

现代土壤磁化率空间分布特征及成壤影响因素分析 ——以桑干河阳原段为例

焦天¹⁾, 董进¹⁾, 汤文坤²⁾, 迟振卿¹⁾, 王永¹⁾, 庞健锋¹⁾, 孙楠³⁾

1) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037; 2) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081;
3) 北京东方纵横产品检测有限公司, 北京, 101102

内容提要: 为了揭示影响成壤作用发生的主要因素, 对河北省阳原县桑干河流域表层土壤开展常规土壤指标和环境磁学参数的地统计学分析, 结果表明, 土壤的频率磁化率(χ_{fd20})、Eh 值、有机质、黏土—粉砂含量等参数的空间分布特征受控于研究区的高程, 而土壤的含水量、铁游离度和活化度的空间分布特征受控于坡向。因此, 在影响成壤作用的五大因素(母质、气候、地形、有机质、时间)中, 地形(高程、坡向)是影响研究区成壤作用强弱的主要因素。此外, 虽然前人发现频率磁化率和铁游离度都能反映铁氧化物含量和成壤作用强弱, 但本次研究通过对比空间分布特征发现, 频率磁化率与有机质、Eh 值等土壤指标有较好的相似性, 且与耕地类型分布一致, 所以, 相对于铁游离度, 频率磁化率更能反映研究区土壤发育状况。

关键词: 频率磁化率; 成壤作用; Kriging 插值; 空间变异性; 影响因素

环境磁学由于其测试方法简便、经济快捷, 并具连续性好、对样品无破损等优点, 近年来被广泛应用于古环境重建和物源分析等领域(刘秀铭等, 1990; Maher, 1998; Evans et al., 2010; Balsam et al., 2011; Ouyang Tingping et al., 2016)。土壤磁学是在传统土壤学的基础上, 结合磁学手段来研究土壤成土过程中的发生机制, 进一步重建古环境(Maher et al., 1995; 邓成龙等, 2007; 王红强, 2007; 刘青松等, 2009; Balsam et al., 2011; 胡鹏翔等, 2014; Jordanova et al., 2016)。20 世纪 40 年代, Jenny (1941) 提出影响成土作用的五大因素——母质(P)、气候(Cl)、地形(R)、有机质(O)、时间(T)(Jenny, 1941), 随后国内外大量的学者开始通过土壤磁学来进行影响因素方面的研究(詹硕仁, 1986; 詹硕仁等, 1989; Jong et al., 2000; Magiera et al., 2006; Balsam et al., 2011; Yang Pingguo et al., 2015)。其中, 母质被认为是土壤磁性矿物产生的决定因素, 是土壤磁性增强的“本底”(Maher et al., 1995)。研究发现丰富的含铁矿物导致土壤磁化率更高(Singer et al., 1989; Dearing et al., 1996), 但

当 Fe 供给超过一定值时, 土壤磁性则不再受母质中 Fe 浓度影响(Maher et al., 1998, 2002, 2003)。黄土—古土壤序列与气候变化具有很好的对应关系(Heller et al., 1986; Kukla et al., 1988), 其中古土壤层的磁化率值 χ 可以指示亚洲夏季风强度(Heller et al., 1984; Kukla et al., 1988)。地形地貌影响着热量和雨量以及成土母质的再分配, 进而影响着土壤磁性物质的转化和再分配(詹硕仁等, 1989); 土壤坡度影响土壤含水量和保存时间, 进而决定土壤的风化程度(Dixon et al., 2012; 刘志锋等, 2013)。有机质对土壤中磁性矿物的生成起着促进作用或抑制作用(Orgeira et al., 2006; Kawamura et al., 2012)。此外, 污染土壤的磁性具有高 χ_{if} 、低 χ_{fp} 的特征(Hay et al., 1997; 旺罗等, 2000), 并且与重金属元素存在较强的相关性(卢瑛等, 2001; 李珊等, 2012)。

前人研究主要集中于揭示单个土壤剖面垂向上的磁性变化特征和机制。研究发现, 土壤中除了含有来自基岩的磁性矿物外, 还含有大量的次生磁性矿物。后者主要是通过成壤作用形成, 以细粒的超

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41372172)和中国地质调查局地质大调查项目(编号:DD2019060、DD2016012)和中国地质科学院地质研究所基本科研业务费项目(编号:J1603)的成果。

收稿日期:2019-08-09; 改回日期:2019-12-10; 责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2020.01.017

作者简介:焦天,女,1995年生,硕士研究生,第四纪地质与环境专业; Email: xtjiao95@163.com。通讯作者:董进,男,1977年生; 博士,副研究员,主要从事环境地质、第四纪地质等方面的研究; Email: djin@cags.ac.cn。

顺磁和单畴磁性矿物为主,从而导致土壤磁性矿物增强。磁化率(χ_{fr})和频率磁化率(χ_{fd})参数能明显指示土壤中超顺磁磁性矿物含量多少,从而揭示土壤层的成壤作用及强度 (Maher et al. , 1995, 2002; Liu Qingsong et al. , 2004; Deng Chenglong et al. , 2005)。相对而言,关于其横向上的空间分布特征和成壤因素影响的研究较少。地统计学是统计学的一个分支,相对于传统统计学,其更加偏重变量的空间相关性,具有较强的空间分析功能,目前该方法已被大量应用到土壤水分、容重、微量元素等物理、化学性质的研究中,是一种极为有效的分析土壤空间分布特征的方法 (Yost et al. , 1982; Chien Yiju et al. , 1997; 郭旭东等, 2000; Webster et al. , 2009)。本文尝试利用地统计学方法,利用桑干河阳原地区典型的河流地貌特征及其多样的土壤利用类型,对其表层土壤的磁性参数(磁化率 χ_{fr} 、频率磁化率 χ_{fd} 、频率磁化率百分数 χ_{fp}),结合其它土壤物理、化学指

