

水耕人为土磁性矿物的生成转化机制研究回顾与展望^{*}

韩光中¹ 黄来明² 李山泉³ 陈留美^{4†}

(1 内江师范学院地理与资源科学学院, 四川内江 641112)

(2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

(3 邢台学院地理系, 河北邢台 054001)

(4 遵义师范学院资源与环境学院, 贵州遵义 563002)

摘 要 随着环境问题的日益突出, 人为活动对土壤的影响越来越深刻, 需加强对“人为作用”的研究以便解释现代土壤磁性的过程 and 变化。水耕人为土在发育过程中人为作用的方式多种多样, 明确其磁性矿物的生成和转化机制及其影响因素有利于理解人为活动对现代土壤磁性的作用。但目前水耕人为土磁学研究还比较零散, 缺乏系统性, 已有研究结果有待深入梳理。本文对已有的相关研究报道, 包括水耕人为土磁性参数的演变特征、磁性矿物的生成转化机制以及对成土因素的响应等进行综合评述。最后, 对当前研究的不足和存在问题进行总结, 并对研究方向进行了展望, 以期有助于环境磁学的发展。

关键词 水耕人为土; 磁性矿物; 土壤发生; 成土因素

中图分类号 S153.2 **文献标识码** A

随着环境问题的日益突出, 人为活动对土壤的影响越来越深刻^[1-7]。在这样的背景下需要加强“人为作用”的研究以便解释现代土壤磁性的过程 and 变化。水耕人为土属于人工半水成土或水成土, 在发育过程中人为作用的方式多种多样^[8-9]。明确其磁性矿物的生成和转化机制及其影响因素有利于理解人为活动对现代土壤磁性的作用。针铁矿是成土过程的最终产物^[10], 而水铁矿是磁性矿物生成转化重要的中间产物^[11-17], 它们的生成和转化过程对完善现代环境磁学理论至关重要, 但目前这方面的研究还很缺乏。鉴于针铁矿和水铁矿也是水耕人为土中常见的磁性矿物^[18-19], 本文将对水耕人为土磁性矿物生成和转化机制以及对成土因素的响应关系进行综述, 并对当前研究存在的主要问题及研究方向进行探讨, 以期有助于环境磁学的发展。

1 水耕人为土磁性

1.1 水分状况和磁性剖面特征

中国土壤系统分类将具有人为滞水水分状况, 且具有水耕表层和水耕氧化还原层的土壤定义为水耕人为土^[8]。水耕人为土可起源于不同类型的土壤, 虽受前身土壤的影响, 却又有着独特的成土过程。在水耕条件下, 由于难透水犁底层的存在, 耕作层和犁底层至少有3个月被灌溉水或人为截留的径流水和雨水饱和, 并呈还原状态^[9]。其中还原态铁、锰可透过犁底层淋溶至水分不饱和的心土层中氧化淀积^[8]。可以说人为滞水水分状况及其相应的由氧化还原过程导致的氧化铁的转化与再分配是水耕人为土发育过程中最重要的现象, 它决定了水耕人为土剖面形态和亚类归属^[20-22]。同样, 水

^{*} 国家自然科学基金项目(41401235和41401238)和国家级大学生创新实验项目(X201306)资助 Supported by the Natural Science Foundation of China (Nos. 41401235 and 41401238) and National Innovation Experiment Program for University Students (No. X201306)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: lmchen@issas.ac.cn

作者简介: 韩光中(1981—), 男, 山东费县人, 博士, 副教授, 主要从事土壤发生与土壤退化研究。E-mail: hanguangzhong@163.com

收稿日期: 2016-06-13; 收到修改稿日期: 2016-10-05; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-10-28

http://pedologica.issas.ac.cn

耕人为土磁性矿物也会受到上述过程的强烈影响,磁性在剖面中发生分异。从已有的研究结果来看,不同水分类型水耕人为土氧化还原电位(Eh)的季节性变化不同^[23],从而导致不同水分类型水耕人为土磁性剖面特征也有较大差异^[24-25]。地表水型水耕人为土在水稻生长季节水耕表层呈还原态,而其下土体很长时间仍为氧化态;水稻收割后,土壤逐步落干,全剖面均呈氧化态^[23](图1)。该类型水耕人为土剖面上、下层磁化率呈明显分异^[24](图1)。种稻后上层土壤(水耕表层,包

括耕作层与犁底层)的磁化率值明显降低,不同种稻年限土壤之间没有明显变化;种稻后下层土壤(犁底层之下的氧化还原层,不包括漂白层)磁化率没有上层降低明显,种稻超过100 a土壤剖面下层仍有较高的磁化率值。良水型水耕人为土一年中处于还原状态的时间要远超过地表水型(图1),种稻后整个剖面的磁化率均有明显降低,其中种稻只有50 a土壤整个剖面磁化率值已经很低,之后随着种稻年限的增加略有降低,但幅度不大(图1)。但随着种稻年限的加长,这两种类型水耕人

