

三峡库区消落带土壤在周期蓄水影响下的磁性变化

朱宏伟^{1,2}, 贺秀斌¹, 唐强^{1,2}, 郭丰^{1,2}, 胡云华^{1,2}

1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 对三峡库区消落带内紫色土土壤磁化率空间分布特征及土壤粒径组成进行了系统性研究。重点探寻在长时间高压淹水与高温干旱交替变化条件下, 消落带土壤磁化率特性的演变过程, 阐明磁化率特性与土壤粒径空间分布的特定相关关系。研究表明, 库岸坡地土壤经反季节周期性淹没后, 其磁化率值宏观上沿着不同海拔自高到低先缓慢下降, 维持一段平稳状态后再急速抬升。根据土壤粒径分布的变化规律可推断, 此现象是在高水位时江水冲蚀以及低水位时雨水侵蚀等作用引起的水土流失过程中, 土壤在坡面中上部侵蚀、分选及在下部堆积等多因素迭合造成的。

关键词 三峡库区; 消落带; 土壤磁化率; 土壤粒径分布; 紫色土

中图分类号 S157

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.09.001

Soil Magnetism Variations Under the Influence of Periodic High Water Level in the Water-level-fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir Area

ZHU Hongwei^{1,2}, HE Xiubin¹, TANG Qiang^{1,2}, GUO Feng^{1,2}, HU Yunhua^{1,2}

1. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The spatial distribution of the purple soil magnetic susceptibility and the soil particles composition within the water-level-fluctuating zone of the Three Gorges reservoir area in Yangtze River is systematically studied. The characteristics evolution of soil magnetic susceptibility is a key point in the condition of long alternating time of hot, dry, and high-pressure flooding. And next, the distribution of soil particle size is clarified in order to reflect the specific relationship between soil magnetic susceptibility and different sizes. SM-30 portable magnetic susceptibility meter and Bartington MS2 magnetic susceptibility meter are used to determine soil magnetism, and Malvern Mastersizer 2000 laser particle size analyzer is used to derive soil particle volume percentage. After that, the essential reason has been discussed and analyzed based on the relationship between them. It has been demonstrated that firstly, the magnetic susceptibility slowly declines from high level to lower part along different macro-level altitude. And then a rapidly uplift will suddenly happens until more than $120 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ after the stable value area at the middle level. The reason for that is reasonable inferred that the upper slope suffers from the river erosion with high water level, and from the rain erosion with low water level. At the same time, the lower slope is under the control by the consequences of superposition, such as soil accumulation and many other factors.

Keywords Three Gorges reservoir area; water-level-fluctuating zone; soil magnetic susceptibility; soil particle size distribution; purple soil

收稿日期: 2011-12-06; 修回日期: 2012-03-19

基金项目: 中国科学院西部行动计划(三期)项目(KZCX2-XB3-09-02); 国家自然科学基金项目(41171222); 《科技导报》博士生创新研究资助计划项目(kjdb201001-8)

作者简介: 朱宏伟, 博士研究生, 研究方向为土壤磁学, 电子信箱: hongwei_zhu@imde.ac.cn; 贺秀斌(通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: A035100007M, S110006787M), 研究员, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持, 电子信箱: xiubinh@imde.ac.cn

0 引言

土壤是岩石圈表层与大气圈、水圈、生物圈长期相互作用的产物,在形成发育过程中记录了丰富的信息。土壤磁性可反映母质、气候、植被、水文和人类活动等综合信息,是研究土壤的一种有效途径。三峡水库自 2003 年开始实验性蓄水,在 2010 年蓄水达到了预期设计水位 175m,从此 30m 高程的消落带正式形成。消落带土壤将在每年 5—9 月的汛期出露,而在其余月份则大部分浸泡在江水中。此处是目前世界上面积最广、水位涨落幅度最大、人类活动影响最为频繁的消落带,面积超过 349km²。水位、水压变化造成消落带内原有陆生植被大部分消亡更新,土壤结构也发生了变化^[1]。同时,土壤磁性必然会随着土壤矿物、颗粒组成、孔隙度、紧实度、有机质含量等方面的变化而发生较大的波动。