标以及重金属元素,进行空间变异性分析,旨在揭示磁性空间变化特征和成壤作用的影响因素。

1 河北阳原桑干河流域自然概况和研究方法

1.1 自然概况

研究区位于河北省阳原县南部(图 1),该区属于东亚大陆性季风气候,年均温 7.7℃,年降水量大约 365 mm,昼夜温差大。桑干河由西向东从中间穿过,中部地势低,两边高。北侧为熊耳山,海拔 1122~2036 m,南侧为恒山余脉的六棱山,海拔为 1700~1857 m,中间盆地平均海拔 870 m。研究区内相对高差 300~800 m,主要由湖积台地、洪积台地和河流阶地构成。早更新世沉积湖泊地层,以灰绿色粘土为主,夹砂砾石层;早更新世后期,湖水变浅,以黄绿色粘土层为主。晚更新世以来,由于河流间歇性下

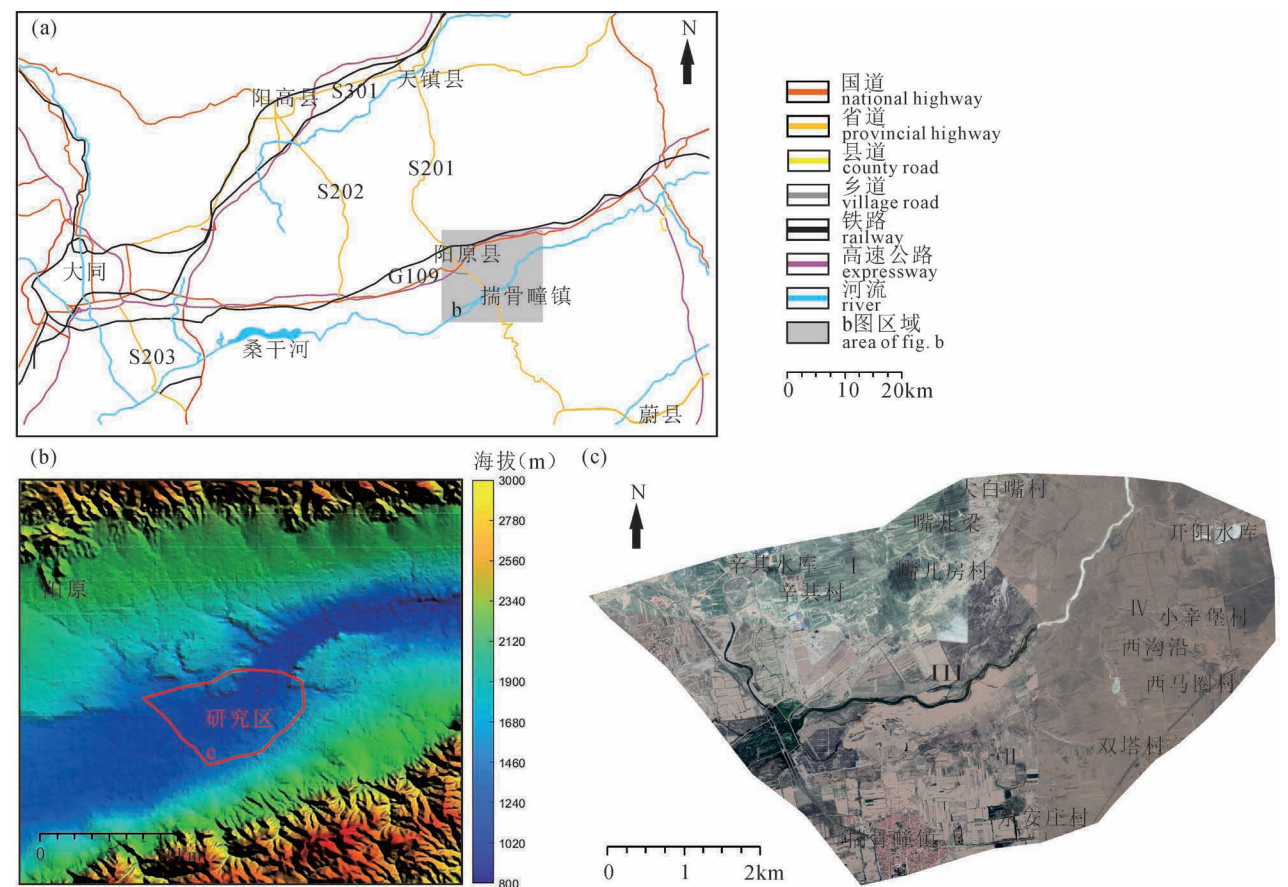


图 1 河北阳原桑干河流域地理位置:(a) 交通路线图(据闵隆瑞等, 2003 修改);(b) 阳原地区地形图(DEM 数据下载自谷歌地球);(c) 阳原县桑干河地区遥感影像(数据来自谷歌地球)

Fig. 1 Geographical location of the Sanggan River Basin, Yangyuan County, Hebei Province:(a) traffic map (from Min Longrui et al. , 2003&); (b) topographic map of Yangyuan and the surrounding area (DEM is downloaded from Google Earth); (c) satellite image of the Sanggan River in Yangyuan County (downloaded from Google Earth)

切,在桑干河两侧形成三级阶地,桑干河左岸,湖积台地受下部基岩保护,溯源侵蚀缓慢,台地保存较好,其上堆积晚更新世马兰黄土;桑干河右岸,泥河湾层被后期洪积扇覆盖(袁宝印等,2009)。

