

# Review of Research and Application of Soil Magnetic Susceptibility

Fujun Xia

School of Tourism and Geographical Science, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan  
Email: 1099730198@qq.com

Received: Sep. 22<sup>nd</sup>, 2019; accepted: Oct. 7<sup>th</sup>, 2019; published: Oct. 14<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Soil magnetic susceptibility is an important indicator reflecting the basic characteristics of magnetic materials in soil and magnetic strength. The use of soil magnetic susceptibility is a simple, fast, economic and accurate method for studying soil science and environmental science. In recent years, there have been more and more reports on the research and application of soil magnetic susceptibility, and at the same time, great research results have been achieved. This paper systematically discusses the research progress of soil magnetic susceptibility from the application of magnetic susceptibility in soil science, loess-paleosol, sediment, soil pollution, soil erosion and paleoclimate environmental change, and a brief analysis of the development trend of soil magnetic susceptibility.

## Keywords

Magnetic Susceptibility, Environmental Magnetism, Soil

---

# 土壤磁化率的研究与应用综述

夏富君

云南师范大学旅游与地理科学学院, 云南 昆明  
Email: 1099730198@qq.com

收稿日期: 2019年9月22日; 录用日期: 2019年10月7日; 发布日期: 2019年10月14日

---

## 摘 要

土壤磁化率是反映土壤中磁性物质的基本特征及磁性强弱的重要指标,运用土壤磁化率是研究土壤科学、环境科学等方面的一种简便快捷、经济、准确的方法。近年来,关于土壤磁化率研究与应用的报道越来越

越多,同时也取得了巨大的研究成果。本文主要从磁化率在土壤学、黄土-古土壤、沉积物、土壤污染、土壤侵蚀及古气候预估环境变化等方面的应用出发,系统地论述土壤磁化率的研究进展,并就土壤磁化率的发展趋势作简要的分析。

## 关键词

磁化率, 环境磁学, 土壤

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

土壤是人类赖以生存的重要基础,为人类的生产生活提供重要的物质保障。但是随着人类不合理的生产活动以及自然环境的破坏等因素,造成土壤受到不同程度的破坏。因此,对土壤的研究及保护就显得尤为重要。在1954年召开的第五次国际土壤学大会上 Henin S.和 Le Borgne 两位国际学者首次系统地介绍了土壤磁性的研究工作[1],之后土壤磁性则用于土壤学研究之中,并且逐步得到发展。到了1980年 Thompson [2]等在发表的学术论文中介绍了土壤磁性在环境问题研究中的应用,被称为环境磁学发展的里程碑。自从环境磁学这一新兴学科问世以来,因其具有简便快捷、灵敏度高、经济、准确等优点,可以避免传统的理化分析方法中带来的诸多不便,因此被广泛应用于土壤学、环境学、生态学等方面[2] [3] [4]。环境磁学的工作原理是利用土壤、岩石、水体等物质自身携带磁性矿物这一特性进行磁测与分析,进而揭示土壤成土过程、生态环境变化以及人类活动变迁等信息[5] [6]。环境磁学的大力发展与应用有力地推动了国外土壤磁化率的研究发展,并取得了一系列学术研究成果。近年来,随着现代磁学设备和技术的进步,国外学者利用磁化率原理和方法在土壤发生学、土壤污染诊断、矿产资源勘探、沉积学、古气候与环境变化、湖泊科学、海洋科学等方面的应用已取得较大进展,并且利用磁化率来探索全球环境变化已是其研究的新方向之一。

中国的土壤磁学研究起步于20世纪70年代末,由俞劲炎首先将土壤磁学理论引入中国的土壤研究之中,并详细论述了土壤磁学的理论及研究方法[7]。在20世纪80年代初,我国研制出了WCL-1型磁化率测量仪并投入使用,因此许多科研单位开始开展土壤磁性研究,这就为我国土壤磁学的科研工作奠定了基础。随后,俞劲炎等编著的《土壤磁学》一书的出版,标志着具有中国特色的土壤磁学学科体系初步建立。随着我国学者大量地借鉴国外土壤磁学的研究成果以及引进国外先进的土壤磁化率研究设备,我国的土壤磁学研究工作也是硕果累累。尤其在利用土壤磁化率来研究黄土-古土壤方面,我国学者的研究成果是比较多,也是比较领先的。除此之外,我国学者对国内不同土壤类型的土壤磁化率也做出了详细的调研与统计,这对我国的土壤磁学研究也是一个重要的突破。