土壤中存在多种主要磁介质,常见的有磁铁矿、磁赤铁矿、赤铁矿、针铁矿等,其形成和演变多与上述土壤指标关联,从而使得土壤磁性在宏观层面受到影响^[2]。通过研究土壤磁性可得到土壤受外在影响信息^[3]。此外,由于土壤磁性研究具有测量样品用量少、灵敏度高、分辨率高、重复性好、成本低、简便快速、对样品无破坏等优势 and 特点,所以非常适合做土壤结构及成分测量和评定^[4-5]。近年来,土壤磁性已成为考古、全球环境变化、古气候演变等领域的主要研究对象之一^[6-11]。但就目前来看,针对水库消落带土壤性质变化等问题,尤其是土壤磁性方面的基础性科学研究还远远不够^[12-14]。

1 研究案例

经慎重考虑,将研究区域选在重庆市忠县石宝寨镇新政村至共和村一线的沿江消落带,为三峡库区长江干流阳坡,在此共布设 10 条测线。研究区域靠近中国科学院三峡库区忠县水土流失与面源污染观测试验站,被国家选为库区环境治理试点地区。此处的土壤无论在种类上还是利用类型等方面,均具有一定的普遍性,适合开展基础研究工作。本研究区域人多地少,人地关系紧张,水土流失严重,森林覆盖率低,地质灾害频发,污染严重,属于长江上游生态脆弱区^[15]。同时,这里还是中国乃至世界较为特殊的生态功能区,其水土保持、水质保护和生物多样性维持等功能对投资庞大的三峡工程的长期安全运行、长江中下游的防洪与生态安全具有特殊、重要的战略意义^[16]。

本次研究测线的具体布置如图 1 所示。其左半部分为测量区域整体概况,而右半部分分别为新政村研究区和共和村研究区详图,图中虚线即布置的测线。

1.1 试验样品采集与处理

需在退水期即 5—9 月采集消落带内土壤样品,大致是按顺序自江边近水面处向高海拔处采样。选用捷克 ZH 公司的 SM-30 型磁化率仪,它在地理和地质研究方面用途广泛,特别是在野外地质勘探和快速实验室分析方面,可即时对岩石或岩心样品进行分析和分类。此外,它还可以在快速得出土壤体积磁化率数值(精确到 10⁻⁷SI),以便实时判断当地

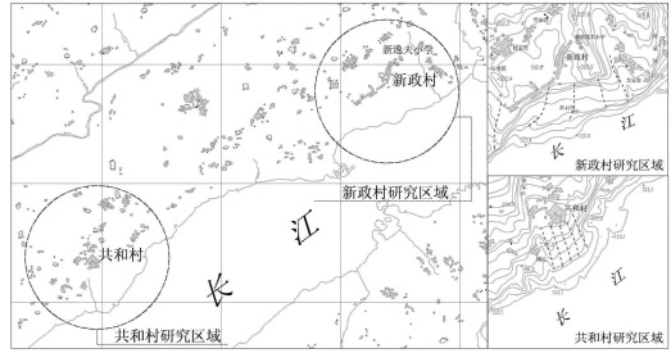


图 1 长江三峡库区土壤磁性研究区位置图

Fig. 1 Location map for the soil magnetic properties study area in the Three Gorges reservoir area

磁性分布趋势。通过现场测量可以初步判断土壤磁性强度趋势,随时决定是否增加采样点。此仪器对紧贴其背部测量区的土壤或岩石远比相隔一段距离的部分敏感得多,具体权重参数见表 1。

表 1 SM-30 型磁化率仪所测结果中
不同土壤深度所占权重

Table 1 Cumulative weight of different soil thickness based on the measured result using SM-30 magnetic susceptibility meter

| | | | | | | |
|----------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 土壤深度/mm | 1 | 2 | 5 | 10 | 16 | 24 |
| 占最终读数 百分比/% | 12.46 ^a | 23.02 | 46.39 | 68.81 | 82.35 | 90.82 |
| 土壤深度/mm | 35 | 50 | 70 | 100 | 500 | |
| 占最终读数 百分比/% | 95.65 | 98.09 | 99.17 | 99.70 | 100 | |

注:a 表示参照 SM-30 仪器使用说明。

Notes: "a" references to the SM-30 instrument user guide.