1.2 研究方法 with 数据处理

1.2.1 样品采集

研究区靠近南部山根,横跨桑干河河道。全区东西长约 9 km,南北宽约 7 km,总面积约 63 km²。北部以大白嘴村为界,南部以揣骨疃镇为界,土地类型为耕地、草地、林地、盐碱地、河道沙地等。采样时间为 2016 年 10 月中下旬(旱季)。以 0.2~0.5 km 为间隔,共计 114 个点,每个点采集土壤样品 2 个,采样深度分别为 5 cm 和 20 cm,前者称之为表层样,后者称之为亚表层样。各采样点的相对坐标采用差分 GPS 定位技术确定,室外将样品采集好后装入样品袋中并记好编号,室内装入体积为 2×2×2 cm³ 正方体样品盒中,用胶带缠好密封后进行磁学测量,散装样品经处理后用于粒度、地球化学元素等其它参数测量。

1.2.2 样品处理与分析

利用捷克 Agico 公司生产的 MFK1-FA

Kappabridge 多频磁化率仪测量表层(深度 0 cm)和亚表层(深度 20 cm)土壤样品的体积磁化率(κ_{lf})。测量频率为低频 976 Hz,测量磁场强度为 200 A/m,并利用质量和体积转化为质量磁化率(χ_{lf})。此外,为了获得频率磁化率,在 15616 Hz 高频磁场下测量了高频磁化率(χ_{hf})。利用公式 1 和公式 2 分别计算出频率磁化率(χ_{fd})和频率磁化率百分数(χ_{fp})。

$$\chi_{fd}=\chi_{lf}-\chi_{hf}$$
(1)

$$\chi_{fp}=(\chi_{lf}-\chi_{hf})/\chi_{lf}\times 100\%$$
(2)

磁化率是衡量岩石、矿物、土壤等物质在外磁场作用下被磁化难易程度的量度,一般用体积磁化率和质量磁化率表示。体积磁化率指在弱磁场中样品的感应磁化率强度与磁场强度之比;质量磁化率为单位体积样品的质量与体积磁化率之比,单位是 m³/kg。二者均能反映样品中所含磁性矿物的种类、粒度和含量。由于频率变动时,对在超顺磁/单畴(SP/SD)临界点附近颗粒的磁化率影响较大(Maher et al., 1988; Liu Qingsong et al., 2005b, 2012; 刘青松等, 2009),因此频率磁化率能很好地指示样品中超顺磁磁性颗粒的存在。其中,频率磁化率(χ_{fd})反映超顺磁磁性颗粒的绝对含量变化,频

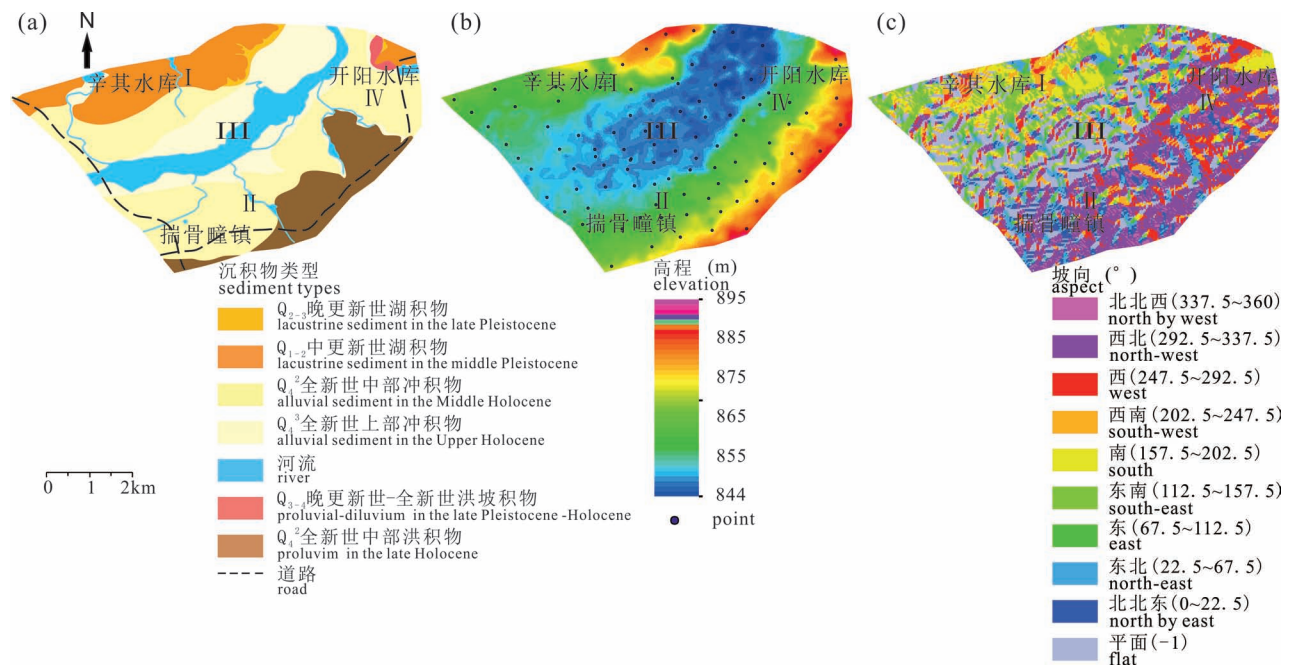


图 2 阳原桑干河流域自然地质背景: (a)地质概况(据闵隆瑞等,2003 修改);(b) 高程(DEM 数据 下载自谷歌地球);(c)坡向(数据来自地理空间数据云)

