

利用纳米磁性材料表征地表溅蚀特征的初探*

汪倩 林金石[†] 黄炎和 蒋芳市 周曼 林蕾 朱璨

(福建农林大学资源与环境学院, 福建省土壤环境健康与调控重点实验室, 福州 350002)

摘要 磁性示踪研究坡面土壤侵蚀已取得一定成果, 但目前的磁性示踪方法不能满足次降雨后的溅蚀特征研究。因此, 在无磁性的石英砂上施用不同浓度(1.5%、2.5%、3.5%)和不同粒径(20 nm、200 nm)的纳米磁性材料, 而后进行人工模拟溅蚀试验, 利用磁化率仪和3D手持微地形扫描仪研究地表磁性变化与溅蚀后地表特征变化之间的关系, 研究利用纳米磁性材料表征溅蚀特征的可行性。结果表明: 20 nm磁性材料提高石英砂磁性背景值的幅度远高于200 nm磁性材料且不同浓度的磁性差异极显著, 两种纳米磁性材料均呈现出布设浓度越大, 示踪时间越长的特点; 溅蚀后表层磁化率随溅蚀时间的延长而逐渐衰减, 二者呈现出相关性较高的 $\chi_1 = a \ln(t) + b$ 对数函数关系; 20 nm磁性材料在3.5%浓度下可有效定量表征出石英砂溅蚀量的变化($p < 0.01$), 二者之间的相关关系可用 $\chi_2 = aM^b$ 幂函数表示; 20 nm磁性材料在溅蚀3 min内的磁化率变化与微地形高差变化呈极显著相关关系($p < 0.01$), 说明20 nm磁性材料可以在短时间内有效表征出溅蚀地表的侵蚀程度, 可表征出的侵蚀厚度在-5~10 mm内。该研究证明20 nm磁性材料表征溅蚀地表特征的方法在一定程度上是可行的, 可为磁性示踪法的深入研究提供新的思路和方法。

关键词 溅蚀; 磁性示踪剂; 纳米磁性材料; 磁化率; 微地形

中图分类号 Q143; S154.36 **文献标识码** A

溅蚀是土壤侵蚀过程的开始, 是导致坡面水蚀的重要因子, 土壤的溅蚀研究受到人们的长期关注^[1]。溅蚀是南方花岗岩崩壁土壤受侵蚀的主要形式, 崩岗崩壁土壤受雨滴溅蚀的面积大同时溅蚀也影响崩壁表面的水分变化从而加重崩壁土壤侵蚀, 故溅蚀是崩岗崩壁侵蚀的重要影响因素之一。由于垂直崩壁溅蚀测量与传统方法差异较大, 已有研究采用激光全站仪、3D激光扫描仪、多角度摄影测量等方法进行研究^[2-4], 这些方法可以对一段时间(3—6个月)后崩壁溅蚀量进行分析。为了能进行崩壁次降雨后溅蚀特征的研究, 需要寻求新的研究方法。磁性示踪法是一种利用人工磁性

示踪剂或土壤本身的矿物磁性, 通过磁化率仪测量土壤侵蚀前后磁化率的变化来确定土壤空间变异规律的方法。Eriksson和Sandgren^[5]最早提出利用天然矿物在泥沙中的相对含量来确定泥沙的来源。Dan Royall^[6]认为通过分析土壤表面磁性的变化, 可以确定小流域的土壤侵蚀的空间分异模式。Ventura等^[7-8]最早利用聚乙烯和磁铁矿粉研制了一种人工土壤侵蚀磁性示踪剂, 用它研究坡面的侵蚀和沉积的空间分异特征, 开创了利用人工磁性示踪剂研究土壤侵蚀的新思路。近十年来, 该方法逐渐得到国内广大科研工作者的重视。董元杰等^[9-11]借鉴国外的思路研制了以粉煤灰、水泥等

* 国家科技支撑计划项目(2014BAD15B0303)、国家自然科学基金项目(41571272)、福建省自然科学基金项目(2015J01156)资助 Supported by the National Key Technology R&D Program of China (No. 2014BAD15B0303), the National Natural Science Foundation of China (No. 41571272), the Natural Science Foundation of Fujian Province, China (No. 2015J01156)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: linjs18@163.com

作者简介: 汪倩(1991—), 女, 湖北襄阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与治理研究。E-mail: wangq910103@163.com

收稿日期: 2017-03-27; 收到修改稿日期: 2017-06-06; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-06-29

为原料的新型磁性示踪剂并将其施入土壤，研究坡面土壤侵蚀，认为其可以有效的对磁性背景值较低的土壤进行土壤侵蚀的监测研究。胡国庆等^[12]通过不同雨强的模拟降雨试验，研究了新型磁性示踪剂的示踪效果，认为示踪剂布设深度越浅，土壤磁化率值越小，随着布设深度的增加，土壤磁化率大幅升高。王全辉等^[13]也在模拟降雨条件下对三个坡度进行磁性示踪，结果表明三个坡度上、中、下部分磁化率的变化均能对应相应的侵蚀积累情况。传统的人工磁性示踪剂在平地及坡面上的应用为今后的研究奠定了良好的实践基础，但在垂直崩壁上难以应用传统方法布设示踪剂进行研究^[14-15]，在野外崩岗垂直型崩壁上表征溅蚀地表特征的探究应用上还存在困难。因此，本文通过模拟溅蚀试验，利用磁性灵敏度高且携带及布设便捷的纳米四氧化三铁磁性材料替代传统磁性示踪剂表征无磁性石英砂溅蚀地表特征，探索利用纳米磁性材料表征溅蚀地表特征的可行性。为建立磁性示踪剂的定量表征模型做出方法性探究，也为利用磁性示踪剂定量测定南方崩岗崩壁溅蚀提供基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