随着经验、技术的不断进步,土壤磁学的研究逐渐深入,其在土壤科学、环境科学等研究中被广泛应用[8]。在土壤学、黄土-古土壤、沉积物、土壤污染、土壤侵蚀及古气候预估环境变化等方面取得了巨大的研究成果[9] [10] [11] [12]。

## 2. 土壤磁化率的原理

磁化率是物质在外磁场中受感应产生的磁化强度与外加磁场的比值,是反映土物质磁化难易的指标,也是物质磁性强弱的指标[13]。而土壤磁化率是反映土壤中磁性物质的基本特征及磁性强弱的重要指标。

土壤中的磁性物质可分为顺磁性物质、抗磁性物质和铁磁性物质这三种基本类型，这些磁性物质主要来源于自然界和人类活动。经大量研究成果表明，土壤磁化率受气候、母质类型、土壤水分、有机质含量、土壤容重、土壤 pH 等因素的影响。由此可见，土壤磁性与土壤的成土因素和成土过程紧密相关，是二者的综合反映。

土壤磁化率可以用容积磁化率或质量磁化率表示。土壤容积磁化率就是土壤在外磁场中受感应产生的磁化强度与外加磁场的比值，由于磁化强度与磁场强度的量纲相同，因此其比值即容积磁化率是无量纲。在环境磁学中通常用质量磁化率来表示其磁性的强弱，即是容积磁化率与密度的比值。这两种土壤磁化率参数从不同的角度反映了土壤磁性矿物的基本特征。此外，土壤频率磁化率也能表征土壤磁性矿物的颗粒大小等特征，能够反映土壤中超顺磁性颗粒的存在和相对含量。

随着现代电子技术的快速发展，国际上已有一系列快速、轻便、准确的磁测仪器问世，并很好地服务于磁学研究。在我国，自 1979 年俞劲炎首次系统的将国外土壤磁学研究引入之后，我国的土壤磁学得以发展，并在上世纪 80 年代初研制了 WCL-1 型土壤磁化率仪，该仪器主要用于野外土壤磁化率的测定。现在最常用的室内土壤磁测仪器是英国 Bartington 仪器公司生产的 MS-2 型双频磁化率测量仪，这种仪器可同时测得土壤样品的高频磁化率和低频磁化率，采用该仪器测定具有高灵敏度、高分辨率、简便快速、重复性好、低成本等优点。

### 3. 土壤磁化率的应用领域

#### 3.1. 土壤学研究

在 1954 年的第五次国际土壤学大会上，Henin S.和 Le Borgne 两位国际学者首次系统的发表了有关土壤磁性的研究报告。报告称在土壤中表土的磁化率具有增强的现象，并认为这与土壤中亚铁磁性矿物的含量变化有关，在自成型土壤质地中，黏粒成分的磁性是最强的[1]。这就是土壤磁学研究的开端。此后，又有学者研究了夏威夷砖红壤及西伯利亚土壤的磁性特征，并取得相关的研究成果[14]。从 20 世纪 70 年代开始，Vadyunina [15]等系统的研究了苏联主要土壤剖面的磁化率变化，发现土壤磁化率分布特征能反映土壤成土过程、土壤粒度等特征，并且具有显著的地带性分布规律。Dearing [16]等在英国 Oxfordshire 地区利用土壤磁测的方法对该地区坡面土壤进行剖面磁化率测定，并依据自然土壤表层和下层的磁性差异理论确定了土壤运移的特征。Williams [17]在研究苏格兰地区 Loch Dee 盆地中的土壤磁化率时，发现土壤磁化率的变化与土壤里的重金属含量存在一定的相关性。