Fig. 2 Natural geological background of the Sanggan River Basin, Yangyuan County: (a) Geological map (from Min Longrui et al., 2002&); (b) elevation (DEM is downloaded from Google Earth); (c) aspect (loaded from Geospatial Data Cloud)

图中 I、II、III、IV 分别代表研究区北部、南部、中部和东部区域
I , II , III and IV represent the northern, southern, central and eastern part of the study area respectively

率磁化率百分数(X_{fp})反映超顺磁性颗粒的相对含量变化(Heller et al. , 1991)。

同时,为了更好地揭示土壤性质及其影响因素,配合测量了土壤的粒度、游离铁、活性铁、pH 值、Eh 值、含水量、有机质等土壤物理、化学指标,以及重金属元素含量。由于前期测得亚表层(深度 20 cm)土壤的磁化率较表层(深度 0 cm)具有更强的规律性,且表层土壤含较多落叶、草根等杂质,影响了土壤的本身特征,因此土壤指标测量只选取亚表层(深度 20 cm)样品。

土壤重金属元素 Ni、Cu、Pb、Zn、Hg、As、Cd、Cr 使用 $\text{HNO}_3\text{—HClO}_4\text{—HF}$ 混合酸溶,石墨炉原子吸收分光光度法测定。

粒度使用 MalvernMastersizer 2000 激光粒度分析仪。样品自然风干,约取 1 g 至 80 mL 烧杯中。加入 10mL 浓度为 10%的 H_2O_2 溶液,去除有机质,充分反应 24 h 之后,将样品放在加热板上至半湿润状态。然后加入 10 mL 浓度为 10%的 HCl 溶液,去除碳酸盐,充分反应 24 h。往样品溶液中加入去离子水,重复酸洗,直至溶液呈现中性。最后加入约 10 mL 六偏磷酸钠($(\text{NaPO}_3)_6$)溶液并置于超声波分散器中,超声震荡 15 min,充分分散样品溶液,等待上机处理。

全铁(Fe_t)、游离铁(Fe_d)和活性铁(Fe_o)分别使用碳酸锂—硼酸熔融—邻菲罗啉比色法、连二亚硫酸钠—柠檬酸钠—重碳酸钠(DCB 法)与酸性草酸铵测定。根据公式 3 和公式 4 分别计算铁游离度和活化度。

$$\text{铁游离度} = 100\% \times \text{Fe}_d / \text{Fe}_t \tag{3}$$

$$\text{活化度} = 100\% \times \text{Fe}_o / \text{Fe}_d \tag{4}$$

其中,铁游离度表示土壤发生过程中形成的结晶态次生铁氧化物,包括结晶态铁氧化物和无定形态铁氧化物占含铁氧化物总量的比重;活化度表示结晶铁向无定形铁的转化程度,无定形铁氧化物(主要是水铁矿和非晶质铁氧化物)占次生铁氧化物的比重(黄来明等, 2017)。

地统计学方法包含两部分,首先需要在区域化变量满足内蕴假设的前提下计算出半变异函数值(公式 5):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \tag{5}$$

其中, $\gamma(h)$ 是半变异函数中滞后距离 h 所对应的值,随着距离 h 的增大而增大,达到一定值时保持不变; $N(h)$ 表示采样点之间间距为 h 的样品对的数

目; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别是位置 x_i 和 $x_i + h$ 的采样值。

其次进行普通克里格插值(OK),利用线性无偏最优估计法得到未知区域(公式 6)

$$Z'(x_0) = \sum_{i=1}^n \omega_i Z(x_i) \tag{6}$$

参数 ω_i 是待估点 $Z'(x_0)$ 周围的已知点 x_i 的参数 $Z(x_i)$ 对其作出的贡献(公式 7)

$$\sum_{i=1}^n \omega_i C(x_i, y_j) + \mu = C_0(x_i, y_j),$$

$$(j = 1, 2, \dots, n), (\sum_{i=1}^n \omega_i = 1) \tag{7}$$

上述实验中磁性参数和粒度测量在中国地质科学院地质研究所完成,其余土壤指标测量在北京东方纵横产品检测有限公司完成。

1.2.3 数据处理

使用 SPSS 25.0 软件进行 Spearman 分析,得到磁性参数等土壤指标之间的相关系数。使用 ArcMap10.6 软件进行 Kriging 插值计算,得到亚表层(深度 20 cm)土壤磁性参数(X_{lt20} 、 X_{fd20} 、 X_{fp20})、土壤性质(pH 值、Eh 值、含水量、有机质、粒度、铁氧化物有关参数)和重金属元素的空间分布图。在利用 Kriging 插值法及 Spearman 法进行相关分析时,由于要求数据符合正态分布,否则可能存在比例效应,因此通过 Kolmogorov—Smirnov 法(K—S 法)对数据进行正态检验。

2 结果分析

2.1 土壤参数传统统计学分析

2.1.1 土壤参数描述性统计分析

表 1 显示,表层(深度 0 cm)磁化率(X_{lt5})值介于 $(0.25 \sim 6.77) \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ 之间,亚表层(深度 20 cm)磁化率(X_{lt20})值介于 $(0.07 \sim 3.12) \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ 之间,表层磁化率的平均值 $(1.15 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg})$ 略大于亚表层 $(0.94 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg})$,表明表层可能具有更多的磁性矿物含量。表层频率磁化率(X_{fd5})的平均值 $(18.11 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg})$ 也略大于亚表层 $(17.34 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg})$,表明表层相对于亚表层可能含有更多的超顺磁性矿物。前人研究显示,虽然关于磁性矿物转变的具体过程仍存在不同意见,但越来越多的证据说明成土过程中产生的细粒超顺磁赤铁矿是导致土壤磁性增强的主要机制,且超顺磁性矿物的含量能够反映成土作用的强度(Verosub et al. , 1993; Chen Tianhu et al. , 2005; Deng