在新政村所属消落带内布设了 5 条测线,线距 50—100m,同测线各测点间相隔 2m 高程,且自 147—181m 贯穿整个消落带并向上延伸 6m 高程。这样不仅可以对消落带内土壤进行全面系统的调查,而且还能对背景值做相关调查取样。取样的具体方法是在每个测点清除表层植被后,先用 SM-30 型磁化率仪现场测量土壤表面的体积磁化率,并在附近同一高程处打 5 个环刀,留土壤以备后续研究土壤容重、含水量等指标。然后,在原测量处挖深 40cm 以上圆形坑,直径约 50cm,以便满足取样需求。并在坑内以 5cm 深度为 1 个单位,由浅入深测量和采样,逐步加深一直到 30cm。实际中,无论测量还是采样,对每个深度都需要进行至少 5 次,均匀在该深度环绕探坑 1 周。测量时,将便携式磁化率测量仪紧贴地表或相应深度的土壤,测量即可。取土也如现场测量一般环状取样,以便最大限度地防止偶然因素对最终结果的影响。在同一高程下选取样点主要考虑土地利用方式的多样性和空间分布的均匀性,每个表土样品均由 4—5 个按对角线

法采取的小样混合而成。铁质工具可用来挖探坑和取土样,但需去除与铁铲有过接触的土壤部分,剩余“干净的”样品才能被装入聚乙烯自封采样袋中,以避免磁性干扰。经过测算,现场采集 600g 湿润土壤即可满足日后的各种试验。

之后在共和村所属消落带中也选取 5 条测线,线距加密为 20m,相邻点距高程差仍为 2m。采样地位于中国科学院北京植物所植被恢复示范区,垂直于长江干流种有牛鞭草、狗牙根、双穗雀稗等水保植物,用做效果对比和试验示范。多年周期性涨水与退水的检验已证明了当地植被的返青速度远快于外围自然生长植被,具有较强的固土能力,而且此地较新政村采样区平坦。可得出结论,这里原生土壤的保存较新政村采样处更好。鉴于采样时新政村数据已经基本处理完毕,初步得出了结论,即此处消落带中的土壤磁性多数地区情况有相同特点:表层大于下层,浅层大于深层。值得注意的是,深层土壤磁性随海拔的变化趋势与表层相同,所以只采集表面 5cm 即足以较准确地描述消落带坡面土壤整体磁性的变化趋势。

充分利用共和村仍存在基本未被江水侵蚀的原状土的优势,在本区域内测量和采集表层样,方法类似新政村处。在选取具体采样点时还应注意避开明显的侵蚀,这是因为如果表层土壤尽失就将失去对照的严格性。另外,也应避开石制田坎附近的区域,因为这里泥沙往往淤积较厚,过厚的泥沙像隔层一样抵消了江水对表层土壤的作用。实际中需尽量寻找泥沙淤积较薄处小心剥去表层泥沙,待露出土表再行测量及采样。同时,还要在消落带之上不同利用类型土壤(包括林地,草地,耕地等)中各采 20 个以上的混合样。寻找典型土壤沉积区挖取近 2m 深土壤剖面进行现场测量及采样,以期调查当地沉积土壤情况,得到历史参考资料,为后续研究做准备。所有采回的土样在去除石头和植物根系等后,放在室内自然风干。待其完全干燥后磨碎,全部过 2mm 尼龙筛,以备多项磁性参数实验室测量之用;少部分还需再过 0.15mm 尼龙筛,进行有机质测量等。

1.2 试验分析

试验分为现场测量和实验室测量二部分,以后者为主。现场测量部分上文已有描述,在实验室测量质量磁化率则选用由英国 Bartington 公司生产的 MS2 型磁化率仪,它由磁化率读数表和可更换的多用途测量土壤和岩石磁化率的探头组成,采用了传统传感器和新的信号处理方法,能测出顺磁性、反磁性、铁磁性岩石的细微差别并精确地给出磁化率。

土壤磁性测量是非破坏性的,而且使用低频磁场以确保测量结果不受样品的导电性影响。探头具有温度补偿功能,能减小测量时产生的漂移,所以抗磁性值(负数)也可测量。测量时,每个土壤样品称量 10g 并放入专用柱状聚乙烯管中,随后放进测试台再用计算机控制读数表测量。