近些年来，随着国外土壤磁化率的不断研究以及经验、技术的不断进步，许多国内学者也开展了大量的土壤磁化率方面的研究工作，并取得巨大的研究成果。其中，俞劲炎等编著的《土壤磁学》一书的问世，标志着我国在土壤磁学方面的研究及其学科体系已初步建立起来。在此基础上，我国土壤磁学的研究又有了新的突破。张振卿[18]等对殷墟地区 3 个土壤剖面进行岩性分析及磁化率测定，研究结果表明，该地区的土壤磁化率总体变化较大，土壤磁化率从表层向下逐渐降，并且土壤磁化率变化与土壤岩性具有较好的一致性。陈秀玲[19]等对福州盆地不同土地利用方式下的土壤磁化率进行测定，结果显示，土壤的磁化率高，频率磁化率低的特征，表明该地区土壤中有较多人为因素产生的粗粒磁性矿物颗粒物输入。刘剑刚[20]等对辽东山地冰缘地貌土壤进行磁化率及粒度的测试分析，结果表明，土壤磁化率高低与粒径大小存在着显著的相关关系，即粒度越粗、原生矿物含量越大，土壤的质量磁化率就越高，而粒度越细、单畴、多畴、超顺磁颗粒组分越多，土壤的频率磁化率就越高。任建光[21]对北京地区表层土壤磁化率的分布特征进行了研究，结果表明，不同地区的土壤剖面磁化率曲线存在着很大的差异，认为土壤的成土母质、成土作用及周围的环境状况对其有很大的影响。

### 3.2. 黄土 - 古土壤研究

黄土是第四纪风力搬运堆积的土状物质,多分布于干旱、半干旱区。我国的黄土高原是由多层黄土和古土壤叠覆形成的,是记录第四纪气候变化情况的一个重要信息载体[22]。随着土壤磁学的发展,磁化率成为黄土 - 古土壤序列古气候研究的一个重要指标。在黄土 - 古土壤方面,国内外学者利用土壤磁学进行了大量的研究。

Heller [23] [24]等利用古地磁测年法等技术,推断出黄土高原的形成年代,并将黄土与古土壤的磁化率特征进行对比,从而得到黄土 - 古土壤磁化率变化曲线,这对于研究该序列的古气候变化具有重要参考。Mullins [25]认为干冷气候条件下形成的黄土其磁化率较低,温暖湿润气候条件下形成的古土壤其磁化率较高。而 Kukla [26]等认为是物源的不同,导致了黄土与古土壤的磁化率产生差异。Maher [27]等在黄土高原上采集了不同类型的土壤剖面样品,对样品进行磁化率测定,通过西北部和东南部铁磁物质含量与年均降雨量的变化趋势,可以重新模拟间冰期的降雨量。

我国学者对黄土 - 古土壤的研究也取得了丰富的学术成果。安芷生[28]等通过对甘肃北塬、陕西洛川、陕西蓝田的黄土剖面进行磁测,结果显示,这些黄土剖面的最近 13 万年的磁化率曲线与深海氧同位素曲线有很好的对比,进而揭示了全球百年-千年尺度的气候变化,同时也证明了土壤磁化率可作为古环境与古气候重建的有力依据[29] [30]。由此可见,磁化率可以作为研究黄土 - 古土壤序列古气候的重要指标。王勇[31]等对祁连山东段黄土 - 古土壤沉积物进行磁测,发现沉积物中主要的磁性矿物是磁铁矿型矿物,而土壤磁化率的增强与黄土 - 古土壤序列并不匹配,且存在着由剖面底部向上逐渐升高的趋势,这可能是由磁性颗粒物粒度变化或来源相关的磁性颗粒含量的变化所引起的。邓成龙[32]等对黄土高原地区表层土壤进行磁化率测定,发现该地区的土壤磁化率与降水、温度等气候条件具有显著的相关性。对于黄土 - 古土壤的磁学探索,至今学者们都有着不同的理解与假设,尚无定论,因此在这方面有待于进一步深入的研究。