石英砂：选用分析纯的石英砂，磁化率本底值基本接近空气值，便于纳米磁性材料被溅蚀前后的磁化率分析，故供试材料选取25~50目（0.4~0.5 mm）和60~80目（0.2~0.3 mm）两种石英砂分析纯的多次研磨混合物，模仿土壤质地结构，保证粒径大小不同，混合比例1:1，保证其颗粒大小可以被雨滴溅蚀。混合后的供试材料磁化率均值为7.5（ $\times 10^{-6}$ SI），稍高于背景空气值。在溅蚀盘内填满供试石英砂并平整压实，表面覆盖纱布均匀洒水，使其充分渗透，保证供试材料水分饱和，减少溅蚀初期的干土溅散过程，模拟正常的溅蚀过程，防止干燥石英砂吸水影响溅蚀效果。溅蚀盘底有均匀孔隙供多余水分漏出。石英砂容重控制在1.7~1.8 g cm^{-3} 之间，两种石英砂分析纯物理性质如表1所示。

纳米磁性材料：选用Iron oxide（Ⅱ、Ⅲ）纳米四氧化三铁球形磁珠（20 nm）和Iron oxide

表1 供试石英砂理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the quartz sand tested

石英砂 Quartz sands	颗粒度 Granularity (mm)	铁 Fe (%)	磁化率 Magnetic susceptibility ($\times 10^{-6}$ SI)
分析纯A Analytical Pure A	0.4~0.5	≤ 0.005	10.8
分析纯B Analytical Pure B	0.2~0.3	≤ 0.002	4.1
背景值 The background value	—	—	± 2

（Ⅱ、Ⅲ）纳米四氧化三铁铁粉（100~300 nm）两种粒径的纳米磁性材料。由于纳米级磁性材料在20 nm前后的磁性差异较大，本试验两种纳米材料平均粒径分别为20 nm和200 nm，并将两种供试纳米磁性材料进行磁性对比分析。由于纳米磁性材料的颗粒具有磁性强且比表面高、易团聚、吸附性强的特点，故本试验选取由醇-水组合的表面活性剂包裹在纳米晶体表面的纳米磁性材料，以防止纳米晶体的团聚，又可以使纳米磁珠均匀分散^[16-17]。两种磁性材料均具有较稳定的磁响应强的顺磁性

质及吸附性能。

1.2 模拟降雨试验

采用室内人工模拟的试验方法，人工模拟降雨试验在福建农林大学金山水土保持科教园人工模拟降雨大厅进行。溅蚀试验选用自制方形雨滴发生装置（方形塑胶容器）模拟降雨，选用内径为51 mm的81个针头均匀布设在降雨装置底部，装置规格为39.5 cm \times 28.5 cm \times 20 cm（长 \times 宽 \times 高），降雨高度为12 m。由于测量供试材料的磁化率值需要隔绝外界的磁性干扰以及方便磁化率探头均匀测量，

试验根据此需要将Morgan圆形溅蚀盘改造为人工自制无磁性亚克力板方形溅蚀盘, 其他作用保持不变, 规格为20 cm×20 cm×2 cm (长×宽×高), 雨滴发生装置采用精密蠕动泵调节供水。根据秦越等^[18]的研究结论: 当雨滴动能小于 $0.067\ 4\times 10^{-3}$ J时, 雨滴无法产生溅蚀, 直径为2.8~3.8 mm的小雨滴产生的溅蚀量较多, 对土壤表面的溅蚀影响最大。故本实验在前人研究的基础上, 通过OTT Parsivel2型激光雨滴谱仪对自制雨滴发生装置的雨滴直径进行多次滤定(精度达到95%), 设定雨滴直径为 (3.3 ± 0.2) mm, 雨强控制为 (56 ± 2.5) mm h⁻¹。由于降雨5 min内产生的侵蚀厚度远高于崩壁年侵蚀厚度, 考虑到石英砂之间无胶结, 为了在溅蚀盘上形成不同的表面特征, 降雨时间设置为1 min、2 min、3 min、4 min、5 min五个时间段。降雨过程中用方形铁皮盖遮挡收集槽, 防止土壤溅出收集槽, 影响溅蚀量。降雨前后扫描溅蚀土盘的微地形变化并测定表层磁化率值。同时收集石英砂溅蚀量、测定溅蚀泥沙磁化率值。降雨后将收集槽内的溅蚀石英砂转移到塑料盒内, 待溅蚀泥沙磁化率测量结束后将溅蚀石英砂转至铝盒内, 静置后倒掉上清液, 并将其放入烘箱, 在105 °C温度下烘干并称取溅蚀石英砂量。整个试验设计三次重复, 所有数据在三次重复后取平均值。

1.3 磁化率及微地形的测定

两种纳米磁性材料均采用电动喷壶均匀喷洒布设在方形溅蚀土盘表面以提高表层磁性, 根据预实验多种布设浓度下磁性值测量的差异性结果, 将布设浓度设定为1.5%、2.5%、3.5%三个梯度, 静置一段时间等待纳米磁性材料完全吸附及入渗。磁化率均采用英国Bartington公司MS3型磁化率仪高精度测量探头MS3E测定, 测定过程中采用自制无磁性木质网格固定测量点位置。微地形变化采用HandyScan700型手持式计量级3D激光扫描仪扫描测量, 测量精度设置0.5 mm, 保证微地形变化的精确扫描。降雨前先进行原始土盘的3D微地形立体扫描并测定表层64个固定测量点的磁化率值, 并通过3D扫描仪的处理软件Geomagic Studio 2013进行微地形溅蚀前高程值的提取。再通过地统计插值, 得到整个土盘的地表磁化率分布图。每个降雨时段后, 再进行一次3D微地形扫描, 提取溅蚀后高程值并进行溅蚀前后微地形高差值的计算。同时测定溅蚀后表层磁化率值和溅蚀泥沙磁化率。收集装置

