

● 山西师范大学学术著作出版基金资助

土壤磁化率 空间变异性研究

◎ 杨萍果 著

中国农业科学技术出版社

● 山西师范大学学术著作出版基金资助

土壤磁化率 空间变异性研究

◎ 杨萍果 著

中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

土壤磁化率空间变异性研究/杨萍果著. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2012. 10

ISBN 978 - 7 - 5116 - 0954 - 0

I. ①土… II. ①杨… III. ①土壤 - 磁化率 - 研究 IV. ①S153. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 122043 号

责任编辑 崔改泵

责任校对 贾晓红

出 版 者 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电 话 (010)82109494 (编辑室) (010)82109702 (发行部)
(010)82109709 (读者服务部)

传 真 (010)82106624

网 址 <http://www.castp.cn>

经 销 者 各地新华书店

印 刷 者 北京富泰印刷有限责任公司

开 本 850mm × 1 168mm 1/32

印 张 6.375

字 数 170 千字

版 次 2012 年 10 月第 1 版 2012 年 10 月第 1 次印刷

定 价 28.00 元

版权所有 · 翻印必究

序

环境磁学诞生于 20 世纪 70 年代, 90 年代以后便以前所未有的速度向深度和广度发展。当前磁学与土壤学、生态学、植物营养学、环境科学等多学科综合交叉应用, 正反映了这一总的发展趋势。

土壤环境质量关系到人类生存和社会经济的可持续发展, 是全球变化研究关注的重点学科领域之一。在地球环境系统中, 土壤、岩石、沉积物等自然物质以及人类活动所产生的次生物质往往表现出不同的磁性特征。人为活动所产生的磁性矿物, 能通过大气尘降、污水扩散, 以不同的赋存状态在环境中富集, 使物质表现出较强的磁信息, 从而极大地改变土壤磁性物质的存在形式和循环规律。土壤磁化率表示土壤中磁性物质种类、含量、颗粒大小, 可反映母质、气候、植被、水文和人类活动等综合信息, 可阐明气候和生态环境的演变、湖泊海洋沉积物的来源、土壤污染等多方面的问题, 可作为土壤发育程度和生态环境污染的代用指标之一。

本书作者利用地统计学理论和方法, 从土样采集、分析测定、数据处理、变异函数结构分析, 到克里格法无偏最优插值空间分布图的绘制, 详细阐述河北太行山山前平原不同水质灌溉土壤磁化率空间变异性和土壤养分的关系、山西黄土高原农田土壤磁化率和微量金属元素的空间变性、河北海河低平原和太行山山前平原区土壤剖面的磁化率变化规律等 4 个案例, 资料翔实, 叙述简明, 论证有力, 通过对土壤磁化率空间变异性的研究, 为土壤磁学在生态环境变化监测中的应用提供了新思路、新途径。

本书的出版将给土壤、生态、环境等学科领域带来新的信息，对推动环境磁学的进一步发展起到积极的作用。

中国科学院南京地理与湖泊研究所研究员

A stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to the researcher mentioned in the text.

2012 年 6 月于南京

前 言

近年来,利用土壤或沉积物的磁性特征反映区域环境、气候作用和人类活动变化已成为研究热点之一。土壤磁化率是土壤磁性测量的重要参数,可以反映土壤发育程度、气候、植被和生态环境等信息。土壤磁化率相关研究是20世纪70年代新出现的环境磁学重要组成部分之一。在众多的磁学参数中,磁化率因其测量简单便捷、快速经济、可重复性强而应用的最为广泛。土壤磁化率是土壤磁化性能的度量,主要取决于土壤磁性矿物的种类、含量、起源及其在成土过程中的变化规律,同时受土壤pH值、有机质、氧化还原电位、质地等因素的影响,可作为土壤发育程度、气候变化和环境污染的代用指标之一。土壤是连续的时空变异体,不论在大尺度上还是在小尺度上观察,其属性指标均存在空间异质性。土壤磁化率作为典型的区域化变量,具有随机性和结构性双重特性。通过土壤磁化率空间变异性研究,建立空间预测模型,进行空间数据插值和估计,就可为合理利用土壤资源和生态环境监测提供新的途径。