### 3.3. 沉积物研究

利用磁化率在河流、湖泊及海洋沉积物等方面的研究,国内外学者也取得了大量的研究成果。Eriksson [33]等对坦桑尼亚中部的 Haubi 湖浅水沉积物的磁性进行了测定,结果发现沉积物磁化率的变化与当地人类活动所造成的土壤侵蚀程度显著相关,并得出侵蚀物的来源及近百年来侵蚀程度的变化。冯钰婷[34]等对近 8000 年来珠江口的沉积物进行了磁测,结果发现,距今 8000~3000a 沉积物的磁化率呈现下降趋势,表明随着东亚夏季风减弱,输送到珠江口的陆源沉积物减少。罗俊[35]等通过对渭河流域上游、中游及下游的三个剖面的沉积物磁化率各向异性研究,发现了滞留沉积物的磁组构特征,即渭河的滞留沉积物磁化率椭球体的三大主轴方向及三轴比值与沉积物磁性颗粒的空间排列分布方式相关。朱旭旭[36]等在闽江流域采集了 43 个表层沉积物样品,并进行了磁学参数分析,结果显示,低频磁化率和高频磁化率分别为  $0.79 \times 10^{-8} \sim 24.97 \times 10^{-8}$ 、 $0.74 \times 10^{-8} \sim 24.80 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,比长江、黄河的表层沉积物磁化率低一个数量级,并指出磁化率可以作为现代沉积物风化程度的替代指标。周晓红[37]等对渭河河漫滩沉积物进行了磁化率测定,结果表明磁化率的低值对应的是较粗的沉积物颗粒以及温暖的气候环境,而且磁化率的大小取决于每次沉积时的洪水动力大小。

利用磁化率来研究湖泊和海洋沉积物,对于反演古气候、古环境变化以及对未来全球气候变化预测具有重要的作用。殷勇[38]等对云南中甸纳帕海湖泊沉积物进行了磁测,从而揭示出纳帕海 6 ka 以来的环境演化过程,这对当地的古气候与环境演变研究具有重大意义。杜婧[39]等对青海湖湖东沙地全新世风成沉积物进行磁测,结果发现,沉积物的剖面磁化率总体表现为古土壤层最高、弱发育古土壤层次之、风成砂层最低的规律;并基于沉积物剖面磁化率以及粒度特征分析得出,可将青海湖湖东沙地全新世以

来气候环境划分为 10 kaBP 以前冷干气候、10~4 kaBP 暖湿气候、4 kaBP 至今, 又趋于冷干气候这 3 个阶段。李艳红[40]等在研究新疆罗布泊湖盆沉积物剖面粒度与磁学特征时发现, 沉积物磁化率值的大小与粒度存在着相关性, 即沉积物的粘土组分、砂组分含量与磁化率呈正相关, 粉砂组分含量与磁化率呈负相关; 并指出该区域气候环境经历了暖干-暖湿-暖干-冷湿的变迁过程, 而最终向干旱趋势发展, 体现了冷期湿润、暖期干旱的特征。周鑫[41]等通过测定黄东海陆架区 81 个点位表层沉积物的磁化率, 结果表明, 黄海北部磁化率较低, 黄海南部及东海磁化率较高, 并在特定的区域沉积物磁化率受相应物源、沉积动力及气候的影响, 因此具有重建沉积物物源以及短时间尺度古气候演化历史的潜力。

### 3.4. 土壤污染研究

土壤是人类赖以生存的物质基础, 对人类社会的发展极为重要。但随着人类社会的快速发展, 人们在生产生活中也出现了大量的生活垃圾、汽车排放的尾气、工业“三废”、化肥农药滥用等现象, 这在不同程度上对土壤造成污染, 破坏土壤资源。近些年来, 为解决这一重大问题, 国内外许多学者利用土壤磁学监测技术来探究土壤污染, 以提高土壤质量, 促进农业发展。

国外学者利用土壤磁学在研究土壤污染方面取得了丰富的成果。Blundell [42]等对英国土壤表层样品进行磁测, 结果显示, 被污染样品的磁性参数与距城区的距离呈负相关, 而与土壤 Cu、Pb、Zn 元素的含量呈正相关。而 Hay [43]等在对英格兰地区 0~15 cm 表层土壤磁测时, 发现化石燃料燃烧、工业粉尘等人类活动产生的细小颗粒通过大气沉降到土壤表层, 从而使表层土壤磁化率明显增大; 再利用低频磁化率大于  $38 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  和频率磁化率小于 3% 两个指标, 最终划分出了土壤污染的区域和范围。Muxworthy [44]通过研究据发现, 工业生产会释放大量的具有磁性的污染物, 从而会造成工业区的土壤磁化率值增大。