用 Malvern 激光粒度仪 Mastersizer2000 进行土壤颗粒组成分析,它利用物理学经典理论——激光的夫琅和费衍射原理测量和计算通过测量窗颗粒的粒度。该仪器性能稳定,测

量精度高,可靠性强,测量范围为 0.02—2000 μm 。

2 结果与分析

研究区域内土壤由侏罗纪沙溪庙组的紫色砂页岩发育而成,母岩属于沉积岩磁性很弱,所以一般情况下其所发育的土壤磁性也较弱,远不及火成岩风化产生的土壤,属低磁性土壤^[7]。一般来说,母岩风化越完全,土壤发育越好,颗粒越细的部分往往磁性越强^[18-19]。根据 Bartington MS2 型磁化率仪所得试验结果,消落带内土壤磁化率变化呈现了明显的规律性。如图 2 所示,图中的每条曲线都是新政村所属消落带内 5 条测线在相应深度磁化率数据进行算术平均而得。

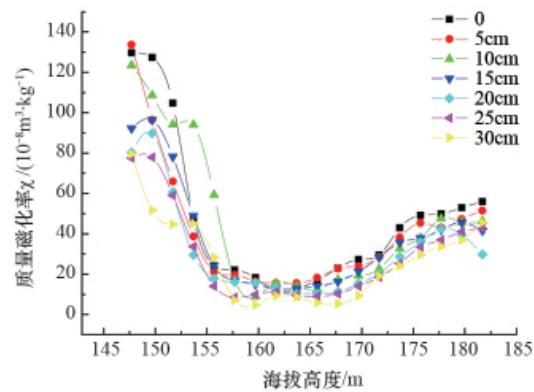


图 2 新政村不同深度土壤(低频)质量磁化率

Fig. 2 Soil (low frequency) mass magnetic susceptibility at different depths near the Xinzhen Village

整体来看,随着高度的降低海拔 181—173m 之间区域的质量磁化率 χ 有逐渐小幅下降的情况,但总体保持稳定,介于 $(30-60) \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ 之间;约从 171m 开始,随着高度的递减, χ 值开始发生明显的下降,当海拔降至 165m 附近时磁性逐渐稳定,约为 $20 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$;低于 157m 后,随着高度的降低质量磁化率迅速提高甚至超过 $100 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ 。可以明显看出,在大多数情况下深度越浅土壤磁性越大,反之亦然。但在较低海拔处虽然仍大体维持这个规律,但不同相邻深度的磁化率曲线变得更为发散,差距更大;而且曲线也显得相对杂乱,规律性没有 155m 之上时明显。

在共和村区段内所布设的 5 条测线(GH1—GH5)所测数据见图 3,土壤磁化率与海拔的关系虽然没有新政村所反映出的规律性明显,但同样存在着较为一致的趋势。

可见,质量磁化率在坡最上端(169—175m)与背景值(高于 175m)相近,约 $(20-30) \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$,中段缓缓下降至约 $(15-20) \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$,而海拔较低处尤其是 157m 以下逐步快速提高到 $100 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ 以上。与图 2 相比,消落带中部的 χ 低值较新政村不明显,其主要原因应是此处植被恢复更好,地势更加平坦。

为了讨论方便,将表土样品的颗粒分为 2—1mm、1—0.5mm、0.5—0.25mm、0.25—0.05mm、0.05—0.02mm、0.02—0.002mm 和

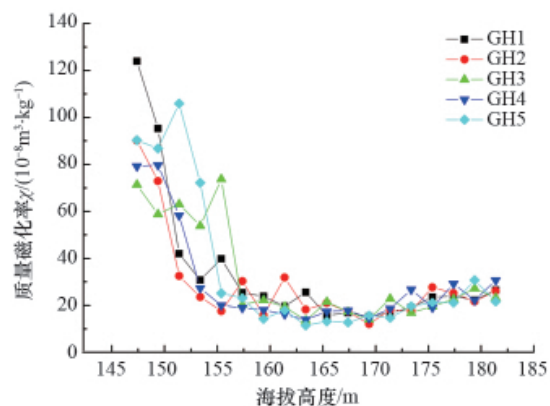


图3 共和村GH1—GH5号测线表土(低频)质量磁化率

Fig. 3 Surface soil (low frequency) mass magnetic susceptibility including from GH1 to GH5 near the Gonghe Village