本书收录了作者关于“土壤磁化率”研究的多项成果,有些已在《*Journal of Hazardous Materials*》、《*Comptes Rendus Biologies*》、《*Clean—Soil, Air, Water*》、《农业工程学报》、《土壤》等国内外学术期刊上发表,是作者在中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心攻读博士学位期间的主要研究内容。同时得到国家973重点基础研究发展计划(2005CB121106)、国家自然科学基金项目(31272258)和山西省自然科学基金项目(2010011044)的资助。

本书系统介绍了土壤磁化率的基本概念、测定方法及其在土壤学和环境科学中的应用。全书共分6章,第一章土壤磁性的来源、分类,土壤磁化率的概念和测定,影响土壤磁化率的因素;第二章国内外土壤磁化率的研究进展;第三章土壤磁化率的研究技术路线;第四章结合地统计学有关理论,阐述太行山山前平原区不同水质灌溉土壤磁化率空间分布格局;第五章山西黄土高原农田土壤磁化率空间变异性;第六章土壤剖面磁化率变化规律;最后还简述了土壤磁化率研究未来发展趋势。本书附主要参考文献,供读者进一步查阅。

本书在导师毛任钊研究员的悉心指导下完成,导师严谨的治学态度、敏锐的学术思维、渊博的专业知识,使学生终生受益。在试验的设计和实施过程中,中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心刘小京研究员、张玉铭博士、雷玉平博士和李红军博士,中国科学院地质地球物理研究所潘永信研究员、邓成龙研究员都给予过大力支持和帮助,中国科学院南京地理与湖泊研究所胡守云研究员为本书亲笔作序。借此机会,谨向他们致以诚挚的谢意!

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请广大读者批评指正。

杨萍果

2012年6月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 土壤磁性	(1)
一、土壤磁性的来源	(1)
二、土壤磁性的分类	(3)
第二节 土壤磁化率	(5)
一、土壤磁化率概念	(5)
二、频率依赖系数	(5)
三、土壤组分磁化率	(6)
四、土壤磁化率的测定	(7)
第三节 影响土壤磁化率的因素	(9)
一、气候与土壤磁化率	(9)
二、地形与土壤磁化率	(10)
三、土壤水分与磁化率	(11)
四、土壤有机质与磁化率	(11)
五、pH 值与土壤磁化率	(12)
六、粒度与土壤磁化率	(12)
七、土地利用方式与土壤磁化率	(13)
第二章 磁化率的研究进展	(14)
第一节 黄土—古土壤磁化率	(14)
一、黄土磁化率	(14)
二、古土壤磁化率增强的机理	(15)
第二节 现代土壤磁化率	(15)

一、土壤质量	(15)
二、土壤发生分类	(16)
三、土壤侵蚀	(17)
四、植物磁测	(18)
五、水体污染	(18)
六、大气污染	(20)
第三章 土壤磁化率研究技术路线	(21)
第一节 研究背景	(21)
一、环境磁学	(21)
二、土壤磁学	(23)
第二节 研究目的及意义	(24)
一、研究目的	(24)
二、研究意义	(24)
第三节 研究内容及技术路线	(25)
一、研究内容	(25)
二、研究技术路线	(28)
第四章 土壤磁化率空间格局	(29)
第一节 研究区域概况	(29)
一、地理位置与地形地貌	(29)
二、气象水文	(29)
三、土壤类型	(30)
四、污灌区概况	(30)
第二节 研究理论	(31)
一、地统计学	(32)
二、经典统计学	(33)
三、地统计学的优势	(34)
四、空间结构分析	(35)
五、空间局部估计	(38)
六、地统计学分析软件	(40)

七、空间分析建模	(40)
八、空间插值	(40)
第三节 研究设计	(42)
一、试验设计	(42)
二、土壤理化性质测定	(42)
三、土壤磁化率测定	(43)
四、数据分析	(43)
第四节 土壤磁化率的空间格局	(44)
一、经典统计学分析	(44)
二、样本分布正态性检验	(46)
三、空间变异分析	(55)
四、土壤磁化率空间插值	(61)
第五节 土壤养分的空间格局	(67)
一、研究区土壤养分	(67)
二、土壤磁化率与有机质的关系	(71)
第六节 清灌区土壤剖面磁化率研究	(82)
一、土壤矿质全量元素组成	(82)
二、土壤低频磁化率	(82)
三、土壤频率依赖系数	(83)
四、土壤磁化率与频率依赖系数的关系	(84)
五、表土磁化率增强的机理	(84)
第七节 研究区水质和土壤环境质量	(86)
一、试验设计	(86)
二、评价标准	(86)
三、数据处理	(87)
四、污灌水环境质量	(88)
五、土壤环境质量评价	(90)
第八节 土壤微量金属元素空间变异性研究	(92)
一、研究区概况	(92)