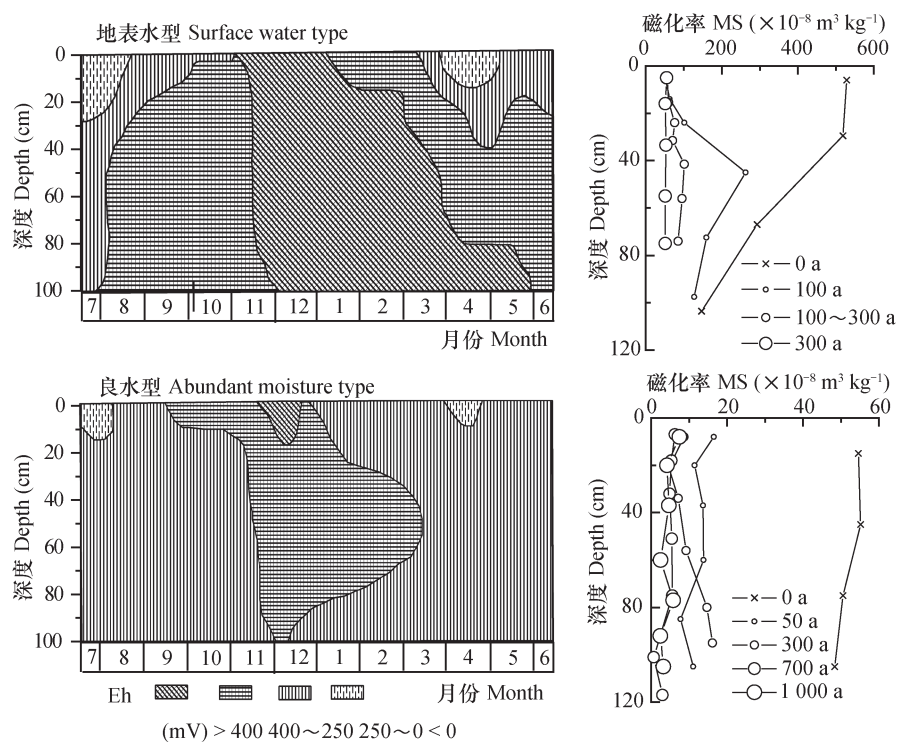


图1 不同水分类型水耕人为土剖面氧化还原电位(Eh)和磁化率随时间的变化(数据来自文献[23-24, 26])

Fig. 1 Temporal variation of Eh and magnetic susceptibility in the paddy soils relative to soil water regime

(data cited from references [23-24, 26])

为土最终发育成结构相似的磁化率剖面构型。

1.2 水耕人为土磁性矿物生成和转化机制

土壤磁性状物的生成和转化机制目前有干湿交替的“发酵机制”^[11, 16]、燃烧机制^[27]、生物成因^[28-31]、土壤淋溶淀积对磁性矿物稀释或富集^[32]及人为成因^[33]等。目前越来越多的研究结果支持次生成土作用是引起土壤磁性增强的主要原因^[13, 34-37],特别是水铁矿一类磁赤铁矿—赤铁矿这一转化路径的提出和反复验证,促进了土壤磁学性质的解译。水耕人为土属于人工半水成土或水成

土,其氧化铁矿物一方面继承了起源土壤的一些特点,另一方面由于长期水耕熟化的影响会发生一系列明显变化。

水耕人为土水耕表层磁性的损耗是一个普遍现象^[24, 26, 38-42]。淹水培育试验表明土壤还原可引起磁化率的降低,淹水还原15d内磁化率基本无变化,第30~70d磁化率显著降低,90d后磁化率基本没有变化,保持在较低的水平;整个培育试验中第四纪红黏土发育的富铁土磁化率损失率达78%,冲积物上发育的富铁土损失率达

80%；进一步试验表明还原过程中磁化率的降低还与pH密切相关，pH越低，其磁化率降低越明显（图2）^{〔18, 42〕}。上述磁性的降低可能主要是由还原作用下亚铁磁性矿物的溶解破坏造成的^{〔34, 43〕}。种稻后的土壤环境不利于赤铁矿的生成，这是因为周期性的淹水使土壤很难形成利于水铁矿脱水的高温干旱环境。种稻土壤已有的赤铁矿也会因厌气还原环境下的溶解破坏^{〔44〕}而逐渐降低^{〔24〕}。综上，在厌气还原条件下，水耕表层中亚铁磁性矿物（包括磁铁矿和磁赤铁矿）和赤铁矿在短时间内就大部分向纤铁矿、针铁矿及水化形态转化，导致土壤磁性降低（图3）。

下层土壤磁性矿物的变化要复杂的多。在厌气条件下，耕作层氧化铁被还原、络合活化，具有移动性，可在犁底层下的氧化区重新氧化结晶，形成胶膜、结核、斑纹等。这是水耕人为土剖面形态发育最重要的特征之一，同时伴随氧化铁矿物的生成转化。在水耕人为土中，纤铁矿与针铁矿通常共