Chenglong et al. , 2005; Liu Qingsong et al. , 2005a, 2007),所以表层相对较高的磁化率和频率磁化率表明表土比亚表土的成土作用可能更强。此外,表层和亚表层 χ_{lf} χ_{fd} χ_{fp} 等参数的变异系数($C. V.$)相似,分布于 0.62~0.72 之间,根据变异系数的划分等级: $C. V.$ <1,弱变异性; $C. V.$ = 0.1~1,中等变异性; $C. V.$ >1,强变异性(杨劲松等, 2007),表明表层和亚表层磁性参数均具有中等变异性。

pH 平均值为 9.2,最小值为 8.07,根据土壤酸度划分标准(于天仁等, 1987),研究区土壤总体属于碱性土。Eh 值介于 400.9~527.9 mV,处于氧化条件,这是由于当地为温带大陆性季风气候,气温降水分配不均衡,河道水量随季节变化,样品采集期正值旱季,河道处于干涸状态,所以土壤为氧化条件。pH、Eh、有机质、含水量的变异系数均介于 0.1~1,其中,有机质与含水量比 pH 与 Eh 变异强度大,可能是土壤中有机质和含水量更易受局部环境的影响。

根据中国环境质量标准值(GB15618-1995)(周

国华等, 2005),重金属 Cu、Zn、Ni、As、Pb 均小于国家一级自然背景值,Hg、Cr、Cd 轻微超过自然背景值,这可能是因为研究区处于乡镇周围,工厂或车辆较少,从而引起重金属污染影响较小。同时,重金属 Cu、Zn、Ni、As、Pb、Cr、Cd、Hg 的变异系数分布在 0.17~0.87 之间,即均具有中等变异性,反映了重金属元素在土壤中的均匀性和变异性(Yang Pingguo et al. , 2009)。

2.1.2 土壤参数相关性分析

为了揭示磁性参数 χ_{lf} χ_{fd} χ_{fp} 之间的相关性,利用 Spearman 法,并结合散点图进行相关性分析。Spearman 是一种用于检测依赖性的非参数方法,适用于连续与离散型变量,而双尾显著性检验($p \leq 0.05$)用于判别相关性是否具有统计意义。在进行相关性分析之前,通过 K—S 法对原始数据进行正态检验。检验结果显示,只有表层 χ_{fp5} 符合正态分布,其余参数均不符合正态分布,存在比例效应。比例效应会使块金值和基台值提高从而降低估测精度(郭旭东等, 2000),因此将原始数据进行对数转换,

消除比例效应,最终 χ_{lf5} χ_{fd5} χ_{lf20} χ_{fd20} 和 χ_{fp20} 均符合正态分布。

表 2 显示,表层和亚表层土壤磁性参数 χ_{lf} 与 χ_{fd} 之间均呈现极显著正相关性($p \leq 0.01^{**}$),相关性中等偏弱($R_5 = 0.315$ 和 $R_{20} = 0.331$)。同时,图 3a、b 散点图显示,两个土壤层的 χ_{lf} 与 χ_{fd} 参数也大致呈正相关,表明土壤层的磁性变化可能主要受超顺磁性矿物含量控制。 χ_{lf5} 与 χ_{fp5} ($R = -0.456$)、 χ_{lf20} 与 χ_{fp20} ($R = -0.337$)均呈现极显著负相关($p \leq 0.01^{**}$)。图 3c、d 显示,部分采样点超顺磁性颗粒(即 χ_{fp5} 和 χ_{fp20})相对含量较小时,土壤磁化率(χ_{lf5} 和 χ_{lf20})却较大,说明 MD 磁性颗

表 1 阳原县桑干河地区土壤磁性参数、基本性质与重金属描述性统计分析

Table 1 Descriptive statistics of magnetic parameters, basic properties and heavy metals for soil of Sanggan River in Hebei

	单位	平均值	标准偏差 S. D.	变异系数 (%) C. V.	偏度	峰度	最小值	最大值	a
χ_{lf5}	$10^{-6} m^3/kg$	1.15	0.83	0.72	0.47 ^L	0.59 ^L	0.25	6.77	—
χ_{fd5}	$10^{-9} m^3/kg$	18.11	11.62	0.64	-0.69 ^L	0.17 ^L	1.79	52.71	—
χ_{fp5}	%	1.85	1.15	0.62	1.18	2.48	0.12	6.85	—
χ_{lf20}	$10^{-6} m^3/kg$	0.94	0.60	0.64	-0.79 ^L	2.43 ^L	0.07	3.12	—
χ_{fd20}	$10^{-9} m^3/kg$	17.34	12.15	0.70	-0.98 ^L	1.32 ^L	0.41	50.56	—
χ_{fp20}	%	2.04	1.42	0.70	-1.11 ^L	1.75 ^L	0.06	7.47	—
pH	—	9.20	0.56	0.06	0.56 ^L	-0.65 ^L	8.07	10.63	—
Eh	mV	462.44	24.82	0.05	-0.06	-0.36	400.90	527.90	—
有机质	g/kg	4.52	4.52	0.60	-1.41 ^L	5.16 ^L	0.20	17.00	—
含水量	%	6.78	6.78	0.67	-0.52 ^L	-0.08 ^L	0.40	17.10	—
Cu	mg/kg	13.23	3.99	0.30	1.03	2.49	6.20	31.10	35
Zn	mg/kg	50.40	8.58	0.17	0.47	1.44	29.20	84.10	100
Ni	mg/kg	20.75	4.23	0.20	0.35 ^L	0.32 ^L	12.00	38.00	40
As	mg/kg	7.66	1.72	0.22	-0.48 ^L	1.95 ^L	3.30	14.00	15
Pb	mg/kg	11.25	2.38	0.21	0.49 ^L	0.57 ^L	7.00	19.00	35
Cr	mg/kg	53.64	11.55	0.22	0.78 ^L	1.57 ^L	32.50	103.20	90
Cd	mg/kg	0.09	0.04	0.50	-0.69 ^L	0.16 ^L	0.02	0.23	0.20
Hg	mg/kg	0.04	0.03	0.87	0.82 ^L	2.54 ^L	0.01	0.24	0.15