<0.002mm 7个粒径组别。Malvern 激光粒度仪所测得的不同粒径的体积分数如图4所示,直观显示了新政村长江畔测区147—181m 高程中土壤粒径的分布规律。土壤颗粒组成数据的测量范围不仅基本覆盖全部消落带区段,并兼顾了不同类型土壤的混合样平均值,还超过最高水位(175m)达6m,这是以调查当地土壤背景情况为目的,以便比较和分析。

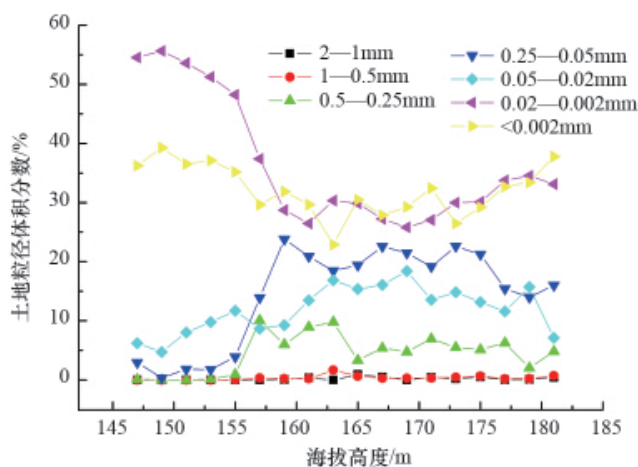


图4 共和村表土不同粒径体积分数

Fig. 4 Bulk fraction of surface soil particle size near the Gonghe village

可见,相对较大粒径即粗砂粒(2—1mm,1—0.5mm)的体积分数只在很低范围内自由波动,随着海拔的变化并没有表现出明显的趋势性;而中细砂粒(0.5—0.25mm,0.25—0.05mm,0.05—0.02mm)的体积分数随海拔的增高先逐渐升高再缓慢降低;而小粒径的粉粒和黏粒(0.02—0.002mm、<0.002mm)则与中细砂粒3条曲线的变化趋势呈镜像,即随海拔的升高先降低再升高。土壤不同粒径与土壤磁化率的关系如表2所示。

可见,粒径为2—1mm和1—0.5mm时,土壤磁化率与土

表2 土壤磁化率与土壤不同粒度的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between soil magnetic susceptibility and the soil different particle sizes

| 粒径组/mm | 粒径与测线1 | 粒径与测线2 | 粒径与测线3 | 粒径与测线4 | 粒径与测线5 |
|------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 2—1 | -0.321 ^c | -0.444 ^a | -0.557 ^b | -0.461 ^c | -0.521 ^b |
| 1—0.5 | -0.435 ^b | -0.553 ^a | -0.645 ^a | -0.526 ^b | -0.573 ^b |
| 0.5—0.25 | -0.695 ^a | -0.786 ^a | -0.738 ^a | -0.641 ^a | -0.673 ^a |
| 0.25—0.05 | -0.825 ^a | -0.865 ^a | -0.883 ^a | -0.721 ^a | -0.829 ^a |
| 0.05—0.02 | -0.761 ^a | -0.763 ^a | -0.666 ^a | -0.679 ^a | -0.768 ^a |
| 0.02—0.002 | 0.828 ^a | 0.927 ^a | 0.925 ^a | 0.794 ^a | 0.908 ^a |
| <0.002 | 0.798 ^a | 0.722 ^a | 0.645 ^a | 0.564 ^b | 0.603 ^a |

注:a表示在0.01水平上显著(双尾检验);b表示在0.05水平上显著(双尾检验);c表示在0.069水平上不显著(双尾检验)。

Notes: a, b and c mean correlation coefficient is significant at 0.01 level, 0.05 level and 0.069 (2-tailed), respectively.