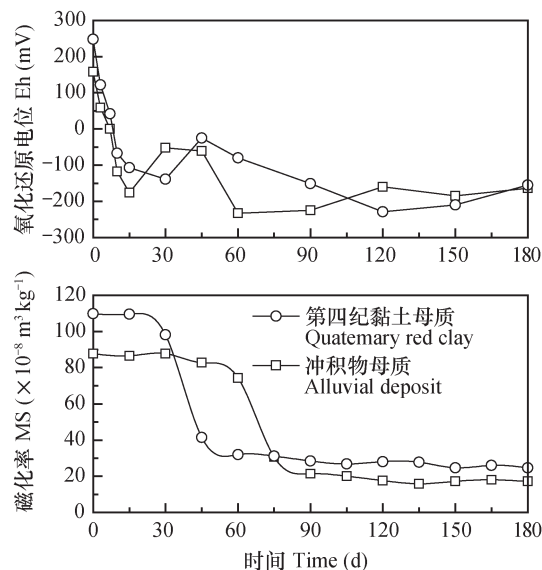


图2 富铁土淹水培育实验中Eh和磁化率随时间的变化
（数据来自文献〔42〕）

Fig. 2 Temporal variation of Eh and magnetic susceptibility in the Ferrisols during waterlogging incubation experiments (data cited from reference〔42〕)

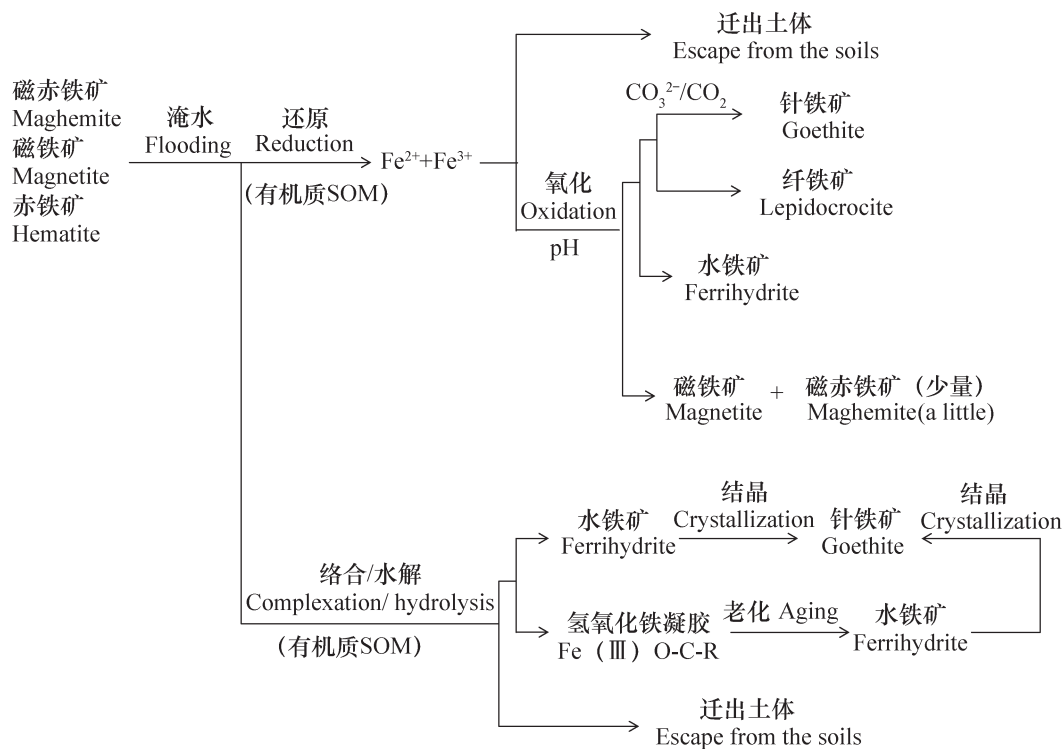
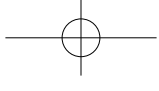


图3 水耕人为土磁性矿物的生成转化机制

（根据相关文献〔10, 18-19, 24-25, 42, 47〕总结）

Fig. 3 Mechanisms for formation and transformation of magnetic minerals in the paddy soils (summarized based on reference〔10, 18-19, 24-25, 42, 47〕)



存,二者的相对含量主要取决于土壤环境条件。 CO_3^{2-} 和 Al^{3+} 会抑制纤铁矿的生成而利于针铁矿的生成^[45-46]。此外,土壤pH对磁性矿物的生成也有很大的影响。合成实验表明pH在5~6范围内, Fe^{2+} 慢速氧化,可生成磁铁矿(可能也还有少量的磁赤铁矿)^[18-19];pH=7时,硅浓度增加和铝含量相对减少到某一程度后,也可生成磁赤铁矿^[46]。这样看来,水耕人为土下层如果具备了亚铁磁性矿物形成的条件,会有亚铁磁性矿物的生成。Han和Zhang^[24]的研究也证实了这一点,这可能代表着土壤下层的一种磁性增强机制。Han和Zhang^[24]同时也指出,随着淹水时间的增长,下层土壤的氧化区会逐渐变为还原环境,这又会导致亚铁磁性矿物破坏;种稻土壤下层磁性可能主要和亚铁磁性矿物的生成与破坏的平衡有关,当新生成的亚铁磁性矿物大于破坏的,亚铁磁性矿物则表现为上升,反之,则表现为下降。水耕人为土黏粒中的亚铁磁性矿物更容易被破坏,而新生的亚铁磁性矿物也主要集中在黏粒级别^[24, 42]。需要注意的是,水耕人为土土壤溶液中通常含有大量离子,上述过程形成的磁性矿物也许不是纯净的磁铁矿或磁赤铁矿,而往往含有杂质替代,因此在今后研究中,需要关注磁性矿物与其他离子的交互作用。