二、实验设计	(92)
三、数据分析	(93)
四、土壤金属元素含量的统计特征值	(94)
五、土壤金属元素的相关分析	(95)
六、土壤金属元素的半方差函数模型	(96)
七、土壤金属元素的结构分析	(99)
八、土壤金属元素的空间分布特征	(103)
九、土壤环境质量评价标准及分级	(105)
十、土壤环境质量评价	(106)
十一、土壤环境质量空间分布	(107)
第五章 山西黄土高原土壤磁化率空间变异性	(111)
第一节 研究区域概况	(112)
一、地理位置与地形地貌	(112)
二、气象水文	(112)
三、土壤类型	(113)
第二节 试验设计	(114)
一、土样采集	(114)
二、土壤性质测定	(114)
三、数据分析	(116)
第三节 土壤性质的空间变异性	(116)
一、土壤磁化率和养分含量的描述性统计分析	(116)
二、数据的正态分布性检验	(117)
三、土壤磁化率和养分含量的空间结构特征	(119)
四、土壤磁化率和养分含量的空间分布特征	(120)
五、土壤剖面颜色	(126)
六、土壤剖面有机质	(129)
第四节 煤焦铁铸工厂周边土壤磁化率和微量金属	
空间变异性研究	(130)
一、研究区域概况	(130)

二、试验设计	(131)
三、数据处理及分析	(132)
四、土壤磁化率和有效微量金属含量的描述性统计 分析	(132)
五、土壤磁化率与有效微量金属含量的空间结构特 征及分布	(133)
六、土壤磁化率与有机质、微量金属含量的相关 分析	(142)
七、土壤磁化率与微量金属含量的因子分析	(143)
第六章 土壤剖面磁化率研究	(147)
第一节 海河低平原土壤剖面磁化率研究	(147)
一、研究区概况	(147)
二、研究进展	(147)
三、试验方法	(148)
四、海河低平原土壤剖面磁化率	(148)
第二节 盐渍区土壤磁化率研究	(158)
一、研究区概况	(158)
二、试验材料和方法	(159)
三、盐渍区土壤磁化率	(160)
四、盐渍区土壤频率依赖系数	(162)
第三节 太行山山前平原土壤剖面磁化率研究	(165)
一、剖面选择的理论依据	(165)
二、剖面选择与取样	(166)
三、剖面土壤磁化率	(166)
四、剖面土壤频率依赖系数	(171)
五、土壤剖面含水量	(174)
结束语	(179)
参考文献	(181)

第一章 绪 论

第一节 土壤磁性

土壤磁学是一门新兴的土壤学科分支,在研究土壤发生分类、土壤肥力演变规律、土壤调查制图、植物营养诊断、生物磁性以及土壤改良、土壤侵蚀及其空间分布等领域应用广泛。

一、土壤磁性的来源

土壤磁性是由土壤各种组成成分(尤其是矿物)的磁学性质来的,其来源主要分为自然、生物、人为3种因素。

1. 自然因素

土壤磁性主要由原生矿物风化、成土、侵蚀、搬运等形成,包括原生或次生的亚铁磁性物质和不完整的反铁磁性物质。原生的磁性矿物往往富集在粗粒级泥沙之中,次生的磁性矿物则主要集中在细颗粒泥沙中,这是由于黏土矿物对不完整的反铁磁性物质的吸附作用。卢升高、俞劲炎等认为母岩(岩浆岩、火成岩、沉积岩、花岗岩、闪长岩、玄武岩)中普遍含有0.90%~4.76%磁铁矿及Ti、Al、Co、Ni、Zn、Cr、Cu、Mn等金属离子的同晶替代物,粒径大多为1~50 μm (卢升高等,1991)。磁铁矿及其同晶替代物可以低温氧化为磁赤铁矿,部分岩浆岩中磁铁矿、由铁钛固溶体离钛氧化而成钛磁铁矿(FeTiO_3)含量可高达10%。黑云母和黄铁矿中含有顺磁性矿物,具有较低的磁化率;高岭石、长石、方解石、石英、碳酸岩、有机质和水属于或者含有抗磁性物质,磁化率为负值(杨萍果等,2008)。此外,在排水不良、潜育性强的土壤中纤