国内学者对土壤污染的监测与分析结果表明, 土壤磁化率在环境污染研究方面得以广泛的应用。近年来, 国内大量学者分别对北京、上海、南京、武汉等大城市的土壤磁化率和重金属含量进行了测定及分析, 发现土壤磁化率与重金属含量之间存在着一定的相关性, 并且土壤磁化率可以有效地指示土壤污染的程度, 同时还可以确定土壤污染的范围, 这就为土壤污染治理工作提供了科学依据。此外, 欧阳婷萍[45]等对在珠江三角洲范围内选取的 300 件农业土壤样品进行磁化率测定, 结果发现土壤磁化率具有明显的空间分异特征: 南高北低、中心区高东西两翼低; 同时指出土壤类型、土地利用类型、农业灌溉方式等是影响该区域农业土壤磁化率高低的主要因素, 并且重金属污染对农业土壤的磁性具有明显的增强作用。由此可见, 土壤磁化率可以指示土壤污染状况, 在土壤污染防治方面起到了重要的作用。

### 3.5. 土壤侵蚀研究

土壤磁学已在土壤学、黄土-古土壤、沉积物、土壤污染这些方面取得了巨大的成就, 与此同时, 在土壤侵蚀方面也取得了许多研究成果。利用土壤磁化率来研究土壤侵蚀, 主要是通过磁化率仪测定之后, 对比土壤侵蚀前后的磁化率变化, 从而可以判定土壤侵蚀的强度。国内外学者在这方面的研究已经取得了较大进展。

国外学者利用磁性示踪剂的方法对流域内的土壤侵蚀进行了研究。Oldfield [46]等对英国西南部 Jackmoor 河流域进行了磁性示踪试验, 比较了悬移物和潜在侵蚀源地物质的磁性参数, 初步判断出其侵蚀的泥沙主要来自于耕地表土, 并由耕地的溅蚀和面蚀产生。E. Ventura J.R. [47]等利用磁性示踪剂, 定量化模拟研究小区内由水力侵蚀引起的土壤侵蚀、沉积空间分布, 并在试验中发现侵蚀的土壤和示踪剂的浓度在不同的降雨和放水条件下具有差异性。

国内学者在这方面做了相关的研究。朱宏伟[48]对三峡库区消落带紫色土的磁化率进行测定, 发现三峡库区蓄水虽然不足 10 年, 但已经出现了严重的水土流失现象。董元杰[12]等在对鲁中山区典型小流域

坡面的土壤磁化率进行测定, 结果发现, 从坡面上部至下部, 土壤磁化率总体表现为上高下低的变化趋势, 并指出土壤磁化率与土壤侵蚀强度呈反相关关系; 同时也说明坡面不同部位的土壤磁化率高低可以反映出土壤侵蚀强度的空间分异特征。刘龙华[49]等对南方山地地区的黄壤坡面表层土壤磁化率进行测定, 结果显示, 坡面表土磁化率与坡度呈显著的负相关关系, 表现为随坡度的增大土壤磁化率逐渐降低的变化特征; 并指出坡度是影响坡面表土磁化率变化的重要因素之一。王小刚[50]等对四川中部丘陵区紫色土坡面土壤进行理化性质和磁化率测定, 结果表明, 随土壤侵蚀强度的增加, 坡面上部和中部土壤理化性质的演变特征存在着差异, 并指出随土壤侵蚀强度的增加, 表层土壤的磁化率有所降低。濮励杰[51]等在研究坡度与土壤表层磁性富集系数的关系时发现两者之间呈现显著的负相关关系, 即随坡度的增大, 土壤表层磁性的富集系数减小, 这说明坡地不同部位表土磁化率的变化可以用来表征这些部位的土壤侵蚀情况。

综上所述, 国内外许多学者将磁测技术应用于坡面土壤侵蚀的研究中, 进而为探究坡面土壤侵蚀的空间分异特征提供依据。即在坡面土壤侵蚀研究中, 坡面不同空间部位的土壤磁化率高低可以反映土壤侵蚀强度的空间分异特征。因此, 土壤磁学的应用与发展, 为研究土壤侵蚀过程及其空间分异提供了新思路与新方法。