2 水耕人为土磁性矿物对成土因素的响应

2.1 母质

土壤母质或起源土壤对水耕人为土磁性的影响主要有四个方面。第一,起源土壤的磁性是水耕人为土磁性的“本底”。起源土壤中的亚铁磁性矿物和赤铁矿的磁学特性实际上决定了水耕人为土的磁性背景值。第二,母质或起源土壤决定了水耕人为土可供生成铁氧化物的铁的多少。第三,母质或起源土壤影响铁氧化物的输入,从而影响土壤磁性矿物的含量。例如地势较低的水耕人为土,如果周围土壤的亚铁磁性矿物含量高,会有一定的亚铁磁性矿物随灌溉水或者雨水进入土壤。此类输入的铁氧化物较少且主要集中在耕作层,因此不会是影响水耕人为土磁性的主要因素。第四,母质或起源土壤的特性是影响土壤磁性矿物特别是针铁矿和纤铁矿生成转化的重要因素。如,因 CO_3^{2-} 和 Al^{3+} 对纤铁矿生成的抑制作用,在石灰性水耕人为土或强酸性水

耕人为土中纤铁矿含量极少。

2.2 气候和生物

人为水耕改变了成土因素,长期淹水和土壤温度趋于平稳,在一定程度上超越或改变了自然成土因素的影响和控制,具有很强的人为特征,会大大减小气候对土壤发生的影响^[8]。因此气候不是影响水耕人为土磁性矿物演化的主要因素。但从全国范围看,受气温、降水等综合影响,淹水还原作用有自北向南的增强趋势^[23],对水耕人为土亚铁磁性矿物的还原溶解可能存在一定的影响。

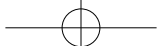
一般认为有机质可促进土壤中次生亚铁磁性矿物的生成^[12, 34]并妨碍磁赤铁矿的老化,使之不易转化为赤铁矿^[48]。而水耕人为土中的有机质在淹水后可加速厌气还原的进程并加深其强度^[49],从而不利于亚铁磁性矿物的保存以及土壤磁性的增强^[24]。植物可通过改变根际环境来改变微生物和磁性矿物之间的相互作用,改变土壤的酸碱性,从而增强或者减弱特定的成土作用,影响土壤中磁性矿物的生成和转化^[50]。如稻田间根系的呼吸作用或有机质分解释放大量 CO_2 ,有利于针铁矿的形成。微生物可通过两种矿化途径形成磁铁矿^[28]。第一是生物诱导矿化作用,如异化铁还原菌和硫酸还原菌能够在细胞以外生成大量结晶形态和粒度差异很大的磁性矿物颗粒。第二是通过生物化学控制在体内产生磁铁矿,如趋磁细菌可以在体内产生磁小体链。但水耕人为土中这方面的研究还十分缺乏,今后需加强。

2.3 地形和水文

地形地貌可影响热量和雨量以及成土母质的再分配,进而影响土壤磁性矿物的转化和再分配^[51]。为了方便水稻栽培,人们因地制宜地平整土地和修筑梯田,改变了土壤原有的形成条件,季节性的灌溉改变了土壤水分状况导致氧化还原交替进行^[8],进而影响或决定水耕人为土磁性矿物的生成和转化。水耕人为土的排水性和地下水位等也可影响土壤的氧化还原环境^[23],从而影响或决定水耕人为土磁性。甚至可以说淹水时间的长短和还原程度是水耕人为土亚铁磁性矿物变化的主控因素^[24-25]。

2.4 时间

此处的“时间”,不是指土壤发育的历史,实际只代表耕种活动的历史。水耕人为土形成的各种过程受到自然成土因素和人为因素的共同影响,



成土因素的组合错综复杂。尽管如此，不同水分状况、不同母质起源的种稻土壤培育过程各异，但在人为耕作、灌溉、施肥的影响下，最终均可以发育成剖面结构大体相似的水耕人为土^[8]。水耕人为土时间序列研究也显示水耕人为土磁化率随着种稻年限增加剖面有均一化趋势^[24-25]。自然成土因素（如母质、气候，等）的影响作用随着水耕时间的加长逐渐减弱。

2.5 人为作用

在水耕人为土发育过程中人为作用的方式多种多样，除了直接作用外，主要是通过影响和改变五大成土因素来影响或决定磁性矿物的生成和转化（表1）。对母质而言，主要是通过改变土壤物质