铁矿脱水也可形成磁赤铁矿。

2. 生物因素

由于微生物活动及环境化学因子的变化,如有机质、酸碱度、氧化—还原电位等,使得磁性和非磁性物质发生沉淀—溶解、水解、络合、吸附、氧化—还原等作用,从而影响土壤的磁性。如在曾遭受过森林火灾的地方,亚铁磁性物质相互转化,弱磁性的氧化铁和氢氧化铁,通过土体内氧化还原反应形成磁铁矿和磁赤铁矿,以超顺磁性(SP)颗粒或稳定单畴(SSD)晶粒存在。

从 Blackmore 首次在美国 Woods Hole 沉积物中发现了趋磁性细菌(MTB)以来,微生物对磁性的贡献引起了极大关注(Blackmore, 1975)。趋磁性细菌在陆地、海洋普遍存在,主要是异氧铁还原菌、硫酸盐还原菌的新陈代谢物与环境中的物质形成磁小体。许多生物也能合成磁小体,如细菌、藻类、鸽子、蜜蜂、鲸等。在透射电镜下观察磁小体的粒径为 $0.012 \sim 0.4 \mu\text{m}$, 属于 SD 和 SP 磁性颗粒范围。经穆斯堡尔谱测定,生物形成的磁小体与实验室合成的纯磁铁矿相同,表明生物合成的磁铁矿纯度较高,多为磁铁矿(Fe_3O_4)颗粒(潘永信等, 2004)。少数富硫还原环境中的趋磁性细菌体内还可以生成 SD 胶黄铁矿(Fe_3S_4)磁小体,是沉积物中一种重要的剩磁载体。

在长江河口芦苇生长的潮滩磁性研究中发现,由于植物的生理活动,导致在亚表层形成以 Fe^{3+} 占主导的相对氧化层。在该氧化层中,显示了不完整反铁磁性矿物的相对富集,表现为频率依赖系数 X_{FD} 、非磁滞剩磁 ARM、非磁滞剩磁/饱和等温剩磁 ARM/SIRM 具有较低的值,而饱和等温剩磁/磁化率 SIRM/X 、矫顽力 B 等参数则明显增大(韩晓菲等, 2003)。随着深度增加,沉积物的还原性总体上增强,在磁性特征上表现为不完整反铁磁性矿物相对含量的下降。利用 200mT 磁场处理水稻种子及育苗的土壤,证明生物磁化和土壤磁化具有一定的累加效应(夏丽华等, 2000)。在探讨土壤—小麦系统磁化健康效应的过程中,认为 200mT 磁场强度是

适于小麦生长的最佳磁处理参数（顾继光等，2004）。

3. 人为因素

湖泊、海洋中大部分沉积物来自其周边流域，沉积物中碎屑磁性矿物含量和成分的变化常常与周边地区土地利用、坡地生态过程、森林砍伐和火灾等或由季风从陆地输入有关，因此湖泊沉积物的磁性可反映流域生态环境的变化。现代土壤磁性特征具有明显的人类活动印记，如燃煤产生的磁铁矿小球，其中的硫铁矿氧化形成赤铁矿，赤铁矿与熔融的硅酸盐反应生成磁铁矿和磁赤铁矿，它们随烟尘、煤灰进入土壤环境；电镀厂、冶炼厂、钢铁厂等排放的工业废水中含有铁锰物质，通过径流途径进入地球环境系统中，对土壤的磁性产生了很大的影响。冶炼厂的炉渣、汽车尾气、煤灰的低频磁化率 $X_{LF} > 500 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ，而频率依赖系数 $X_{FD} < 3\%$ （Wang et al., 2000）。人为活动所产生的磁性矿物，能通过大气尘降、污水扩散，以不同的赋存状态在地球环境中富集，使物质表现出较强的磁信息，从而极大地改变了土壤磁性物质的存在形式和循环规律。

二、土壤磁性的分类

1. 物质磁性

物质的磁性根据其对外加磁场的效应，可分为铁磁性、亚铁磁性、不完整的反铁磁性、顺磁性、抗磁性 5 种基本类型。

铁磁性物质，其特点有较强的自发磁化性，即使无外加磁场，其内部仍然是磁化的，有一定的磁化强度，它的磁化率较大，为正值，磁化率曲线为复杂的磁滞回线。

亚铁磁性物质包括磁铁矿和其他磁化率很高的含铁矿物。这类物质的原子磁矩平行排列，存在着由矿物晶格结构控制的两组方向相反、大小不等的磁矩。磁铁矿是所有火成岩、大多数沉积岩和几乎所有土壤中常见的矿物，这类矿物在自然界最为重要，往往主导了物质磁化率的测值。