选取不影响磁性变化的塑料盒子, 便于测定溅蚀泥沙磁化率值。

1.4 磁化率及微地形特征值构建

不同时间段降雨前后测定的3D微地形变化值采用微地形扫描软件(Geomagic Qualify 2013)进行分析处理。运用软件中的网格医生功能修补小范围缺失部位值, 运用填充功能将平面的点或面修补完整, 以减少扫描过程中产生的测量误差^[19]。同时在微地形表面均匀提取与64个固定磁化率测量点相对应的微地形坐标点的微地形高程值, 结合每个坐标点上相对应的磁化率值, 构建每个土盘不同降雨时间段前后的磁化率差值变化和降雨微地形高差变化特征关系图。溅蚀过程中每个时间段内的磁化率差值与微地形差值特征的相互关系是纳米磁性材料能否很好地表征溅蚀地表特征的重要指标。

1.5 数据处理

数据处理及统计分析采用SPSS18.0软件进行, 制图采用Excel2007、Qrigin8.0。

2 结果与讨论

2.1 纳米磁性材料对表层磁化率的影响

土壤磁性通常用磁化率 χ 表示, 磁化率是衡量物质被磁化强弱的量, 是磁化强度 M 对外加磁场 H 的一阶导数, 也是衡量物质磁性大小最重要的指标^[20]。由表2可见, 200 nm磁性材料布设浓度为1.5%、2.5%时, 差异显著($p<0.05$), 而布设浓度为3.5%时, 石英砂表层磁化率呈现极显著差异($p<0.01$), 石英砂磁性本底值提高幅度约47万倍; 而20 nm磁性材料在布设浓度为1.5%、2.5%、3.5%时, 磁化率值均有大幅提升, 提升幅度分别约为背景值的35万倍、49万倍和84万倍, 且布设浓度越大, 石英砂背景值提高倍数越大。所有布设浓度之间的磁化率均呈现显著性差异。这表明两种纳米磁性材料均能达到提高石英砂本底磁性的目的, 但20 nm磁性材料的提升幅度明显高于200 nm磁性材料, 且其所需的布设浓度更低、反应更灵敏。胡国庆等^[21]利用传统的圆盘造粒法造出的磁性示踪剂提高土壤磁性值为背景值的1.98倍~5.37倍, 与之相比, 纳米磁性材料在提高磁性背景值方面具有一定的优势。

2.2 溅蚀后表层磁性变化规律

试验对不同降雨时间段前后的溅蚀盘表层进行

表2 纳米磁性材料对供试土壤磁化率的影响

浓度 Concentration (%)	磁化率Magnetic susceptibility (SI)	
	20 nm	200 nm
0	0.0000075 ± 0.024 Cd	0.0000075 ± 0.024 Cd
1.5	2.619 ± 0.673 Bc	0.360 ± 0.102Bc
2.5	3.687 ± 0.580 Bb	1.216 ± 0.083 Bb
3.5	6.290 ± 0.474 Aa	3.503 ± 1.033 Aa

注：同列不同小写字母表示差异显著 ($p \leq 0.05$)；同列不同大写字母表示差异极显著 ($p \leq 0.01$) Note: Values followed by different lowercase letters within the same row are significantly different at 0.05 significance level; Values followed by different capital letters within the same row are extremely and significantly different at 0.01 significance level

了磁化率的测量。磁化率是顺磁磁化率（正值）、铁磁磁化率（正值）和逆磁磁化率（负值）的总和^[22]，两种纳米磁性材料虽均具有顺磁性特点，但粒径越小磁性越稳定。一般研究认为纳米磁性材料在30 nm以下具有超顺磁性的特点，所以20 nm磁性材料测量结果表现为正值，200 nm磁性材料的磁性在低浓度下性质不稳定，测定的磁化率值会出现逆磁性负值。通过对图1两种纳米磁性材料溅蚀后的表层磁化率变化进行分析可以看出，两种纳米磁性材料3种浓度的磁性均随溅蚀时间呈现阶梯状下降趋势，且击打1min后磁性下降程度最大。200 nm磁性材料在2.5%和3.5%浓度下，磁性值变化呈现一致性。前2 min随着石英砂溅出土盘，衰减大。3~5 min雨滴溅蚀后磁化率变化趋于平稳，且磁化率值仍为顺磁性正值。但在1.5%浓度下，溅蚀1 min内200 nm磁性材料被大量击打出溅蚀土盘，磁化率值下降最快。击打2 min后，剩余微量磁性材料趋于稳定，磁化率值趋向于石英砂本底

值。虽然1.5%浓度不断被雨滴稀释出现逆磁性的负值，但磁化率仍随溅蚀时间的延长呈现出缓慢下降趋势；20 nm磁性材料在1.5%和2.5%浓度下，击打1 min内，磁性值变化最大。1 min后二者呈现出相似的缓慢下降趋势，磁性值趋于一致，3 min后二者磁性值差异变大。这说明两种低浓度在溅蚀后磁化率的变化特征上差异不大。在3.5%的浓度下，溅蚀后磁化率随着时间逐渐递减，前2 min衰减幅度大，后3 min磁化率波动幅度小，但仍呈现下降趋势，溅蚀5 min后，20 nm磁性材料在3种浓度下的磁化率值仍处于较高水平（大于石英砂本底值），这说明溅蚀盘内仍有少量纳米磁性材料残留且仍具有较高磁性。两种纳米磁性材料均呈现出浓度越高，可表征的时间越长的特点。

本试验同时对溅蚀后的表层磁化率和溅蚀时间进行回归分析，通过表3的拟合函数发现溅蚀后表层磁化率 χ_1 与溅蚀时间 t 呈现 $\chi_1=a\ln(t)+b$ 对数函数关系，且相关性较高。200 nm磁性材料的拟合程