#### 4. 土壤磁化率的发展趋势

土壤磁化率广泛应用于土壤研究中, 它主要利用现代磁学理论、方法与技术手段来研究土壤, 阐明成土过程中土壤磁性发生变化的规律。土壤磁化率是研究土壤磁学的一个重要参数, 它能够反映出土壤中磁性物质的基本特征及磁性强弱的特征, 进而指示全球气候变化、环境变迁和人类活动等综合信息。大量研究成果表明, 土壤磁化率受气候、母质类型、土壤水分、有机质含量、土壤颗粒组成等因素的影响。由此可见, 土壤的磁性是成土因素和成土过程的综合反映。因此, 在利用磁化率来研究土壤时, 要探讨其成土因素和成土过程对磁化率的影响, 进而揭示出土壤磁性发生变化的规律。

近些年来, 土壤磁化率的发展更迅速, 应用更广泛, 其研究与应用又增添了新的内容, 其发展趋势有以下几个方面:

1) 与“3S”技术相结合, 建立区域性乃至全球性的磁信息数据库。利用 GPS 精准定位, 再用 RS 获取遥感图像, 并实地进行土壤采样做实验, 得出磁化率数据, 最后再结合 GIS 进行磁化率数据的定量分析。这样就建立起了一套完整的磁信息数据库, 能够进一步研究区域性及全球性磁信息变化的机理, 为进一步全面科学地分析区域及全球气候和环境的变化提供条件。

2) 与环境污染研究相结合, 能够更有效的解决生态环境问题。土壤磁化率不仅可以应用到土壤污染的问题上, 也可以应用到水体污染、大气污染等方面。湖泊或海洋沉积物的磁性矿物的变化情况, 可以反映出水体是否存在污染以及污染的程度; 而大气受到污染后, 可以测算沉降到地面上的污染物的磁性参数, 以此来确定大气污染的程度, 并寻找有效途径去解决。

3) 应用土壤磁化率可以研究小流域内林分枯落物储量及最大持水量等。利用土壤磁化率来指示森林生态系统枯落物水源涵养功能, 从而可以建立起区域性生态环境的保护机制, 在这方面的研究还是比较新的。

#### 5. 结论

综上所述, 土壤磁化率在多个研究领域被广泛的应用, 并且取得了巨大的研究成果, 并且土壤磁化率还将继续发展和应用于更多的领域研究之中。土壤磁化率并非一个简单的磁学参数, 它是多种因素共同作用的综合信息, 能否精确解释土壤磁化率的变化机制, 其前提就是必须精确地研究相关地质与环境演变过程。随着土壤磁化率的发展及与其他学科的相互渗透, 能够进一步为全球环境变化的研究提供便利。