壤粒径部分基本没有相关性;0.5—0.02mm的3组中,磁化率与粒径呈较明显的负相关关系;0.02—0.002mm与<0.002mm组中,磁化率与粒径呈明显正相关关系。如令 y 为磁化率, x 为粒径百分率,则在0.02—0.002mm组中,线性回归方程为 $y=1.828x-35.748$ 。

3 讨论

土壤的机械组成和颗粒分布与岩石风化成土过程有密切联系。磁性矿物在高磁性土壤中的破坏、新生及在不同粒径中的分配与低磁性土壤截然不同。前者多是由强磁性岩石发育而成,其磁性主要产生于母岩中原有磁铁矿或磁赤铁矿等。母岩越破碎,磁性矿物也就破坏得越严重,所以在只经历过物理风化的土壤中,砂粒等粗颗粒部分磁性较高。如果成土过程中也经历了化学风化,则在细粒级中原生磁性矿物损耗殆尽,可能产生次生磁性矿物,这样细粒部分磁性会有少许回升。因此,高磁性土壤中石砾、砂粒部分的磁性最强,粉粒组(尤其是0.01—0.005mm)磁性较弱,而黏粒组(<0.002mm)可能更弱,也可能比粉粒稍强。后者母岩大多是沉积岩或变质岩,包括大多数自形土、草甸土和所有水成土。其土壤内磁性多数是由次生矿物组成,而这些化学风化的产物主要集中在细粒组(<0.01mm),其中黏粒部分最为明显。这就造成土壤颗粒越细,磁性越强的结果。

消落带上部土壤由于年际浸泡时间短,总浸水时间不长,其质地和性质与地势更高的土壤相比应无明显的变化,故某种程度上即可代表当地土壤的背景情况。单纯从土壤粒径体积分数空间分布来看,30m高程范围的三峡消落带内,与坡上部相比,坡中部及中上部黏粒、粉粒粒级的细粒土壤在明显减少,土壤正在粗骨化。而中下部及底部则不然,土壤中细粒成分明显比背景值增高。这应该是经过冲刷、淘洗等过程,土壤向低处搬运并堆积造成的。由于细颗粒土壤的抗冲性更差,所以底部堆积的土壤细颗粒占有更大的比例。

根据土壤磁化率特征可将消落带分为 3 个部分:在高于 165m 高程处,磁化率比较稳定,一旦低于 165m 则开始缓慢下降,若进入 157m 以下区域,磁性将快速增长。虽然具体数值与采样区域地势、土壤利用类型等因素关系密切而不尽相同,但对不同地点样品所测得的数据具有相似的规律。在新政村,当地土壤的磁性背景相对较高,但是消落带中地势较陡且在枯水期当地农民自发耕种等原因必然造成水土流失相对严重,使更多的细颗粒土壤从坡的中上部流失到下部,这也加重了下部的堆积。因此,此处介于 157—165m 的土壤磁性下降得较共和村更快。

另外,粉粒和黏粒的体积分数与磁性呈正相关。这应是研究区域内的紫色土属弱磁性土壤的本质所造成的。它的磁化率值一般都会随着成土作用的加强,以及年代的积累而逐渐增大,所以细粒部分磁性很可能更强。以此为前提,在土壤磁性标度下即可清晰观测出,带较强磁性的细颗粒土壤在消落带中上部的流失以及在坡中下部的聚集。

4 结论

经过长年干湿交替作用,消落带中陆生植被大量死亡,水生植被尚未形成,加上当地居民在退水期对消落带土地的不合理开发利用,造成土地出露时被雨水冲刷,浸泡时被水流波浪侵蚀。因为当地土壤是小粒径,磁性相对更强,在蓄水前当地磁性背景值相对稳定的前提下,土壤磁性逐渐变强的区域可以认为其土壤中小颗粒的体积分数也在增加。一般来说,小颗粒土壤抗冲性相对于粗粒而言更差,会更快地向坡下移动并产生一定程度的富集。研究表明,土壤在侵蚀、分选和堆积后造成了坡下细颗粒土壤成分增大,土壤宏观磁性提高。综上所述,三峡库区蓄水虽不足 10 年,但已产生了严重的水土流失后果,消落带中的水保措施亟待完善。

致谢 本文得到了龙翼、鲍玉海、严冬春的很大帮助,文中有关土壤磁性的数据均在中国科学院地质与地球物理研究所古地磁实验室测得,测量过程中得到郝青振副研究员和张春霞副研究员的大力支持,在此表示衷心感谢。

参考文献 (References)