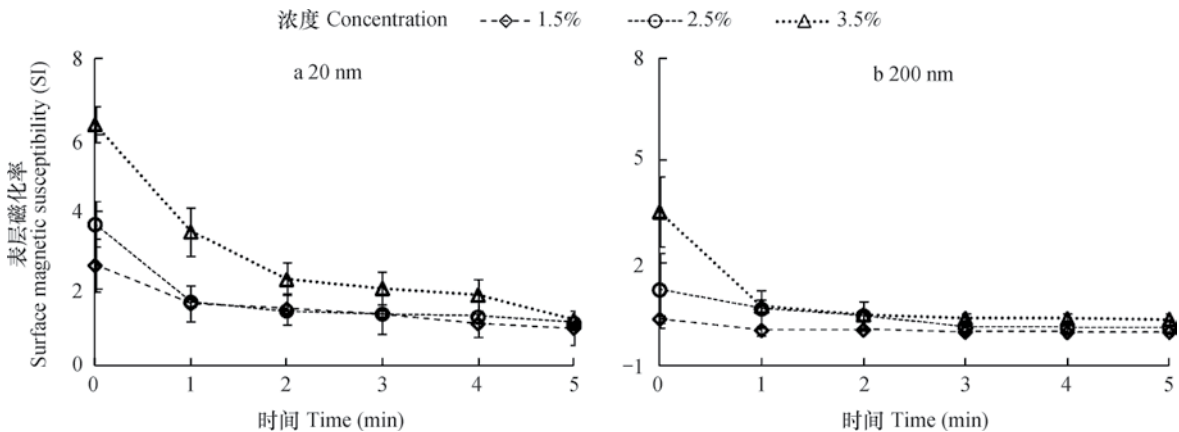


图1 不同浓度下纳米磁性材料溅蚀后表层磁化率随时间变化

Fig. 1 Diagram of temporal variation of magnetic susceptibility of the surface subjected to splash erosion relative to concentration of the nano magnetic material

表3 溅蚀后表层磁化率与溅蚀时间的拟合函数

Table 3 Fitting functions of magnetic susceptibility of the surface subjected to splash erosion and splashing time			
纳米磁性材料	浓度	溅蚀后表层磁化率与溅蚀时间的关系式	R^2
Nano magnetic materials	Concentration (%)	Relation between surface magnetic susceptibility and splashing time	
20 nm	1.5	$\chi_t=-0.40\ln(t)+1.695$	0.910
	2.5	$\chi_t=-0.31\ln(t)+1.671$	0.965
	3.5	$\chi_t=-1.29\ln(t)+3.397$	0.948
200 nm	1.5	$\chi_t=-0.04\ln(t)+0.042$	0.701
	2.5	$\chi_t=-0.28\ln(t)+0.555$	0.856
	3.5	$\chi_t=-0.24\ln(t)+0.698$	0.926

度随着布设浓度的增大呈现阶梯状增长的趋势，在3.5%浓度下拟合程度最佳，3种浓度的拟合程度差异较大；而20 nm磁性材料的3种浓度拟合程度均较高，拟合效果差异较小，但在2.5%浓度下呈现出最佳拟合度。

2.3 溅蚀泥沙磁化率与溅蚀量变化特征

溅蚀泥沙磁化率指被溅蚀出土盘的纳米磁性材料的磁化率值，溅蚀量是溅蚀过程中被雨滴击溅出来的总量，是衡量雨滴溅蚀强弱最直观的指标。通过图2中溅蚀量与溅蚀泥沙磁化率的变化趋势可以看出，1.5%浓度下200 nm磁性材料的溅蚀量与溅蚀泥沙磁化率变化趋势缓慢且趋于平坦，这表明溅蚀泥沙磁化率变化与溅蚀量变化在一定时间段后不再一致，溅蚀量增加而溅蚀泥沙磁化率保持不变。与之相比，2.5%和3.5%浓度下两者的变化呈现一致上升趋势，这表明200 nm磁性材料在1.5%浓度下无法表征溅蚀量的变化，而在2.5%和3.5%浓度下溅蚀泥沙磁化率随着溅蚀量的增加而增大；

20 nm磁性材料3个浓度下溅蚀量与溅蚀泥沙磁化率均呈现出逐渐上升的趋势，3个浓度的磁化率及溅蚀量变化趋势基本一致，这表明200 nm磁性材料3个浓度的溅蚀泥沙磁化率均随着溅蚀量的增加而增大。综上所述：20 nm磁性材料（2.5%、3.5%）和20 nm磁性材料（1.5%、2.5%、3.5%）均呈现溅蚀泥沙磁化率值随着溅蚀量的增加而增大的趋势，溅蚀泥沙磁化率的变化在一定时间段内与溅蚀量变化是一致的。即：纳米磁性材料在一定时间内表征溅蚀量变化的方法是可行的。且20 nm磁性材料的溅蚀泥沙磁化率也均远高于200 nm磁性材料磁化率。这一结论与程杨^[23]单颗粒尺寸在22 nm左右的磁性材料具有更高的磁响应能力和环境稳定性的结论一致，也从侧面表明20 nm磁性材料较200 nm磁性材料磁性更强。相比200 nm磁性材料，20 nm磁性材料的溅蚀泥沙磁化率与溅蚀量呈现的上升趋势更大，这说明20 nm磁性材料或许还可以在更长时间内表征溅蚀量。

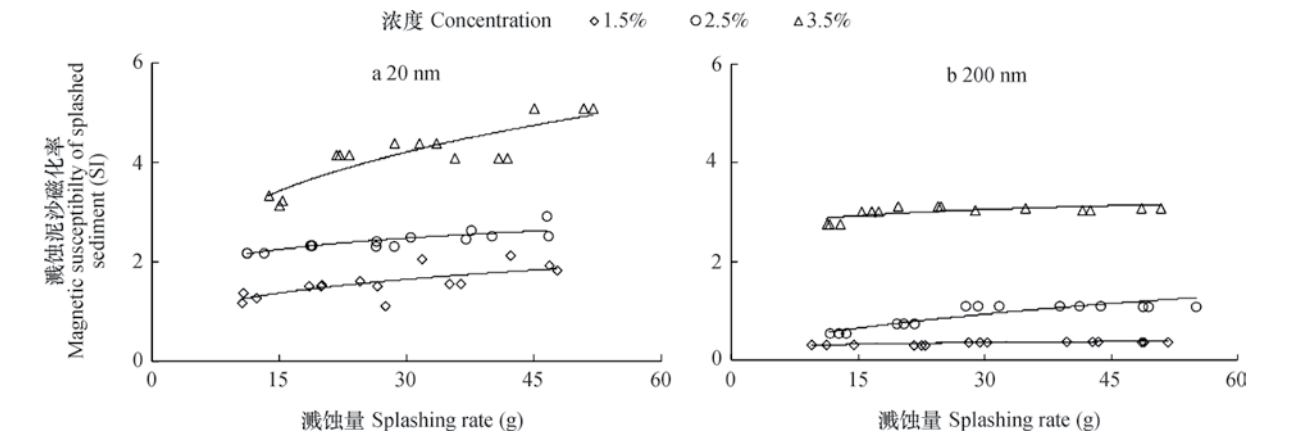


图2 两种磁性材料不同浓度下溅蚀量与溅蚀泥沙磁化率关系（5 min内）

Fig. 2 Diagram of relationship between splash erosion rate and magnetic susceptibility of the sediment from splash erosion relative to type and concentration of the magnetic material (within 5 min)