组成来影响土壤磁性矿物，如通过施用肥料、石灰、矿渣（如粉煤灰）、污灌、淤灌、洗盐等措施来实现；对地形而言，主要是通过修筑梯田，平整土地，人工堆积等措施来进行；对气候而言，主要通过人为措施削弱其对土壤发生的影响作用，如人为淹水、排水等改变土壤水分状况等；在生物方面，主要通过人为淹水、施用经微生物作用过的有机肥料或施用细菌肥料创造厌氧细菌繁育的条件促进厌氧还原的进程等。上述人为活动在不同历史时期是不同的，其作用也各不相同。近年来的土壤污染尤其是重金属污染态势日趋严重，需加强重金属污染物和磁性矿物的互馈替代等方面的研究，更好地理解人为因素在土壤磁性矿物生成转化中的作用。

表1 人为活动通过影响五大成土因素来影响水耕人为土磁性矿物的生成转化

Table 1 Human activities affect magnetic minerals through the alteration of other soil forming factors in the paddy soils

	人为活动 Human activities	影响作用 Influence
改变成土物质组成 Changing soil composition	施用有机肥料、泥肥，等	有机质输入，促进厌氧还原
	施用石灰，等	改变土壤pH，增加CO ₃ ²⁻
	客土；施用矿质肥料、矿渣、草木灰； 洪灌，淤灌，等	物质输入
	洗盐与返盐	改变土壤pH，减少或增加土壤离子
	重金属污染（污灌，等）；大气沉降，等	磁性矿物输入
影响地表形态 Changing surface morphology	平整土地；修筑梯田；人工堆积；湿地填高；水利 工程兴建，等	改变土壤水分状况，影响氧化还原交替过程
改变土壤水热气状况 Changing soil water, heat and air conditions	灌溉；排水，等	改变土壤水分状况，影响氧化还原交替过程
	焚烧秸秆；烤田，等	生成亚铁磁性矿物和赤铁矿，等
	秸秆或农膜覆盖；设施农地，等	改变土壤水分、温度状况
改变生物活动 Changing biological activities	人工栽培代替天然植被；通过耕作作为厌氧细菌繁 衍创造条件；施用经微生物作用的有机肥料，等	促进厌氧还原
	杀菌；水旱轮作，等	抑制厌氧还原

注：根据文献 [9, 18-19] 总结Note: Summarized based on reference [9, 18-19]

3 结论与展望

随着经济的发展，高强度的人类活动对土壤的影响越来越深刻。深入研究受各种人为作用影响的水耕人为土的磁性变化，特别是其磁性矿物生成转化机制，会给现代环境磁学带来很多启示，水耕人为土磁学研究迎来了新的机遇与挑战。尽管如此，目前水耕人为土磁学研究还比较零星，缺乏系统

性，一些问题亟待解决。

（1）机理研究不足。水耕人为土磁性矿物成因复杂，受水分状况、pH、Eh、有机质、碳酸钙、微生物和人为活动等多种因素的交叉影响。不同区域、不同成土阶段所受的影响因素也各不相同，今后应加强机理研究。

（2）缺乏对针铁矿、纤铁矿和水铁矿的量化手段。环境磁学发展至今，已经建立了一整套

的磁学手段,厘定赤铁矿、磁赤铁矿和磁铁矿的类型、含量、晶粒大小等^[10](具体方法详见文献[52]),进而判断其来源。针铁矿、纤铁矿和水铁矿是水耕人为土中最常见的矿物,它们的磁性和含量对理解水耕人为土成土过程中磁性矿物生成转化机制至关重要。但由于它们本身磁性很弱,在自然样品中,这些磁学特征往往被强磁性的磁铁矿和磁赤铁矿所掩盖。而利用磁学参数所建立起来的定量指标,例如硬剩磁、饱和等温剩磁经过交变退磁后的剩磁(退磁参数)等,因为受到矫顽力谱分布变化^[53]和部分矫顽力较高的亚铁磁性矿物影响,其定量的可靠性也受到了质疑。而且水耕人为土土壤溶液中离子浓度较高,磁性矿物常常受到替代的影响。例如针铁矿晶格中铝的含量可直接影响到矿物的磁学性质、特征光谱的位置和强度^[54],从而为针铁矿的定量研究带来不确定性。如何更有针对性地研究针铁矿、纤铁矿和水铁矿性质,研发新的定量分析仪器、探索新的定量计算方法以及寻找合适的特征替代指标,是当前水耕人为土磁学乃至环境磁学研究的一个重要方向。

(3) 很少结合土壤发生模拟实验。可能是由于试验耗时漫长,目前研究很少将土壤磁性和水耕人为土发生模拟实验结合在一起。如能将二者结合,建立磁性参数与水耕人为土发育的一些定性或定量关系模型,可为水耕人为土发育和管理提供一些特有信息。

(4) 水耕人为土磁性数据库缺失。目前大多数土壤调查仍侧重于N、P、K营养元素和质地等基础性指标,而忽视土壤磁性数据,这造成了我国大多数土壤数据库缺失磁性数据。这在一定程度上制约了对已有数据库的分析利用。没有基础数据库的支持,将很难进行更大范围内的多剖面研究和相互之间的比较研究,这也是制约土壤磁性应用最核心的问题。水耕人为土磁性数据库乃至土壤磁性数据库如何有序、快速建立是目前土壤环境磁学研究必须重点解决的问题。

