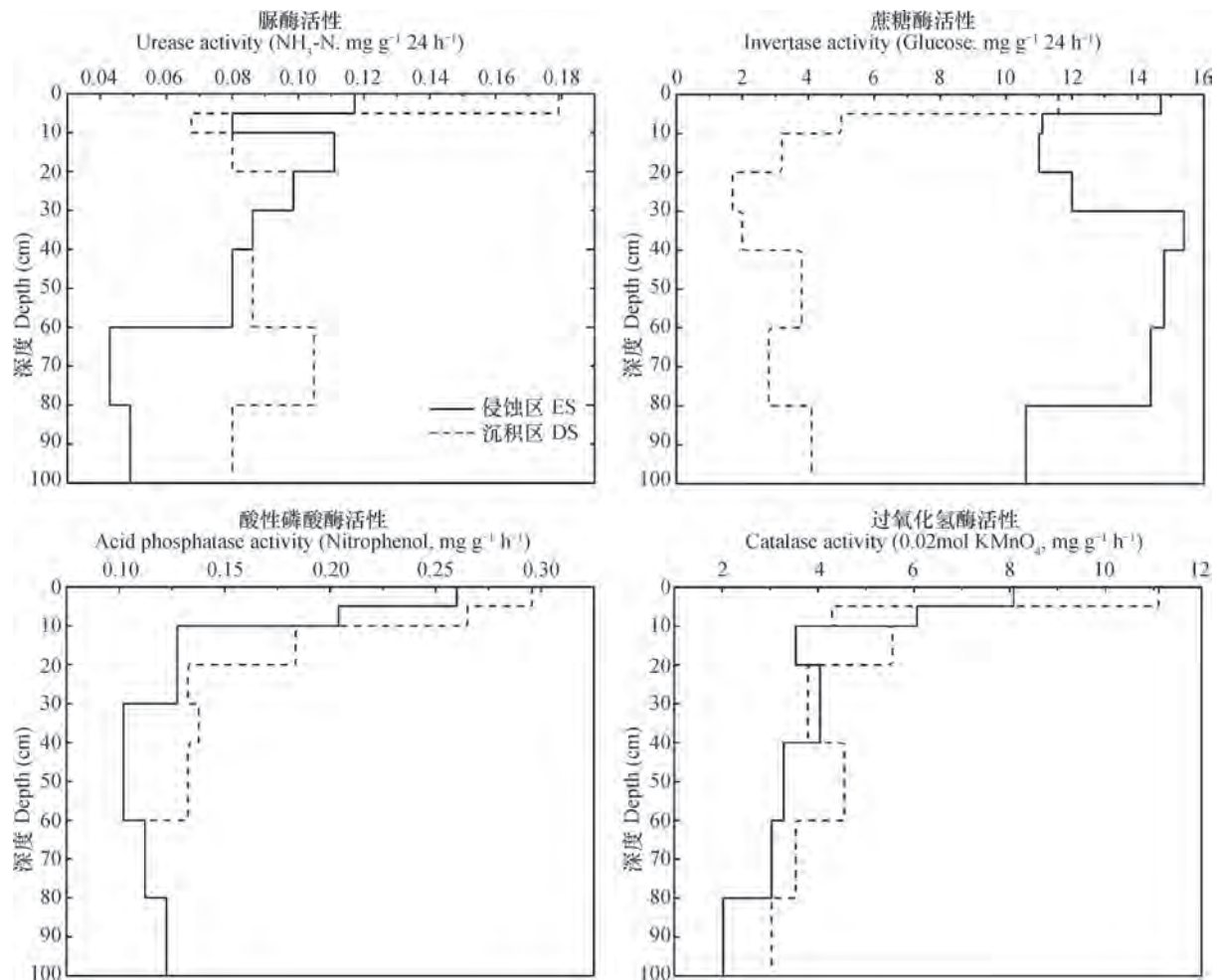


图5 侵蚀区与沉积区土壤酶活性

Fig. 5 Enzyme activities in the soils at the erosional and depositional sites

<http://pedologica.issas.ac.cn>

表1 土壤酶活性与主要理化因子之间的相关系数

**Table 1** Correlation coefficients between soil enzyme activities and physico-chemical parameters

	有机碳 SOC	全氮 TN	可溶性有机碳 DOC	碳氮比 C/N	脲酶 Urease	蔗糖酶 Sucrase	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	过氧化氢酶 Catalase
有机碳 SOC	1							
全氮 TN	0.94**	1						
可溶性有机碳 DOC	0.90**	0.90**	1					
碳氮比 C/N	0.73**	0.48	0.64**	1				
脲酶 Urease	0.80**	0.73**	0.68**	0.61*	1			
蔗糖酶 Sucrase	0.13	0.04	-0.03	0.10	0.05	1		
酸性磷酸酶 Acid phosphatase	0.81**	0.81**	0.88**	0.70**	0.51*	0.05	1	
过氧化氢酶 Catalase	0.95**	0.87**	0.83**	0.75**	0.79**	0.20	0.83**	1