表4 两种磁性材料不同浓度下溅蚀泥沙磁化率与溅蚀量相关性关系

Table 4 Correlation relationship between magnetic susceptibility of the sediment from splash erosion and splash erosion rate relative to type and concentration of the magnetic material

纳米磁性材料	浓度	溅蚀泥沙磁化率与溅蚀量的关系式	R^2
Nano magnetic material	Concentration (%)	Relation between surface magnetic susceptibility of splashed sediment and splash erosionrate	
20 nm	1.5	$\chi_2=0.666M^{0.265}$	0.642**
	2.5	$\chi_2=1.531M^{0.140}$	0.858**
	3.5	$\chi_2=1.528M^{0.297}$	0.490*
200 nm	1.5	$\chi_2=0.227M^{0.134}$	0.501*
	2.5	$\chi_2=0.163M^{0.511}$	0.750**
	3.5	$\chi_2=2.488M^{0.059}$	0.763**

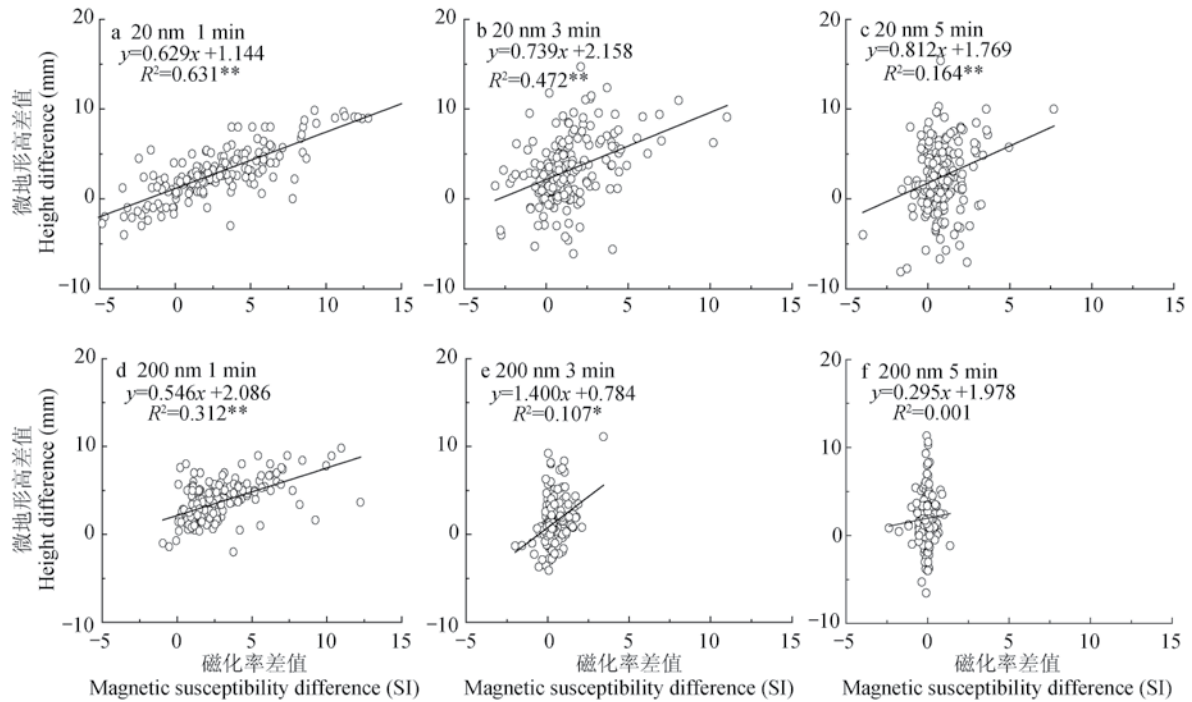
注：表中**表示达到极显著水平（ $p \leq 0.01$ ）；*表示达到显著水平（ $p \leq 0.05$ ） Note: ** denotes extreme significance at 0.01 level; and * significance at 0.05 level in the table

本试验同时对溅蚀泥沙磁化率和溅蚀量进行回归分析，通过对表4的拟合函数分析，发现溅蚀泥沙磁化率 χ_2 与溅蚀量 M 呈现出 $\chi_2=aM^b$ 幂函数关系，且相关程度均较高。5 min内，在200 nm磁性材料的1.5%和2.5%两个浓度下，溅蚀泥沙磁化率与溅蚀量均呈现出极显著相关关系（ $p < 0.01$ ），3.5%浓度下显著相关（ $p < 0.05$ ）且拟合程度较低，2.5%浓度时拟合程度达到最佳；20 nm磁性材料的浓度越大，拟合程度越高，在3.5%浓度下二者呈现极显著相关关系（ $p < 0.01$ ）且拟合程度达到最佳。这表明：200 nm磁性材料在2.5%浓度下表征溅蚀量的程度最高，20 nm磁性材料在3.5%浓度下表征程度最高。传统的磁性示踪剂是被人工均匀掺入（ $> 5\text{cm}$ ）土壤以保证其能与土壤有效结合从而示踪土壤侵蚀，布设浓度在5%~10%时才能适用于侵蚀研究^[24]。本实验将纳米磁性材料人工喷洒在供试土壤表面的方法可有效降低示踪剂的用量，并减轻传统磁性示踪方法的工作量，但无法使之与土壤更深入结合从而长时间表征土壤溅蚀特征。相比较200 nm磁性材料，20 nm磁性材料在表征溅蚀量的变化上具有磁性更高的特点。