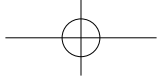
(5) 土壤分类参考方面尚未形成合适的体系。水耕人为土磁性剖面可反映水耕人为土的水分状况及氧化还原状况等差异,因而有研究者尝试利用水耕人为土磁化率剖面进行水耕人为土的分类和诊断^[19, 42]。但目前这方面尚未形成合适的体系。一方面是因为水耕人为土磁性数据库缺失,其制约了此类基础研究的开展。另一方面是在中国土壤系

统分类中水耕人为土的诊断指标多为定量化指标,但如前文指出的,水耕人为土中主要磁性矿物针铁矿、纤铁矿和水铁矿定量化尚有待提高,如何将磁性数据与其有机结合是目前尚未解决的难题,制约了磁性指标在土壤分类中的应用。但土壤磁化率等参数在野外获取相对简便、快捷,可在今后研究中尝试将其作为土壤分类的辅助指标。

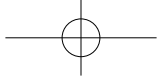
参 考 文 献

- [1] Gong Z T. Human-induced soil degradation in China// Proceedings of the expert consultation of the Asian network on problem soils. Bangkok, 1996
- [2] Bridges E M, Oldeman L R. Global assessment of human-induced soil degradation. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1999, 13 (4): 319—325
- [3] 张甘霖, 龚子同. 人为土壤形成过程及其在现代土壤学上的意义. *生态环境*, 2003, 12 (2): 184—191
Zhang G L, Gong Z T. Anthropogenesis and its significance in modern pedology (In Chinese). *Ecology and Environment*, 2003, 12 (2): 184—191
- [4] Yang D, Kanae S, Oki T, et al. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes. *Hydrological Processes*, 2003, 17: 2913—2928
- [5] Cook B I, Miller R L, Seager R. Amplification of the North American “Dust Bowl” drought through human-induced land degradation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106 (13): 4997—5001
- [6] Oost K V, Quine T A, Govers G, et al. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle. *Science*, 2007, 318 (5850): 626—629
- [7] Zika M, Erb K H. The global loss of net primary production resulting from human-induced soil degradation in drylands. *Ecological Economics*, 2009, 69 (69): 310—318
- [8] 龚子同, 陈志诚, 史学正, 等. 中国土壤系统分类: 理论、方法、实践. 北京: 科学出版社, 1999
Gong Z T, Chen Z C, Shi X Z, et al. *Chinese Soil Taxonomy: Theory, methodology, practice* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1999
- [9] 龚子同, 张甘霖, 陈志诚, 等. 土壤发生与系统分类. 北京: 科学出版社, 2007
Gong Z T, Zhang G L, Chen Z C, et al. *Pedogenesis and Soil Taxonomy* (In Chinese). Beijing: Science Press, 2007
- [10] 胡鹏翔, 刘青松. 磁性矿物在成土过程中的生成转化机制及其气候意义. *第四纪研究*, 2014, 34 (3): 458—473