## 参考文献

- [1] Henin, S. and Le Borgne, E. (1954) On the Magnetic Properties of Soils and Their Pedological Interpretation. *5th International Congress of Soil Science*, Leopoldville, Vol. 2, 13.
- [2] Thompson, R., Stober, J.C., Turner, G.M., et al. (1980) Environmental Applications of Magnetic Measurements. *Science*, **207**, 481-486. <https://doi.org/10.1126/science.207.4430.481>
- [3] Dankoub, Z., Ayoubi, S. and Khademi, H. (2012) Spatial Distribution of Magnetic Properties and Selected Heavy Metals in Calcareous Soils as Affected by Land Use in the Isfahan Region, Central Iran. *Pedosphere*, **22**, 33-47. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60189-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60189-6)
- [4] Zawadzki, J., Magiera, T., Fabijanczyk, P., et al. (2012) Geostatistical Dimensional Integration of Measurements of Soil Magnetic Susceptibility. *Environmental Monitoring and Assessment*, **184**, 3267-3278. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2187-3>
- [5] 张春霞, 黄宝春. 环境磁学在城市环境污染监测中的应用和进展[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(3): 705-711.
- [6] Liu, Q., Roberts, A.P., Larrasoana, J.C., et al. (2012) Environmental Magnetism: Principles and Applications. *Reviews of Geophysics*, **50**, 1-50. <https://doi.org/10.1029/2012RG000393>
- [7] 俞劲炎. 土壤磁学——土壤学研究的新领域[J]. 土壤学进展, 1979(4): 1-12.
- [8] 卢升高, 俞劲炎, 章明奎, 等. 长江中下游第四纪沉积物发育土壤磁性增强的环境磁学机制[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 336-340.
- [9] 吕厚远, 韩家懋, 吴乃琴. 中国现代土壤磁化率分析及其古气候意义[J]. 中国科学(B 辑), 1994, 24(12): 1290-1297.
- [10] 旺罗, 刘东生, 吕厚远. 污染土壤的磁化率特征[J]. 科学通报, 2000, 45(10): 1091-1094.
- [11] 史衍玺. 山东省主要土壤磁化率的研究[J]. 山东农业大学学报, 1992, 23(4): 388-392.
- [12] 董元杰, 史衍玺. 鲁中山区小流域坡面土壤侵蚀强度与磁化率的空间分异特征研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 6-10.
- [13] 卢升高. 中国土壤磁性与环境[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [14] Matsusaka, Y. (1961) Magnetism of Iron Oxid in Hawaiian Soils. *Soil Science*, **91**, 239-245. <https://doi.org/10.1097/00010694-196104000-00004>
- [15] Vadyunina, A.F. and Babanin, V.F. (1977) Magnetic Susceptibility of Some Soils in the USSR. *Pochvovedenie*, No. 10, 55-66.
- [16] Dearing, J.A., Morton, R.I., Price, T.W., et al. (1986) Tracing Movements of Topsoil by Magnetic Measurements: Two Case Studies. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **42**, 93-104. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(86\)80011-5](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(86)80011-5)
- [17] Williams, T.M. (1991) A Sedimentary Record of the Deposition of Heavy Metals and Magnetic Oxides in the Loch Dee Basin, Galloway, Scotland, since c. AD 1500. *Holocene*, **1**, 142-150. <https://doi.org/10.1177/095968369100100206>
- [18] 张振卿, 许清海, 贾红娟. 殷墟地区土壤剖面磁化率变化特征[J]. 地理与地理信息科学, 2006, 22(6): 94-97.
- [19] 陈秀玲, 李志忠, 姜修洋, 等. 福州盆地不同土地利用方式下土壤磁化率特征[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2012, 28(3): 87-93.
- [20] 刘剑刚, 张华, 何红, 等. 辽东山地冰缘地貌土壤磁化率与粒度间的关系[J]. 生态科学, 2016, 35(3): 37-42.
- [21] 任建光. 北京地区表层土壤磁化率分布特征[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2007, 23(10): 24-27.
- [22] 姜月华, 殷鸿福, 王润华. 环境磁学理论、方法和研究进展[J]. 地球学报, 2004, 25(3): 357-362.
- [23] Heller, F. and Liu, T.S. (1982) Magnetostratigraphical Dating of Loess Deposits in China. *Nature*, **300**, 431-433. <https://doi.org/10.1038/300431a0>
- [24] Heller, F. and Evans, M.E. (1995) Loess Magnetism. *Reviews of Geophysics*, **33**, 211-240. <https://doi.org/10.1029/95RG00579>
- [25] Mullins, C.E. (1977) Magnetic Susceptibility of the Soil and Its Significance in Soil Science Review. *Soil Science*, **28**, 223-246. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1977.tb02232.x>
- [26] Kukla, G., Heller, F., Ming, L.X., et al. (1988) Pleistocene Climates in China Dated by Magnetic Susceptibility. *Geology*, **16**, 811-814. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1988\)016<0811:PCICDB>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1988)016<0811:PCICDB>2.3.CO;2)
- [27] Maher, B.A., Thompson, R. and Zhou, L.P. (1994) Spatial and Temporal Reconstructions of Changes in the Asian Pa-