注: χ_{lf5} χ_{fd5} χ_{fp5} 分别表示表层 5 cm 样品磁化率、频率磁化率和频率磁化率百分数; χ_{lf20} χ_{fd20} χ_{fp20} 分别表示亚表层 20 cm 样品磁化率、频率磁化率和频率磁化率百分数;pH、Eh、有机质、含水量、重金属元素均为亚表层 20 cm 土壤样品;S. D. 表示标准偏差;C. V. 表示变异系数;L 表示将原始数据(重金属和土壤性质)作对数转换所得到的偏度和峰度;a 表示国家自然背景值,参照中国环境质量标准值(GB15618-1995)(周国华等, 2005)

表 2 阳原县桑干河地区土壤磁性参数之间相关系数
Table 2 Correlation coefficients of magnetic parameters for soil
of Sanggan River in Hebei

Spearman	χ_{I15}	χ_{fd15}	χ_{fp15}	χ_{I120}	χ_{fd120}	χ_{fp120}
χ_{I15}	1.000					
χ_{fd15}	0.315 **	1.000				
χ_{fp15}	-0.456 **	0.627 **	1.000			
χ_{I120}	0.667 **	0.220 *	-0.275 **	1.000		
χ_{fd120}	0.254 **	0.790 **	0.523 **	0.331 **	1.000	
χ_{fp120}	-0.261 **	0.556 **	0.744 **	-0.337 **	0.728 **	1.000

** —在 0.01 级别(双尾)相关性显著。* —在 0.05 级别(双尾)相关性显著。

表 3 阳原县桑干河地区土壤重金属元素之间相关系数
Table 3 Correlation coefficients of heavy metals

Spearman	Cu	Zn	Ni	As	Pb	Cr	Cd	Hg
Cu	1.000							
Zn	0.733 **	1.000						
Ni	0.894 **	0.845 **	1.000					
As	0.633 **	0.516 **	0.567 **	1.000				
Pb	0.535 **	0.782 **	0.586 **	0.441 **	1.000			
Cr	0.396 **	0.732 **	0.576 **	0.282 **	0.707 **	1.000		
Cd	0.339 **	0.354 **	0.301 **	0.232 *	0.271 **	0.174	1.000	
Hg	0.421 **	0.215 *	0.270 **	0.411 **	0.301 **	-0.086	0.170	1.000

** —在 0.01 级别(双尾)相关性显著；* —在 0.05 级别(双尾)相关性显著。

粒在部分采点中可能对磁化率也有较大的影响,这可能与当地母岩、风成沉积或污染有关(Thompson et al., 1986; Singer et al., 1989)。

对重金属元素原始数据进行Kolmogorov—Smirnov法(K—S法)正态检验发现,除Cu和Zn外均不符合正态分布,经对数转换之后As、Ni、Pb、Hg、Cd、Cr元素均符合正态分布。表3显示,绝大多数重金属元素呈极显著正相关性($p \leq 0.01^{**}$),少数呈显著相关($p \leq 0.05^{*}$),只有Cd、Cr、Hg三者之间没有显著性。这些表明重金属Cu、Zn、Ni、As、Pb在性质上具有相似性,而重金属Cd、Cr、Hg三个元素之间的分布差异较大。

2.2 土壤参数地统计学相关分析

2.2.1 磁性参数空间变异性特征分析

为了揭示土壤磁性的空间分布特征,对磁性参数进行经验半方差函数模型计算(图4a—f;表4)。其中,C0为块金值,通常表示由实验误差和小于实验取样尺度引起的变异;C0+C1为基台值,通常表示系统内总变异;块金值与基台值的比值C0/(C0+C1)则

可以表示随机部分引起的空间异质性占系统总变异的比例(郭旭东等,2000)。C0/(C0+C1)小于25%,表示为强空间相关性;在25%~75%之间,表示空间相关性中等;大于75%,表示空间相关性很弱(Cambardella et al., 1994),变异由随机因素组成,不适合采用空间插值的方法进行预测(Goovaerts, 1999)。 χ_{I15} 块金值/基台值为88%,说明在小于当前尺度下,影响该地区表层磁性矿物空间变异的过程作用很强;其余磁性参数 χ_{I120} 、 χ_{fd15} 、 χ_{fp15} 块金值/基台值均小于12%,说明这些磁性参数主要由结构性因素起作用。结构性因素(母质、气候、地形、有机质、土壤类型等)会导致土壤的空间相关性增强,而随机性因素(施肥,种植制度等人为活动)使得其空间相关性减弱,朝均一化方向发展(郭旭东等,

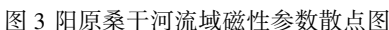
表 4 阳原县桑干河地区土壤磁性参数的半方差函数类型和模型参数
Table 4 Semi-variation function and theoretical Model of
magnetic parameters for soil of Sanggan River in Hebei