2.4 溅蚀泥沙磁化率与地表微地形变化关系

微地形受溅蚀前后的变化是溅蚀地表最重要的特征之一，微地形变化表现为微地形高差值变化^[25]，即微地形受侵蚀的侵蚀厚度，反映出土壤受击溅侵蚀的迁移深度变化。为进一步探讨溅蚀出的泥沙磁化率与地表微地形受侵蚀程度的关系，根据试验结果，挑选两种纳米磁性材料（20 nm、200

nm）的最高浓度（3.5%）进行溅蚀泥沙磁化率溅蚀前后的差值及微地形溅蚀前后的高差变动的相关性分析。磁化率差值与微地形高差变化越大，表示磁化率衰减越大、微地形受侵蚀程度越大。通过图3左右两侧的两种粒径磁性材料溅蚀泥沙磁化率差值与地表微地形高差变化的回归分析可以看出：20 nm磁性材料在整个溅蚀时间段内均呈现出极显著相关关系（ $p < 0.01$ ），整个溅蚀时间段内地表微地形受溅蚀作用产生的侵蚀厚度在-10~15 mm。但降雨后期的微地形侵蚀厚度与溅蚀泥沙磁化率的拟合效果较差，能被有效表征出溅蚀厚度的范围在-5~10 mm；而200 nm磁性材料只在受溅蚀1 min内的溅蚀泥沙磁化率与微地形高差变化达到极显著相关关系（ $p < 0.01$ ），能够有效表征的侵蚀厚度在-2~8 mm。说明20 nm磁性材料可以在一定时间内承受住雨滴溅蚀，溅蚀泥沙磁化率变化与微地形高差变化呈现较好一致性，而200 nm磁性材料只在受溅蚀初期呈现一致性变化。微地形受侵蚀的厚度与溅蚀出的溅蚀泥沙磁化率的变化基本一致，这一结论与Guzmán等^[26]利用磁性氧化铁示踪评估橄榄园水土流失的空间分异规律有相似之处。总而言之，不同粒径的纳米磁性材料均可以在一定程度上定量表征出溅蚀地表特征，但20 nm磁性材料仅可在一段时间内表征出地表-5~10 mm内的侵蚀厚度变化，而200 nm磁性材料则只能在受溅蚀最初阶段表征出地表-2~8 mm内的侵蚀变化。20 nm的小粒径磁性材料呈现出定量表征侵蚀程度更深、表征时间更长及示踪效果更好的特点。



注：微地形高差值反映出微地形受溅蚀的侵蚀厚度。a、b、c代表布设20 nm磁性材料；d、e、f代表布设200 nm磁性材料 Note: Difference in microrelief elevation reflects thickness of the splash erosion of the microrelief subjected to splash erosion. The lowercase, a, b and c represents layout of 20 nano magnetic material, while d, e and f that of 200 nano magnetic material

图3 两种粒径纳米磁性材料磁化率及微地形随溅蚀时间变化（3.5%含三次重复）

Fig. 3 Diagram of variation of magnetic susceptibility and microrelief of the two nano magnetic materials with splash erosion going on (3.5%, three replicates)

3 结 论

两种纳米磁性材料均可以大幅度提高石英砂表层磁性值，且呈现出粒径越小磁性越大、浓度越大磁性越强的趋势；但20 nm磁性材料的磁性灵敏度远高于200 nm磁性材料，在抗溅蚀能力上，20 nm磁性材料的抗溅蚀能力强于200 nm磁性材料，抗侵蚀时间可达5 min；溅蚀后表层磁化率随着溅蚀时间的延长呈现出逐渐下降的趋势，二者之间存在相关性较高的 $\chi_1 = a \ln(t) + b$ 对数函数关系；同时，20 nm磁性材料在3.5%布设浓度下的溅蚀泥沙磁化率与溅蚀量呈现出 $\chi_2 = aM^b$ 幂函数关系，说明溅蚀泥沙磁化率可以在一定程度上表征出溅蚀量的变化。通过微地形高差变化与磁化率变化的相关性关系发现20 nm磁性材料在短时间内可以有效表征出石英砂的微地形侵蚀特征，可表征的侵蚀厚度在-5~10 mm内。综上所述，纳米磁性材料被证明是一种灵敏度更高的新型磁性示踪剂，20 nm磁性材料在一定程度上替代原始的四氧化三铁球形示踪剂表征

溅蚀的地表特征的方法是可行的。本试验以石英砂为对象进行研究，与土壤差异较大，因此今后还需要将之应用于土壤侵蚀研究中，完善野外土壤侵蚀分异机理，为水土侵蚀与监测提供更好的量化方法。

参 考 文 献

- [1] 罗亲普, 刘文杰. 土壤溅蚀过程和研究方法综述. 土壤通报, 2012, 43 (1): 230—235
Luo Q P, Liu W J. A review on the process of soil splash erosion and its study approaches (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43 (1): 230—235
- [2] 张利超, 杨伟, 李朝霞, 等. 激光微地貌扫描仪测定侵蚀过程中地表糙度. 农业工程学报, 2014, 30 (22): 155—162
Zhang L C, Yang W, Li Z X, et al. Quantification of soil surface roughness during soil erosion using laser micro-topographical scanner (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (22): 155—162