注: \* 在0.05水平显著相关, \*\*在0.01水平显著相关 Note: \*Correlation is significant at the 0.05 level, \*\*Correlation is significant at the 0.01 level

沉积区其余各层土壤过氧化氢酶活性要显著高于侵蚀区, 且其随土壤深度增加同样呈下降趋势。而土壤蔗糖酶活性在侵蚀区与沉积区的分布规律却与脲酶、酸性磷酸酶及过氧化氢酶活性相反, 侵蚀区各层土壤蔗糖酶活性要显著高于沉积区。

酸性磷酸酶、过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶等酶的活性总体随土层的加深而降低, 这可能与有机质在土壤中的分布状态密切相关。表层土壤积累了较多的枯枝落叶与腐殖质, 有机质含量高, 有充分的营养源以利于土壤微生物的生长; 再加之较好的水力条件和通气状况, 使得微生物生长旺盛, 代谢活跃<sup>[22]</sup>, 从而表层土壤表现出较高的酶活性。随土壤深度的增加, 土壤有机质含量急剧下降; 加之土壤容重增大, 孔隙度减小, 使得深层土壤微生物生长代谢受到限制<sup>[6]</sup>, 故深层土壤酶活性降低。其次, 与侵蚀区相比, 绝大部分沉积区土层具有较高的酶活性(蔗糖酶除外), 这主要有三个方面的原因。首先, 长期的水力侵蚀改变了土壤养分在坡面各部位的分布模式, 使得沉积区土壤养分含量明显高于侵蚀区(图4)。沉积区土壤较高的养分含量, 不仅有利于土壤微生物的生长繁殖, 而且能诱

导微生物胞外酶的释放, 从而提高了沉积区土壤酶活性。其次, 长期的侵蚀过程使沉积区表层土壤含水率、孔隙度明显增大(图2), 这有利于沉积区表层土壤动植物及微生物的呼吸代谢, 进一步促进酶的释放<sup>[23]</sup>。最后, 土壤酶能够与土壤黏粒及腐殖质结合, 以有机无机复合物的形式存在于土壤中, 使土壤酶能长时间保持其活性<sup>[24]</sup>。绝大多数酶在土壤中均处于被吸附的状态, 所以土壤固相的表面特征决定了酶活性在土壤中的长久保持。长期的土壤侵蚀使得坡上细颗粒选择性迁移至坡底<sup>[25]</sup>, 坡下沉积区表层土壤较高的黏粒含量有利于土壤酶活性的保持。土壤蔗糖酶活性在侵蚀区与沉积区却表现出与脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶相反的变化规律, 侵蚀区土壤蔗糖酶活性明显高于沉积区。这可能与土壤pH对酶活性的影响有关<sup>[26]</sup>, 在长期水力侵蚀的作用下, 侵蚀区土壤pH明显低于沉积区(图2), 侵蚀区土壤较低的pH也许有利于保持蔗糖酶活性处于较高水平, 沉积区较高的pH反而限制了土壤蔗糖酶的活性。其次, 这可能与研究区域特殊的植被类型有关, 长期降雨径流的冲刷作用, 使得沉积区积累了较多的枯枝落叶,



而松叶中较高的树脂含量却抑制了沉积区土壤蔗糖酶的活性，使得侵蚀区蔗糖酶活性要显著高于沉积区<sup>[27]</sup>。

#### 2.4 土壤酶活性与各理化因子之间的关系

由表1可知，土壤酶活性与理化因子之间存在密切的联系。其中土壤脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶均与SOC、TN、DOC呈极显著正相关关系。这一结果与以往大多数研究具有一致性，其中叶协峰等<sup>[28]</sup>通过研究植烟土壤酶活性与土壤肥力之间的关系，发现脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶、过氧化氢酶4种酶之间以及其与土壤肥力之间均呈极显著的正相关关系。候彦会等<sup>[29]</sup>则通过对放牧草地土壤脲酶活性与土壤肥力因子之间的关系进行研究，发现土壤脲酶活性与有机质、全氮、速效氮、速效钾等均呈极显著正相关关系，而与土壤pH呈极显著负相关。这一结果表明土壤脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶活性与SOC、TN、DOC在土壤侵蚀-沉积作用下具有相似的变化规律，土壤酶活性的变化能在很大程度上指示土壤肥力的改变。然而，在本研究中土壤蔗糖酶活性与土壤养分之间并不存在明显的相关关系，这与以往研究存在一定差异。这同时也说明了在不同地区，土壤酶对土壤肥力的指示力度是不一致的，其可能与土壤类型及特定环境有很大关系。