- Hu P X, Liu Q S. The production and transformation of magnetic minerals during pedogenesis and its paleoclimate significance (In Chinese). *Quaternary Science*, 2014, 34 (3): 458—473
- [11] Le Borgne E. Susceptibilité Magnétique Anormale du sol superficiel. *Annales de Geophysique*, 1955, 11: 399—419
- [12] Mullins C E. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science-A review. *European Journal of Soil Science*, 1977, 28 (2): 223—246
- [13] Dearing J A, Hay K L, Baban S M J, et al. Magnetic susceptibility of soil: An evaluation of conflicting theories using a national data set. *Geophysical Journal International*, 1996, 127 (3): 728—734
- [14] Barrón V, Torrent J. Evidence for a simple pathway to maghemite in earth and mars soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66 (15): 2801—2806
- [15] Cabello E, Morales M P, Serna C J, et al. Magnetic enhancement during the crystallization of ferrihydrite at 25 and 50°C. *Clays and Clay Minerals*, 2009, 57 (1): 46—53
- [16] Michel F M, Barrón V, Torrent J, et al. Ordered ferromagnetic form of ferrihydrite reveals links among structure, composition, and magnetism. *Proceedings the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107 (7): 2787—2792
- [17] Hu P X, Liu Q S, Torrent J, et al. Characterizing and quantifying iron oxides in Chinese loess/paleosols: Implications for pedogenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 369/370: 271—283
- [18] 卢升高. 中国土壤磁性与环境. 北京: 高等教育出版社, 2003
- Lu S G. Chinese soil magnetism and environment (In Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2003
- [19] 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
- [20] Gong Z T. Pedogenesis of paddy soils and its significance in soil classification. *Soil Science*, 1983, 35: 5—10
- [21] Zhang G L, Gong Z T. Pedogenic evolution of paddy soils in different soil landscapes. *Geoderma*, 2003, 115: 15—29
- [22] Kyuma K. Paddy soil science. Japan: Kyoto University Press, 2004
- [23] 程汝饱, 周晓洪, 张希然. 广东省东江流域几种水分类型水稻土的水热状况和Eh变化//中国土壤系统分类新论. 北京: 科学出版社, 1994: 387—392
- Cheng R B, Zhou X H, Zhang X R. Changes in hydrothermal regime and Eh of several paddy soils in East River Basin of Guangdong Province (In Chinese) //New Discussion on Chinese Soil Taxonomy. Beijing: Science Press, 1994: 387—392
- [24] Han G Z, Zhang G L. Changes in magnetic properties and their pedogenetic implications for paddy soil chronosequences from different parent materials in South China. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64 (4): 435—444
- [25] Chen L M, Zhang G L, Rossiter D G, et al. Magnetic depletion and enhancement in the evolution of paddy and non-paddy soil chronosequences. *European Journal of Soil Science*, 2015, 66 (5): 886—897
- [26] Chen L M, Zhang G L, Effland W R. Soil characteristic response times and pedogenic thresholds during the 1000-year evolution of a paddy soil chronosequence. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75 (5): 1807—1820
- [27] Le Borgne E. Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol et sur celles du schiste et du granite. *Annales de Géophysique*, 1960, 16: 159—195
- [28] Lowenstam H A. Minerals formed by organisms. *Science*, 1981, 211 (4487): 1126—1131
- [29] Blakemore R P, Short K A, Bazylinski D A, et al. Microaerobic conditions are required for magnetite formation within aquaspirillum-magnetotacticum. *Geomicrobiology Journal*, 1985, 4 (1): 53—71
- [30] Li J, Pan Y, Chen G, et al. Magnetite magnetosome and fragmental chain formation of *Magnetospirillum magneticum* AMB-1: Transmission electron microscopy and magnetic observations. *Geophysical Journal International*, 2009, 177 (1): 33—42
- [31] Li J, Ge K, Pan Y, et al. A strong angular dependence of magnetic properties of magnetosome chains: Implications for rock magnetism and paleomagnetism. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14 (10): 3887—3907
- [32] Heller F, Liu T. Magnetism of Chinese loess deposits. *Geophysical Journal International*, 1984, 77 (1): 125—141
- [33] Thompson R, Oldfield F. Environmental magnetism. London: Allen and Unwin, 1986
- [34] Maher B A. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: Paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1998, 137: 25—54
- [35] Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, et al. Partly



- pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess. *Nature*, 1990, 346 (6286) : 737—739
- [36] Fine P, Singer M J, TenPas J, et al. New evidence for the origin of ferrimagnetic minerals in loess from China. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57 (6) : 1537—1542
- [37] Verosub K L, Fine P, Singer M J, et al. Pedogenesis and paleoclimate: Interpretation of the magnetic susceptibility record of Chinese loess-paleosol sequences. *Geology*, 1993, 21 (11) : 1011—1014
- [38] 俞劲炎, 赵渭生, 詹硕仁. 太湖流域水稻土的磁化率剖面. *土壤学报*, 1981, 18 (4) : 376—382
Yu J Y, Zhao W S, Zhan S R. The magnetic susceptibility profile of paddy soils in Taihu basin (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1981, 18 (4) : 376—382
- [39] 叶元林, 张作文, 俞劲炎, 等. 衢州市土壤的磁化率. *浙江农业大学学报*, 1984, 10 (2) : 47—49
Ye Y L, Zhang Z W, Yu J Y, et al. Magnetic susceptibility of several soil in Quzhou (In Chinese). *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 1984, 10 (2) : 47—49
- [40] 吴培祥, 郭树峰. 吉林省主要土壤的磁化率. *吉林农业大学学报*, 1986, 18 (2) : 76—78
Wu P X, Guo S F. Magnetic susceptibility of several soil in Jilin Province (In Chinese). *Journal of Jilin Agricultural University*, 1986, 18 (2) : 76—78
- [41] 卢升高. 红壤与红壤性水稻土中磁性矿物特性的比较研究. *科技通报*, 1999, 15 (6) : 409—413
Lu S G. A comparative study on magnetic minerals of red soil and paddy soil (In Chinese). *Bulletin of Science and Technology*, 1999, 15 (6) : 409—413
- [43] Lu S G, Zhu L, Yu J Y. Mineral magnetic properties of Chinese paddy soils and its pedogenic implications. *Catena*, 2012, 93: 9—17
- [43] Grimley D A, Arruda N K. Observations of magnetite dissolution in poorly drained soils. *Soil Science*, 2007, 172: 968—982
- [44] 章明奎. 赤铁矿在淹水还原条件下转化的实验室观察. *土壤通报*, 1993, 24 (6) : 249—249
Zhang M K. Hematite transformation under the reduced condition based on laboratory observation (In Chinese). *Chinese Journal Soil Science*, 1993, 24 (6) : 249—249
- [45] Schwertmann U. The effect of pedogenic environments on iron oxide minerals. *Advances in Soil Science*, 1985, 1: 171—200
- [46] Karim Z. Formation of aluminum-substituted goethite in seasonally waterlogged rice soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48 (2) : 410—413
- [47] Oades J M, Townsend W N. The detection of ferromagnetic minerals in soils and clays. *Journal of Soil Science*, 1965, 14 (2) : 179—187
- [48] 胡雪峰. “黄土-古土壤”序列中氧化铁和有机质对磁化率的影响. *土壤学报*, 2004, 41 (1) : 7—12
Hu X F. Influence of iron oxides and organic matter on magnetic susceptibility in the loess-paleosol sequence (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41 (1) : 7—12
- [49] 李庆逵. 中国水稻土. 北京: 科学出版社, 1992
Li Q K. Paddy soils of China (In Chinese). Beijing: Science Press, 1992
- [50] Blundell A, Dearing J A, Boyle J F, et al. Controlling factors for the spatial variability of soil magnetic susceptibility across England and Wales. *Earth Science Reviews*, 2009, 95 (3/4) : 158—188
- [51] 詹硕仁, 王建宁. 宁夏土壤磁性分布与地形地貌的关系. *宁夏农学院学报*, 1989 (2) : 26—32
Zhan S R, Wang J N. The relationship between topography and soil magnetism distribution in Ningxia Province (In Chinese). *Journal of Ningxia Agricultural College*, 1989 (2) : 26—32
- [52] Liu Q S, Deng C L, Torrent J, et al. Review of recent developments in mineral magnetism of the Chinese loess. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26 (3/4) : 368—385
- [53] Liu Q S, Roberts A P, Torrent J, et al. What do the HIRM and S-ratio really measure in environmental magnetism? *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2007, 8 (9) : Q09011
- [54] Jiang Z, Liu Q, Colombo C, et al. Quantification of Al-goethite from diffuse reflectance spectroscopy and magnetic methods. *Geophysical Journal International*, 2014, 196 (1) : 131—144