磁性参数	理论模型	C0	C0+C1	$\frac{C0}{C0+C1}$	Range (m)
χ_{I15}	多项式模型	0.22	0.25	0.88	1594.33
χ_{fd15}	常数模型	0.04	0.38	0.11	1391.64
χ_{fp15}	指数模型	0.03	0.43	0.07	1247.30
χ_{I120}	指数模型	0.04	0.34	0.12	2758.94
χ_{fd120}	高斯模型	0.00047	0.47	0.001	935.10
χ_{fp120}	指数模型	0.00060	0.60	0.001	944.34

表 5 阳原县桑干河地区土壤磁测参数与土壤性质相关系数
Table 5 Correlation coefficients between magnetic parameters
and soil properties

Spearman	χ_{I15}	χ_{fd15}	χ_{fp15}	χ_{I120}	χ_{fd120}	χ_{fp120}
粘粒	-0.103	0.295 **	0.373 **	-0.098	0.476 **	0.545 **
粉砂	-0.385 **	0.230 *	0.549 **	-0.529 **	0.322 **	0.729 **
砂粒	0.381 **	-0.234 *	-0.549 **	0.523 **	-0.330 **	-0.733 **
Eh	0.175	0.351 **	0.189 *	0.146	0.456 **	0.310 **
pH	-0.241 **	-0.301 **	-0.079	-0.232 *	-0.411 **	-0.225 *
有机质	0.046	0.385 **	0.314 **	0.087	0.544 **	0.488 **
含水量	-0.309 **	-0.041	0.202 *	-0.416 **	-0.029	0.203 *

注: ** —在 0.01 级别(双尾)相关性显著。* —在 0.05 级别(双尾)相关性显著。



(a) $\lg \chi_{\text{f15}} - \lg \chi_{\text{f45}}$ ($\lg \chi_{\text{f15}}$ 为表层土壤磁化率的对数值; $\lg \chi_{\text{f45}}$ 为表层土壤频率磁化率的对数值) (注: 对 $\chi_{\text{f15}} - \chi_{\text{f45}}$ 取对数, 正相关性更加明显); (b) $\chi_{\text{f120}} - \chi_{\text{f420}}$ (χ_{f120} 为亚表层土壤磁化率; χ_{f420} 为亚表层土壤频率磁化率); (c) $\chi_{\text{f15}} - \chi_{\text{fp5}}$ (χ_{f15} 为表层土壤磁化率; χ_{fp5} 为表层土壤频率磁化率百分数); (d) $\chi_{\text{f120}} - \chi_{\text{fp20}}$ (χ_{f120} 为亚表层土壤磁化率; χ_{fp20} 为亚表层土壤频率磁化率百分数)

(a) $\lg \chi_{t15} - \lg \chi_{fd15}$ ($\lg \chi_{t15}$ is the logarithm of soil magnetic susceptibility in topsoil; $\lg \chi_{fd15}$ is the logarithm of soil frequency-dependent magnetic susceptibility in topsoil); (b) $\chi_{t120} - \chi_{fd120}$ (χ_{t120} is soil magnetic susceptibility in subsoil; χ_{fd120} is soil frequency-dependent magnetic susceptibility in subsoil); (c) $\chi_{t15} - \chi_{fp15}$ (χ_{t15} is soil magnetic susceptibility in topsoil; χ_{fp15} is soil frequency-dependent magnetic susceptibility percentage in topsoil); (d) $\chi_{t120} - \chi_{fp120}$ (χ_{t120} is soil magnetic susceptibility in subsoil; χ_{fp120} is soil frequency-dependent magnetic susceptibility percentage in subsoil)

2.2.2 土壤参数 Kriging 空间插值分析

为更好的揭示研究区土壤空间变异特征与影响因素,利用 Kriging 插值法,分别绘制出土壤亚表层磁性参数、粒度、pH、含水量、有机质、Eh、全铁、铁游离度、铁活化度等土壤指标的空间分布图。此外,对于重金属污染元素选取相关性较强的 Cu、Zn 为代表元素,以及相关性差异较大的 Hg、Cr 元素,也分别绘制出空间分布图。由于重金属 Hg 的原始数据因方差过小无法计算出半变异函数值,因此将 Hg 原始数据增大至 1000 倍。

及东部地区 $\chi_{\text{I}20}$ 呈现高值($>1.0\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{kg}$), $\chi_{\text{f}20}$ 和 $\chi_{\text{f}20}$ ($<1\%$)相对偏低。研究区北部和南部地区 $\chi_{\text{I}20}$ 中等[($0.60\sim 0.98$) $\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{kg}$],而 $\chi_{\text{f}20}$ 和 $\chi_{\text{f}20}$ 偏高。

从图 5d—n 中看出, pH 值、Eh 值、有机质、粘土—粉砂含量、重金属 Cu、Zn、Hg 含量等土壤参数具有相似的空间分布特征, 其中, Eh 值、有机质、粘土—粉砂含量、重金属 Cu、Zn、Hg 含量在研究区北部和南部地区都呈现高值, 在中部地区呈现低值; 而 pH 值在北部和南部地区表现为低值, 在中部表现为高值。