不完整的反铁磁性物质不多，赤铁矿最为常见，存在于许多岩石和土壤之中，磁化率较低。其晶格结构也产生两组方向相反、平

行排列的磁矩，两组磁矩几乎相互抵消。土壤的红色大多由其引起。

顺磁性物质，在外加磁场的作用下，磁化方向与外磁场相同，由 Mn 或 Fe 离子产生的磁矩在外加磁场的作用下呈现有序排列。在去掉外加磁场后，原子磁矩在热运动的作用下，取向完全杂乱，在宏观上不显示磁性，它的磁化率不大，为正值，磁化率曲线为直线，如黑云母、角闪石、辉石、褐铁矿、黄铁矿等。

抗磁性物质，在外加磁场的作用下，产生与外磁场相反的感生磁矩；当外磁场去掉后，感生磁矩就立即消失，它的磁化率很小，为负值，磁化率曲线为直线，如石英、长石、方解石、石膏、水等。

2. 土壤磁性

磁铁矿、磁赤铁矿、钛磁铁矿、钛磁赤铁矿等铁氧化物是许多土壤、岩石、沉积物和尘埃中的主要亚铁磁性矿物。土壤磁性一般包括 4 类物质，以磁铁矿、磁黄铁矿和磁赤铁矿为主的亚铁磁性物质，以针铁矿和赤铁矿为主的不完整的反铁磁性物质，以云母和伊利石为主的顺磁性物质，以石英和有机质为主的抗磁性物质。土壤中常见的磁性物质见表 1.1。

表 1.1 土壤中常见的磁性物质

Table 1.1 Usually magnetic matters in soil

物质 Material	磁性类型 Magnetic type	化学组成 Chemistry constitute	质量磁化率 Mass magnetic susceptibility χ ($10^{-6} \text{m}^3/\text{kg}$)	矫顽力 Coercivity (T)
纯铁、镍、铬	铁磁性	Fe、Ni、Cr	$10^4 \sim 5$	—
磁铁矿、磁赤铁矿、磁黄铁矿、胶黄铁矿	亚铁磁性	Fe_3O_4 、 $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 Fe_7S_8 、 Fe_3S_4	$10^1 \sim 2$	0.02 ~ 0.04
赤铁矿、针铁矿	反铁磁性	$\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 αFeOOH	10^{-1}	0.76
纤铁矿、水铁矿	顺磁性	γFeOOH 、 $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	10^{-2}	—
石英、碳酸钙、有机质和水	抗磁性	SiO_2 、 CaCO_3 、 H_2O	<0	—

土壤中的氧化铁矿物主要包括磁铁矿 (Magnetite)、磁赤铁矿 (Maghemite)、赤铁矿 (Hematite)、针铁矿 (Goethite)、纤铁矿 (Lepidocrocite) 和水铁矿 (Ferrihydrite)。

第二节 土壤磁化率

磁化率是物质磁化性能的度量。一般是指在弱磁场 (0.1mT) 中, 样品的磁化强度与磁场强度的比值, 常用作磁性矿物含量的量度。

一、土壤磁化率概念

土壤磁化率是土壤样品在弱磁场中所获得的感应磁化强度 (M) 与磁场强度 (H) 之比, 表示样品在外界磁场作用下被磁化的难易程度, 常用作样品总体磁性强弱的估量。

土壤磁化率大小与其所含的 (亚铁) 磁性矿物含量、土壤矿物构成及其晶粒大小、形状 4 个因子有关, 有容积磁化率和质量磁化率 2 种表示方法。容积磁化率 (Volume magnetic susceptibility) 计算公式如下:

$$K = \frac{M}{H}$$

K 为容积磁化率 (无量纲), M 为磁化强度 (T), H 为外磁场强度 (A/m)。

质量磁化率 (Mass magnetic susceptibility) X ($10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$) 计算公式如下:

$$X = \frac{k}{\rho}$$

X 为质量磁化率 (m^3/kg), k 为容积磁化率, ρ 为样品密度 (kg/m^3)。

二、频率依赖系数

频率依赖系数 X_{FD} (%) (frequency dependent susceptibility)