- [3] 江冲亚, 方红亮, 魏珊珊. 地表粗糙度参数化研究综述. 地球科学进展, 2012, 27 (3) : 292—303
Jiang C Y, Fang H L, Wei S S. Review of land surface roughness parameterization study (In Chinese) . Advances in Earth Science, 2012, 27 (3) : 292—303
- [4] 魏舟. 三维激光扫描技术在坡面微地形观测中的应用. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2015
Wei Z. The three-dimensional laser scanning technology application in slop micro topography observation application (In Chinese) . Yangling, Shaanxi: Northwest Agriculture and Forestry University, 2015
- [5] Eriksson M G, Sandgren P. Mineral magnetic analyses of sediment cores recording recent soil erosion history in central Tanzania. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1999, 152 (3) : 365—383
- [6] Royall D. Use of mineral magnetic measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small agricultural catchment in limestone terrain. Catena, 2001, 46 (1) : 15—34
- [7] Ventura E, Nearing M A, Norton L D. Developing a magnetic tracer to study soil erosion. Catena, 2001, 43 (4) : 277—291
- [8] Ventura E, Nearing M A, Amore E, et al. The study of detachment and deposition on a hillslope using a magnetic tracer. Catena, 2002, 48 (3) : 149—161
- [9] 董元杰, 史衍玺, 孔凡美, 等. 基于磁测的坡面土壤侵蚀空间分布特征研究. 土壤学报, 2009, 46 (1) : 144—148
Dong Y J, Shi Y X, Kong F M, et al. Magnetic-measurement-based spatial distribution of soil erosion on slope (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2009, 46 (1) : 144—148
- [10] 范振义, 董元杰, 刘春生, 等. 土壤侵蚀磁性示踪剂对大白菜生理特性及产量和品质的影响. 土壤学报, 2012, 49 (4) : 788—795
Fan Z Y, Dong Y J, Liu C S, et al. Effects of magnetic tracer for soil erosion on physiological characteristics, yield and quality of Chinese cabbage (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2012, 49 (4) : 788—795
- [11] 胡国庆, 董元杰, 史衍玺, 等. 新型土壤侵蚀磁性示踪剂的研制及其对土壤理化性状的影响. 土壤学报, 2011, 48 (3) : 644—649
Hu G Q, Dong Y J, Shi Y X, et al. Development of new soil erosion magnetic tracers and their effects on soil physical and chemical properties (In Chinese) . Acta Pedologica Sinica, 2011, 48 (3) : 644—649
- [12] 胡国庆, 张民, 刘庆, 等. 不同原料土壤侵蚀磁性示踪剂的研制及应用. 河北科技师范学院学报, 2013, 27 (2) : 70—75
Hu G Q, Zhang M, Liu Q, et al. Development and application of different materials magnetic tracers to soil erosion (In Chinese) . Journal of Hebei Normal University of Science and Technology, 2013, 27 (2) : 70—75
- [13] 王全辉, 胡国庆, 董元杰, 等. 磁性示踪条件下坡面土壤侵蚀产流、产沙及侵蚀空间分异特征. 水土保持学报, 2012, 26 (2) : 21—23
Wang Q H, Hu G Q, Dong Y J, et al. Runoff and sediment yield and spatial and variation of soil erosion slope under magnetic tracing condition (In Chinese) . Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26 (2) : 21—23
- [14] 马琨, 王兆骞, 陈欣. 土壤侵蚀示踪方法研究综述. 水土保持研究, 2002, 9 (4) : 90—95
Ma K, Wang Z Q, Chen X. Summary of tracer method on studies of soil erosion (In Chinese) . Research of Soil and Water Conservation, 2002, 9 (4) : 90—95
- [15] 胡国庆, 董元杰, 史衍玺, 等. 坡面土壤侵蚀空间分异特征的磁性示踪法和侵蚀针法对比研究. 水土保持学报, 2010, 24 (1) : 53—57
Hu G Q, Dong Y J, Shi Y X, et al. Comparative on characteristics of soil erosion spatial variation on slopes using magnetic racing and erosion pins (In Chinese) . Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24 (1) : 53—57
- [16] 王旭珍. Fe_3O_4 微/纳米磁性材料的合成、自组装及其性能研究. 大连: 大连理工大学, 2012
Wang X Z. Fe_3O_4 Nano/Micrometer materials: Fabrication, self-assembly and magnetic property (In Chinese) . Dalian: Dalian University of Technology, 2012
- [17] 周菊英, 徐柳苏, 盘荣俊. 一种制备纳米 Fe_3O_4 的新方法及其磁性性能研究. 电子元件与材料, 2007, 26 (7) : 60—62
Zhou J Y, Xu L S, Pan R J. A new method of nano Fe_3O_4 preparation and its magnetic property study (In Chinese) . Electronic and Ponents and Materials, 2007, 26 (7) : 60—62
- [18] 秦越, 程金花, 张洪江, 等. 雨滴对击溅侵蚀的影响研究. 水土保持学报, 2014, 28 (2) : 74—78
Qing Y, Cheng J H, Zhang H J, et al. A study of the rain drop impact to splash erosion (In Chinese) . Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28 (2) : 74—78
- [19] 郑德华, 沈云中, 刘春. 三维激光扫描仪及其测量误差影响因素分析. 测绘工程, 2005, 14 (2) : 32—34, 56
Zheng D H, Shen Y Z, Liu C. 3D laser scanner and its