此外，本研究选择与土壤酶活性相关性较强的SOC、TN、DOC进行偏冗余分析，分别分析了3个因子整体及单个因子对土壤酶活性动态变化的解释量。结果表明SOC、TN、DOC共解释了坡面土壤酶活性变化的39.7%，而对于单个因子来说，SOC的解释量最高，达7.5%；其次为DOC达3.2%，最后为TN，仅为0.1%。SOC、TN、DOC整体对土壤酶活性具有较高的影响程度，其中SOC对土壤酶活性的影响最为显著，是决定土壤酶活性高低的主要影响因素。土壤侵蚀对土壤酶活性的影响，可能主要通过影响SOC在坡面的分布状态来实现。

### 3 结 论

土壤侵蚀-沉积作用不仅显著地改变了坡面各部位土壤养分含量，而且使各部位土壤酶活性产生较大差异。沉积区绝大多数土层SOC、TN、DOC、脲酶、酸性磷酸酶及过氧化氢酶活性均要显著高于

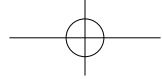
侵蚀区，土壤沉积作用显著提高了土壤养分含量及酶活性。其次，土壤酶活性与土壤主要理化因子之间的相关性分析表明，在长期水力侵蚀影响下土壤酶活性与土壤养分具有相似的变化规律，土壤酶活性的变化在很大程度上能指示土壤肥力的改变。此外，偏冗余分析进一步指出SOC是决定土壤酶活性的主要影响因素。土壤侵蚀诱导SOC在坡面的再分布是影响土壤酶活性的主要途径之一。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International*, 2003, 29 ( 4 ) : 437—450
- [ 2 ] Stallard R F. Terrestrial sedimentation and the carbon cycle: Coupling weathering and erosion to carbon burial. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, 12 ( 2 ) : 231—257
- [ 3 ] 刘兆云, 章明奎. 侵蚀-沉积连续地形中土壤碳库的空间分异. *水土保持通报*, 2009, 29 ( 3 ) : 61—65  
Liu Z Y, Zhang M K. Spatial variation of soil organic carbon pools in erosion deposition continuation landform ( In Chinese ). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29 ( 3 ) : 61—65
- [ 4 ] 喻为, 李忠武, 黄金权, 等. 水力侵蚀影响下土壤有机碳和微生物数量动态变化特征. *土壤学报*, 2015, 52 ( 2 ) : 423—430  
Yu W, Li Z W, Huang J Q, et al. Dynamics of soil microbial population and organic carbon under water erosion ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 ( 2 ) : 423—430
- [ 5 ] Mangalassery S, Mooney S, Sparkes D, et al. Impacts of zero tillage on soil enzyme activities, microbial characteristics and organic matter functional chemistry in temperate soils. *European Journal of Soil Biology*, 2015, 68: 9—17
- [ 6 ] 韩新宁. 土壤酶对土壤环境质量的作用及影响. *内蒙古农业科技*, 2008 ( 4 ) : 90—92  
Han X N. The role and effect of soil enzymes on soil environmental quality ( In Chinese ). *Inner Mongolia Agricultural Science And Technology*, 2008 ( 4 ) : 90—92
- [ 7 ] Hou S, Xin M, Wang L, et al. The effects of erosion on the microbial populations and enzyme activity in black soil of northeastern china. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 ( 6 ) : 295—301
- [ 8 ] 刘善江, 夏雪, 陈桂梅, 等. 土壤酶的研究进展. *中国农学通报*, 2011, 27 ( 21 ) : 1—7