- leomonsoon: A New Mineral Magnetic Approach. *Earth and Planetary Science Letters*, **125**, 461-471.  
[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(94\)90232-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(94)90232-1)
- [28] 安芷生, Porter, S., Kukla, G., 等. 最近 13 万年黄土高原季风变迁的磁化率证据[J]. 科学通报, 1990(7): 529-532.
- [29] 方小敏, 李吉均. 末次间冰期 5e 亚阶段夏季风快速变化的环境岩石磁学研究[J]. 科学通报, 1998, 43(21): 2330-2332.
- [30] 邓成龙, 袁宝印, 胡守云, 等. 环境磁学某些研究进展评述[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(2): 93-101.
- [31] 王勇, 潘保田, 管清玉, 等. 西北干旱区黄土-古土壤磁化率变化特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(1): 111-114.
- [32] 邓成龙, 刘青松, 潘永信, 等. 中国黄土环境磁学[J]. 第四纪研究, 2007, 27(2): 193-209.
- [33] Eriksson, M.G. and Sandgren, P. (1999) Mineral Magnetic Analyses of Sediment Cores Recording Recent Soil Erosion History in Central Tanzania. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **152**, 365-383.  
[https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(99\)00043-7](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(99)00043-7)
- [34] 冯钰婷, 彭诗云, 谢辉, 等. 近 8000 年来珠江口沉积物磁化率及其气候环境意义[J]. 广东海洋大学学报, 2018, 38(3): 49-53.
- [35] 罗俊, 张雷, 邹宁, 等. 渭河流域滞留沉积物的磁化率各向异性特征及水动力方向研究[J]. 地下水, 2017, 39(1): 180-182.
- [36] 朱旭旭, 高爱国, 汪卫国, 等. 闽江下游及河口表层沉积物磁化率特征及其环境意义[J]. 应用海洋学报, 2016, 35(3): 364-370.
- [37] 周晓红, 赵景波. 近 120 年来高陵渭河河漫滩沉积物磁化率指示的气候变化[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 196-200.
- [38] 殷勇, 方念乔, 王倩, 等. 云南中甸纳帕海湖泊沉积物的磁化率及环境意义[J]. 地理科学, 2002, 22(4): 413-419.
- [39] 杜婧, 鲁瑞洁, 刘小楝, 等. 青海湖湖东沙地全新世风成沉积物磁化率特征及其环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(2): 175-184.
- [40] 李艳红, 徐莉, 陈成贺日, 等. 新疆罗布泊湖盆沉积物剖面粒度与磁学特征及沉积环境[J]. 地质通报, 2014, 33(10): 1507-1513.
- [41] 周鑫, 刘毅, 程文翰, 等. 黄东海陆架区表层沉积物磁化率空间分布及其影响因素分析[J]. 地球环境学报, 2011, 2(2): 356-361.
- [42] Blundell, A., Hannam, J.A., Dearing, J.A., *et al.* (2009) Detecting Atmospheric Pollution in Surface Soils Using Magnetic Measurements a Reappraisal Using an England and Wales Database. *Environmental Pollution*, **157**, 2878-2890.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.02.031>
- [43] Hay, K.L., Dearing, J.A., Baban, S.M.J., *et al.* (1997) A Preliminary Attempt to Identify Atmospherically-Derived Pollution Particles in English Topsoils from Magnetic Susceptibility Measurements. *Physics and Chemistry of the Earth*, **22**, 207-210. [https://doi.org/10.1016/S0079-1946\(97\)00104-3](https://doi.org/10.1016/S0079-1946(97)00104-3)
- [44] Muxworthy, A., Schmidbauer, E. and Petersen, N. (2002) Magnetic Properties and Mossbauer Spectra of Urban Atmospheric Particulate Matter: A Case Study from Munich, Germany. *Geophysical Journal International*, **150**, 558-570.  
<https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01725.x>
- [45] 欧阳婷萍, 万洪富, 张金兰, 等. 珠江三角洲农业土壤磁化率空间分布特征及其影响因素分析[J]. 第四纪研究, 2012, 32(6): 1199-1206.
- [46] Oldfield, F., Rummery, A., Thompson, R., *et al.* (1979) Identification of Suspended Sediment Sources by Means of Magnetic Measures: Some Preliminary Results. *Water Resources Research*, **15**, 211-218.  
<https://doi.org/10.1029/WR015i002p00211>
- [47] Ventura, E.J.R., Nearing, M.A. and Norton, L.D. (2001) Developing a Magnetic Tracer to Study Soil Erosion. *Catena*, **43**, 277-291. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00149-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00149-1)
- [48] 朱宏伟, 贺秀斌, 唐强, 等. 三峡库区消落带土壤在周期蓄水影响下的磁性变化[J]. 科技导报, 2012, 30(9): 22-26.
- [49] 刘龙华, 李凤全, 王天阳, 等. 黄壤坡面表土磁化率变化特征分析[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 330-333.
- [50] 王小刚, 韩光中, 母娟, 等. 川中丘陵区紫色土坡面土壤侵蚀过程中基本理化性质与磁化率的演变特征[J]. 四川农业大学学报, 2017, 35(3): 345-352.
- [51] 濮励杰, 包浩生, Higgitt, D.L. 土地退化方法应用初步研究[J]. 自然资源学报, 1998, 14(1): 55-61.