Review and Prospect of Researches on Production and Transformation of Magnetic Minerals in Paddy Soils during Pedogenesis

HAN Guangzhong¹ HUANG Laiming² LI Shanquan³ CHEN Liumei^{4†}

(1 College of Geography and Resources Science, Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641112, China)

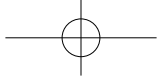
(2 The Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences

Beijing 100101, China)

(3 Department of Geography, Xingtai University, Xingtai, Hebei 054001, China)

(4 College of Resources and Environments, Zunyi Normal University, Zunyi, Guizhou 563002, China)

Abstract With the problem of environmental deterioration becoming increasingly conspicuous and the impact of anthropic activities on soil formation getting more and more intense in recent decades, it is, therefore, essential to intensify the researches on the impact so as to explain processes of and changes in magnetism in modern soils. Hydragric Anthrosols (paddy soils) are defined as Anthrosols, and their formations are affected by human activities in various ways. Tillage and anthrostatic moisture regimes are two major factors that control characteristics of the soil formation processes. However, so far only some scattered rather than systematic studies have been reported on how human activities induce changes in soil magnetism. Therefore, this paper is oriented to review or summarize all the findings of researches in this field, including characteristics of the evolution of parameters of magnetism in Hydragric Anthrosols, mechanisms of the formation and transformation of magnetic minerals and their responses to soil forming factors. Magnetic minerals in paddy soils, on one hand, inherit some of the features of their original soils and on the other, have undergone a series of apparent changes under the impacts of paddy cultivation. Water regime controlled the soil magnetic characteristics in the early stage of paddy soil formation, however, all different types of paddy soils could eventually develop into profiles similar in structure of magnetic susceptibility after long-term paddy cultivation. Most of the ferrimagnetic minerals and hematite in the anthrostatic epipedon tended to reduce into goethite, lepidocrocite and/or their hydrated forms within a short term, while in the hydragric horizons (subsoils) , the changes of magnetic minerals were more complicated and duration of artificial submergence and reduction degree were the major factors controlling changes of the ferrimagnetic minerals. In appropriate environment, Fe^{2+} got oxidized slowly, thus forming ferrimagnetic minerals, which may represent one mechanism for enhancement of magnetism in the subsoil. Ferrimagnetic minerals in clays in the paddy soil were susceptible to breakage, while newly formed ferromagnetic minerals were concentrated in soil aggregates of the clay fraction. In paddy soils, periodic submergence made it difficult for the soil to develop drought-stressed environment that could dehydrate ferrihydrite into hematite, which was usually reduced first in contrast to goethite under reductive conditions. Goethite and lepidocrocite often coexisted in paddy soils and their relative contents depended mainly on soil environment. Human activities affected or governed the formation and transformation of magnetic minerals in the paddy soil mainly through their impacts on natural soil forming factors (i.e., climate, organism, parent material, relief, time) . However, the impacts



reduced in degree with paddy cultivation going on. In the end, the paper summarized shortages and problems existing in current studies and prospected for directions of future researches in hope to help development of environmental magnetism.

Key words Hydragric Anthrosols (Paddy soils) ; Magnetic minerals; Pedogenesis; Soil forming factors

(责任编辑: 檀满枝)