- Liu S J, Xia X, Chen G M, et al. Study process on functions and affecting factors of soil enzymes (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27 (21): 1—7
- [ 9 ] Nie X J, Zhang J, Han G. Soil enzyme activities on eroded slopes in the Sichuan basin, China. *Pedosphere*, 2015, 25 (4): 489—500
- [ 10 ] 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
- [ 11 ] Kjeldahl J. Neue methode zur bestimmung des stickstoffs in organischen körnern. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 1883, 22 (1): 366—382
- [ 12 ] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986: 274—320  
Guan S Y. Soil enzyme and its research methods (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1986: 274—320
- [ 13 ] 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: 252—254  
Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 252—254
- [ 14 ] Tian J, McCormack L K, Wang J Y, et al. Linkages between the soil organic matter fractions and the microbial metabolic functional diversity within a broad-leaved korean pine forest. *European Journal of Soil Biology*, 2015, 66 (1): 57—64
- [ 15 ] Ma W M, Li Z W, Ding K Y, et al. Effect of soil erosion on dissolved organic carbon redistribution in subtropical red soil under rainfall simulation. *Geomorphology*, 2014, 226: 217—225
- [ 16 ] Gaspar L, Navas A, Walling D E, et al. Using  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  to assess soil redistribution on slopes at different temporal scales. *Catena*, 2013, 102 (1): 46—54
- [ 17 ] 张瑞, 苟晓敏, 赵玉珍, 等. 东北黑土区土壤侵蚀对土壤持水性的影响. *水土保持学报*, 2015, 29 (1): 62—65  
Zhang R, Gou X M, Zhao Y Z, et al. Influence of soil erosion on soil water capacity in the black soil area of northeast China (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29 (1): 62—65
- [ 18 ] 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
- [ 19 ] Ritchie J C, McCarty G W, Venteris E R, et al. Soil and soil organic carbon redistribution on the landscape. *Geomorphology*, 2007, 89 (1/2): 163—171
- [ 20 ] 聂小东, 李忠武, 王晓燕, 等. 雨强对红壤坡耕地泥沙流失及有机碳富集的影响规律研究. *土壤学报*, 2013, 50 (5): 900—908  
Nie X D, Li Z W, Wang X Y, et al. Effect of rainfall intensity on soil loss from slope farmland of red soil and organic carbon enrichment in sediment (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (5): 900—908
- [ 21 ] 孟立君. 土壤酶活性与土壤肥力关系的研究进展. *中国科技博览*, 2013 (27): 394—395  
Meng L J. Research advance of the relationship between soil enzyme activity and soil fertility (In Chinese). *China Science and Technology Review*, 2013 (27): 394—395
- [ 22 ] Wang B, Xue S, Liu G B, et al. Changes in soil nutrient and enzyme activities under different vegetations in the loess plateau area, northwest China. *Catena*, 2012, 92 (3): 186—195
- [ 23 ] 刘作云, 杨宁. 衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复对土壤酶活性及土壤理化性质的影响. *水土保持通报*, 2015, 35 (2): 20—26  
Liu Z Y, Yang N. Effects of re-vegetation on soil enzyme activities and soil physico-chemical properties on sloping-land with purple soils in Hengyang city (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35 (2): 20—26
- [ 24 ] 万忠梅, 宋长春. 土壤酶活性对生态环境的响应研究进展. *土壤通报*, 2009, 40 (4): 951—956  
Wan Z M, Song C C. Advance on response of soil enzyme activity to ecological environment (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40 (4): 951—956
- [ 25 ] 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
- [ 26 ] 王涵, 王果, 黄颖颖, 等. pH变化对酸性土壤酶活性的影响. *生态环境*, 2008, 17 (6): 2401—2406  
Wang H, Wang G, Huang Y Y, et al. The effects of pH change on the activities of enzymes in an acid soil (In Chinese). *Ecology and Environment*, 2008, 17 (6): 2401—2406
- [ 27 ] 刘苹, 赵海军, 仲子文, 等. 三种根系分泌脂肪酸对花生生长和土壤酶活性的影响. *生态学报*, 2013, 33 (11): 3332—3339  
Liu P, Zhao H J, Zhong Z W, et al. The effects of three root exudated fatty acids on peanut growth and soil enzyme activities (In Chinese). *Acta Ecologica*





- Sinica, 2013, 33 ( 11 ) : 3332—3339
- [ 28 ] 叶协锋, 杨超, 李正, 等. 绿肥对植烟土壤酶活性及土壤肥力的影响. 植物营养与肥料学报, 2012, 19 ( 2 ) : 445—454
- Ye X F, Yang C, Li Z, et al. Effects of green manure in corporation on soil enzyme activities and fertility in tobacco-planting soils ( In Chinese ) . Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 19 ( 2 ) : 445—454
- [ 29 ] 侯彦会, 周学辉, 焦婷, 等. 甘肃永昌县放牧草地土壤脲酶活性与土壤肥力的关系初探. 草业学报, 2009, 18 ( 4 ) : 111—116
- Hou Y H, Zhou X H, Jiao T, et al. A preliminary study on the relationship between soil urease activity and soil fertility in the grazing grasslands of Yongchang county, Gansu province ( In Chinese ) . Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18 ( 4 ) : 111—116