- [1] 刁承泰, 黄京鸿. 三峡库区水位涨落带土地资源的初步研究 [J]. 长江流域资源与环境, 1999, 8(1): 75-80.
Diao Chengtai, Huang Jinghong. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 1999, 8(1): 75-80.
- [2] Maher B A, Alekseev A, Alekseeva T. Magnetic mineralogy of soils across the Russian Steppe: Climatic dependence of pedogenic magnetite formation [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003, 201(3-4): 321-341.
- [3] Thompson R, Oldfield F. *Environmental magnetism* [M]. London: Allen and Unwin Press, 1986.
- [4] 张凤宝, 杨明义, 赵晓光, 等. 磁性示踪在土壤侵蚀研究中的应用进展 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(7): 751-756.
Zhang Fengbao, Yang Mingyi, Zhao Xiaoguang, et al. *Advances in Earth*

Science, 2005, 20(7): 751-756.

- [5] Bloemenda J, Liu X M. Rock magnetism and geochemistry of two pleistocene Chinese loess-palaeosol sequences-implications for quantitative palaeoprecipitation reconstruction [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 226(1-2): 149-166.
- [6] Jordanova N, Petrovsky E, Kovacheva M, et al. Factors determining magnetic enhancement of burnt clay from archaeological sites [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2001, 28(11): 1137-1148.
- [7] 杨萍果, 毛任钊, 翟正丽. 土壤磁性的应用研究进展 [J]. 土壤, 2008, 40(2): 153-158.
Yang Pingguo, Mao Renzhao, Zhai Zhengli. *Soil*, 2008, 40(2): 153-158.
- [8] 卢升高, 白世强. 杭州城区土壤的磁性及磁性矿物学及其环境意义 [J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 762-769.
Lu Shenggao, Bai Shiqiang. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(3): 762-769.
- [9] Hannam J A, Dearing J A. Mapping soil magnetic properties in Bosnia and Herzegovina for landmine clearance operations [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 274(3-4): 285-294.
- [10] Maher B. Magnetic properties of some synthetic sub-micron magnetites [J]. *Geophysical Journal Royal Astronomical Society*, 1988, 94(1): 83-96.
- [11] Memut A R. Historical development in soil micromorphology imaging [J]. *Journal of Mountain Science*, 2009, 6(2): 107-112.
- [12] 牛志明, 解明曙. 三峡库区水库消落区水土资源开发利用的前期思考 [J]. 科技导报, 1998, 16(4): 61-62.
Niu Zhiming, Xie Mingshu. *Science and Technology Review*, 1998, 16(4): 61-62.
- [13] 张金洋, 王定勇, 石孝洪. 三峡水库消落区淹水后土壤性质变化的模拟研究 [J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 120-123.
Zhang Jinyang, Wang Dingyong, Shi Xiaohong. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(6): 120-123.
- [14] 万成炎, 马沛明, 常剑波, 等. 三峡水库生态防护带建设的初步探讨 [J]. 长江科学院院报, 2009, 26(1): 9-11, 32.
Wan Chengyan, Ma Peiming, Chang Jianbo, et al. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2009, 26(1): 9-11, 32.
- [15] 梁福庆, 郑根保, 张平. 简论三峡库区移民开发的资源及环境可持续发展利用 [J]. 水利经济, 2004, 22(2): 54-58.
Liang Fuqing, Zheng Genbao, Zhang Ping. *Water Economy*, 2004, 22(2): 54-58.
- [16] 梁福庆. 三峡库区生态环境保护回顾与思考 [J]. 重庆三峡学院学报, 2009, 25(2): 17-20.
Liang Fuqing. *Journal of Chongqing Three Gorges University*, 2009, 25(2): 17-20.
- [17] 簧成敏, 龚子同. 热带土壤发育过程中土壤磁化率特征研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(4): 63-68.
Huang Chengmin, Gong Zitong. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2000, 20(4): 63-68.
- [18] Maher B A, Taylor R M. Formation of ultrafine-grained magnetite in soils [J]. *Nature*, 1988, 336: 368-370.
- [19] 俞劲炎, 卢升高. 土壤磁学 [M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1991: 52-62.
Yu Jinyan, Lu Shenggao. *Soil magnetism* [M]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 1991: 52-62.

(责任编辑 孙秀云, 马骁骁)