- effect factor analysis of surveying error (In Chinese). Engineering of Surveying and Mapping, 2005, 14 (2) : 32—34, 56
- [20] 刘青松, 邓成龙. 磁化率及其环境意义. 地球物理学报, 2009, 52 (4) : 1041—1048
Liu Q S, Deng C L. Magnetic susceptibility and its environmental significances (In Chinese). Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52 (4) : 1041—1048
- [21] 胡国庆, 邱现奎, 王艳华, 等. 土壤侵蚀磁性示踪剂对土壤理化性质及小白菜生理特性的影响. 水土保持学报, 2011, 25 (2) : 232—236
Hu G Q, Qiu X K, Wang Y H, et al. Effects of soil erosion magnetic tracer on physical and chemical properties of soil and physiological characteristics of pakchoi (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25 (2) : 232—236
- [22] 俞劲炎, 卢升高. 土壤磁学. 南昌: 江西科学技术出版社, 1991
Yu J Y, Lu S G. Soil magnetism (In Chinese). Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 1991
- [23] 程杨, 赵宗山, 张帆, 等. $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2\text{-Polypyrrole}$ 纳米核壳颗粒的制备及其吸附性能. 科学通报, 2010, 55 (30) : 2904—2909
Cheng Y, Zhao Z S, Zhang F, et al. Preparation of $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2\text{-Polypyrrole}$ core-shell nanoparticles and their adsorption of $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 2010, 55 (30) : 2904—2909
- [24] 曾方明, 赖忠平, 刘向军. 磁化率测量过程中样品重量对磁化率的影响. 盐湖研究, 2014, 22 (3) : 21—25
Zeng F M, Lai Z P, Liu X J. The influence of mass on magnetic susceptibility during the measurement (In Chinese). Journal of Salt Lake Research, 2014, 22 (3) : 21—25
- [25] 郑子成, 秦凤, 李廷轩. 不同坡度下紫色土地表微地形变化及其对土壤侵蚀的影响. 农业工程学报, 2015, 31 (8) : 168—175
Zheng Z C, Qing F, Li T X. Changes in soil surface microrelief of purple soil under different slope gradients and its effects on soil erosion (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (8) : 168—175
- [26] Guzmán G, Vanderlindenb K, Giráldez J, et al. Assessment of spatial variability in water erosion rates in an olive orchard at plot scale using a magnetic iron oxide tracer. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77 (2) : 350—361

Feasibility Study of Using Nano Magnetic Materials to Characterize Splash Erosion of Land Surface

WANG Qian LIN Jinshi[†] HUANG Yanhe JIANG Fangshi ZHOU Man LIN Lei ZHU Can
(College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fujian Provincial Key Laboratory of Soil Environmental Health and Regulation, Fuzhou 350002, China)

Abstract Certain achievements have been made in the study on soil erosion on slopes using magnetic tracers. However, the traditional magnetic tracer method is far from effective enough to meet the requirements of the study to characterize splash erosion caused by each rainfall event. Therefore, an in-lab splash erosion simulation experiment was carried out over on a bed of non-magnetic quartz sand mixed separately with nano magnetic materials, different in particle size (20 nm or 200 nm), at a rate of 1.5%, 2.5% and 3.5% in this study. Magnetic susceptibility meter and Three-dimensional Laser Micro-topographical Scanner was used to monitor variation of the magnetism of the land surface and its relationship with changes in topographic characteristics of the land surface subjected to splash erosion, and hence to study feasibility of using nano magnetic materials to characterize splash erosion. Results show that the 20 nm magnetic material was more effective than the 200 nm magnetic material in raising magnetism of the quartz sand over its background value, and the effect varied sharply with concentration or incorporation rate of the magnetic materials; and the higher the concentration of the material, the more durable the tracing effect. After splash erosion, surface magnetic susceptibility declined gradually with the time going on, displaying a high logarithmic function relation expressed as $\chi_1 = a \ln(t) + b$; The use of 20nm magnetic material, 3.5% in concentration effectively

characterized changes in splash erosion rate of the quartz sand ($p < 0.01$) with a power function relation expressed as $\chi_2 = aM^b$ (χ_2 = sediment susceptibility and M = splash erosion amount). The highly significant relationship between the variation of magnetic susceptibility of the 20 nm magnetic materials in the 3 minutes of splash erosion and the variation of microrelief demonstrates that the 20nm magnetic material can be used to characterize erosion degree, up to the range of $-5 \sim 10$ mm, of the land surface subjected to splash erosion within a short period of time. All the findings in this study prove that it is, to a certain extent, feasible to use 20 nm magnetic material to characterize splash erosion of land surface. Moreover, this study may help open up some new ideas and develop new methods for further study on utilization of the magnetic tracing method.

Key words Splash erosion; Magnetic tracer; Nano magnetic materials; Magnetic susceptibility; Micro-topography

(责任编辑: 檀满枝)

信息

中国知网 (CNKI) 推出《中国高被引图书年报》

日前, 中国知网 (CNKI) 中国科学文献计量评价研究中心推出了一套《中国高被引图书年报》, 该报告基于中国大陆建国以来出版的422万余本图书被近3年国内期刊、博硕、会议论文的引用频次, 分学科、分时段遴选高被引优秀学术图书予以发布。据研制方介绍, 他们统计并分析了2013—2015年中国学术期刊813万余篇、中国博士学位论文101万余篇、中国重要会议论文39万余篇, 累计引文达1 451万条。根据统计数据, 422万本图书至少被引1次的图书达72万本。研制方根据中国图书馆分类法, 将72万本图书划分为105个学科, 分1949—2009年和2010—2014年两个时间段, 分别遴选被引最高的TOP10%图书, 共计选出70 911本优秀图书收入《中国高被引图书年报》。统计数据显示, 这7万本高被引优秀图书虽然只占全部图书的1.68%, 却获得67.4%的总被引频次, 可见这些图书质量上乘, 在同类图书中发挥了更加重要的作用。该报告还首次发布各学科“学科h指数”排名前20的出版单位的评价指标, 对客观评价出版社的社会效益——特别是学术出版物的社会效益具有重要的参考价值。

该报告从图书被引用的角度出发, 评价图书的学术影响力, 弥补了以销量和借阅等指标无法准确评价学术图书的缺憾, 科学、客观地评价了图书、图书作者以及出版单位对各学科发展的贡献。

《中国高被引图书年报》将建国以来出版图书全部纳入评价范围属国内首创, 是全面、客观评价图书学术影响力的工具, 填补了目前图书学术水平定量评价的空白, 在帮助图书馆建设特色馆藏和提高服务水平、帮助出版管理部门了解我国学术出版物现状、帮助科研机构科研管理、帮助读者购买和阅读图书等方面, 均具有较强的参考价值, 也为出版社评估出版业绩、决策再版图书、策划学科选题提供有用的信息。

《中国高被引图书年报》由《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司出版。该产品的形式为光盘电子出版物, 分为理学、工学、农学、医学、人文科学和社会科学6个分卷, 随盘赠送图书, 欢迎您咨询、订购。咨询电话: 010-82710850, 82895056转8599, Email: aspt@cnki.net。