## Effects of Soil Erosion and Deposition on Soil Enzyme Activity in Hilly Red Soil Regions of South China

XIAO Haibing<sup>1, 2</sup> LI Zhongwu<sup>1, 2†</sup> NIE Xiaodong<sup>1, 2</sup> MA Wenming<sup>1, 2, 3</sup> HUANG Bin<sup>1, 2</sup> LU Yinmei<sup>1, 2</sup>

( 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 College of Tourism and Historical Culture, Southwest University for Nationalities, Chengdu 610041, China )

**Abstract** 【Objective】 Soil enzymes catalyze nutrient recycling in forms available for plants and other organisms and are actively involved in soil energy transfer processes. Therefore, soil enzyme is an important driving factor in soil organic carbon dynamic and plays an extremely important role in the global carbon cycle. Knowledge of the mechanism of soil enzymes responding to soil erosion and deposition contributes to further understanding of the role of soil erosion in the global carbon cycle. Therefore, the purposes of this study were to elucidate the response of soil enzyme activities to long-term water erosion and quantify the relationships between soil basic physico-chemical parameters and enzyme activities. 【Method】 In this research, soil samples were collected separately from the soil layers ( 0 ~ 5, 5 ~ 10, 10 ~ 20, 20 ~ 30, 30 ~ 40, 40 ~ 60, 60 ~ 80, 80 ~ 100 cm ) of the erosional and depositional sites along a slope covered with pine trees in the hilly red soil region of South Hunan for the analysis of basic physico-chemical properties and enzyme activities in the soil. Soil organic carbon ( SOC ), total nitrogen ( TN ), dissolved organic carbon ( DOC ) and activities of four kinds of soil enzymes ( i.e. urease, catalase, acid phosphatase and sucrase ) were measured. Pearson correlation analysis and partial redundancy analysis were performed to analyze relationships between the soil enzyme activities and the soil physico-chemical properties and explore the most important physico-chemical factors influencing the soil enzyme activities. The findings in this study may provide some fundamental theoretical bases for exploration of the roles of the soil enzymes in soil carbon dynamic as affected by soil erosion. 【Result】 Results show that the depositional soils were higher than the erosional soils in content of SOC, TN, DOC. Soil deposition significantly improved soil fertility. Furthermore, the content of SOC, TN and DOC in the surface soils at the erosional and depositional sites was significantly greater than that of their respective one in the deep soils. In the soil profiles, the contents of SOC, TN and DOC all displayed a downward trend with increasing soil depth. Water erosion had not only a significant effect on soil nutrition distribution in the eroded slope, but also a great impact on soil enzyme activities in soils different in slope position. All the four enzymes, except for sucrase, were much higher in activity in the depositional soils than in most erosional soils. Soil deposition apparently improved soil enzyme activities. The same as the content of SOC, TN and DOC, activities of the four soil enzymes declined with soil depth in the profile. In addition,

correlation analysis reveals that positive correlations existed between urease, acid phosphatase and catalase. Furthermore, significant positive correlations ( $p < 0.05$ ) between soil nutrition parameters (SOC, TN, DOC) and enzyme activities (urease, acid phosphatase and catalase) were observed. All these findings prove that under the influence of long-term water erosion, soil enzyme activities and nutrition level presented a similar curve in dynamic. Partial redundancy analysis shows that SOC, TN and DOC together were responsible for 39.7% of the variation of the enzyme activity and SOC explained up to 7.5% of the variation of the enzyme activity, whereas, TN and DOC did 0.1% and 3.5%, respectively, which demonstrates that SOC is a factor more influencing on soil enzyme activities than all the other measured physicochemical parameters. Erosion-induced SOC redistribution in the soil on a slope is one of the major routes via which soil erosion affects soil enzyme activities. This study is quite limited to the soil on the slope covered by pine trees in a hilly red soil region. 【Conclusion】 Therefore, more efforts should be devoted in future studies to further elucidate mechanisms of soil enzymes responding in activity to long-term water erosion in soils different in type and land use.

**Key words** Hilly red soil region; Soil erosion; Enzyme activity; Soil physico-chemical property; Soil carbon cycle

(责任编辑: 檀满枝)