从图 5k 中可以看出,重金属 Cr 在西北部相对

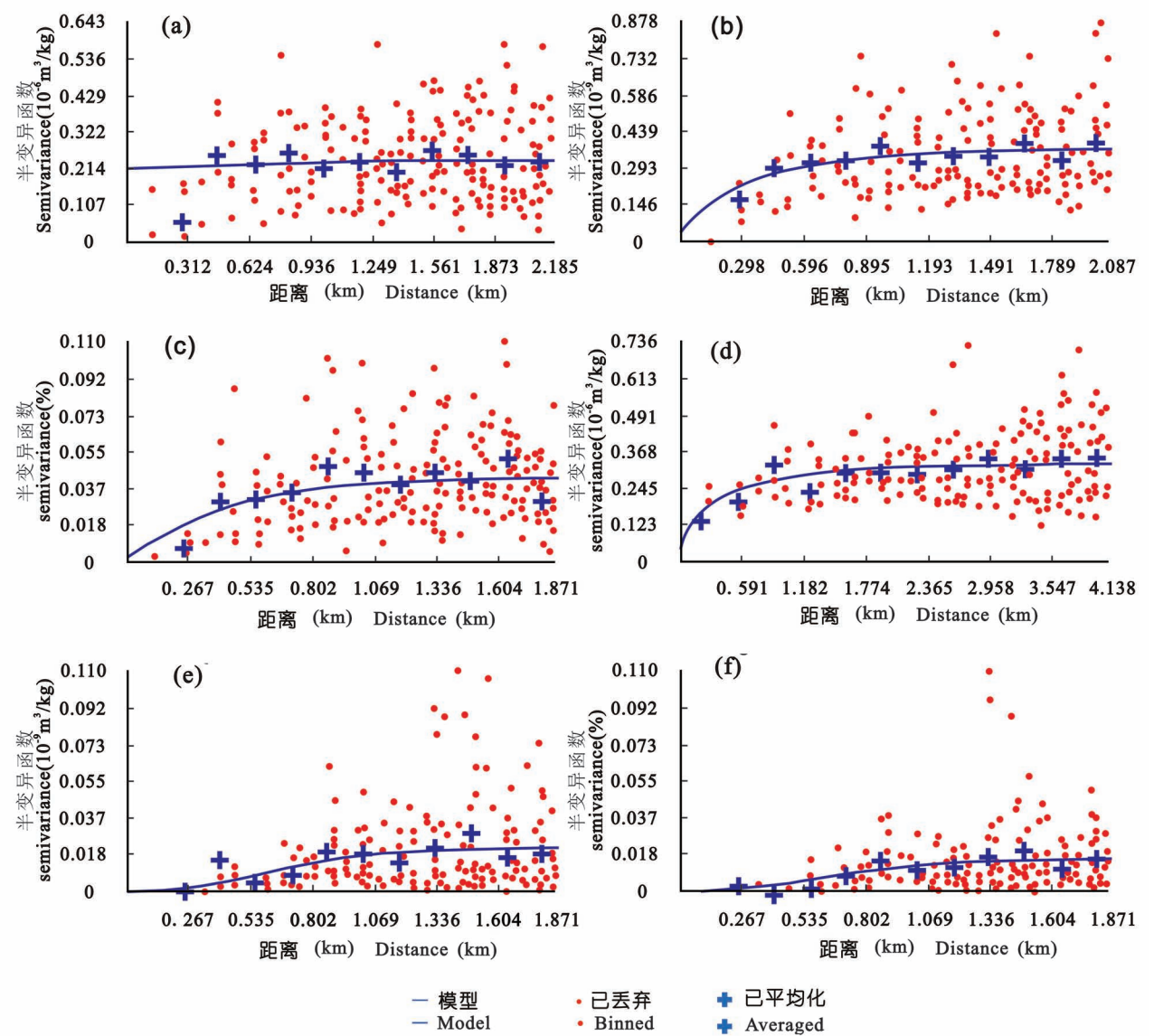


图4 阳原桑干河流域磁性参数半变异函数理论模型:(a) χ_{l15} ; (b) χ_{fd5} ; (c) χ_{fp5} ; (d) χ_{l20} ; (e) χ_{fd20} ; (f) χ_{fp20}

Fig. 4 Theoretical model of semi-variation function of magnetic parameters for the Sanggan River Basin, Yangyuan County: (a) χ_{l15} ; (b) χ_{fd5} ; (c) χ_{fp5} ; (d) χ_{l20} ; (e) χ_{fd20} ; (f) χ_{fp20}

横坐标代表采样点之间的距离 h ; 纵坐标 $\gamma(h)$ 表示间距为 h 的半方差, 在一定范围内, 随着距离 h 增大而增大, 超过该范围, 该值保持稳定。 χ_{l15} 、 χ_{fd5} 、 χ_{fp5} 分别表示表层 5 cm 土壤磁化率、频率磁化率和频率磁化率百分数, χ_{l20} 、 χ_{fd20} 、 χ_{fp20} 分别表示亚表层 20 cm 土壤磁化率、频率磁化率和频率磁化率百分数

lag distance h between samples is used as abscissa; semi-variance $\gamma(h)$ of distance h is used as ordinate, which increases with distance h increases within a certain range, this value remains stable exceeding this range. χ_{l15} , χ_{fd5} and χ_{fp5} represent soil magnetic susceptibility, frequency-dependent magnetic susceptibility and frequency-dependent magnetic susceptibilitypercentage in topsoil respectively; χ_{l20} , χ_{fd20} and χ_{fp20} represent soil magnetic susceptibility, frequency-dependent magnetic susceptibility and frequency-dependent magnetic susceptibilitypercentage in subsoil respectively

较高, 中东部次之, 东部最小, 与 Cu 等元素的空间分布图明显不同, 但与全铁空间分布图(图 5o)具有一定相似性, 可能 Cr 元素含量分布受多种环境因素制约, 关于其具体原因仍需要进一步详细研究。

从图 5g 中可以看出, 研究区土壤含水量的分布呈现北部和中部高, 东部和南部低的空间格局。同时, 图 5p—q 看出, 研究区北部和南部地区铁游离度 (Fe_d/Fe_t) 和活化度 (Fe_o/Fe_d) 呈现截然相反的规

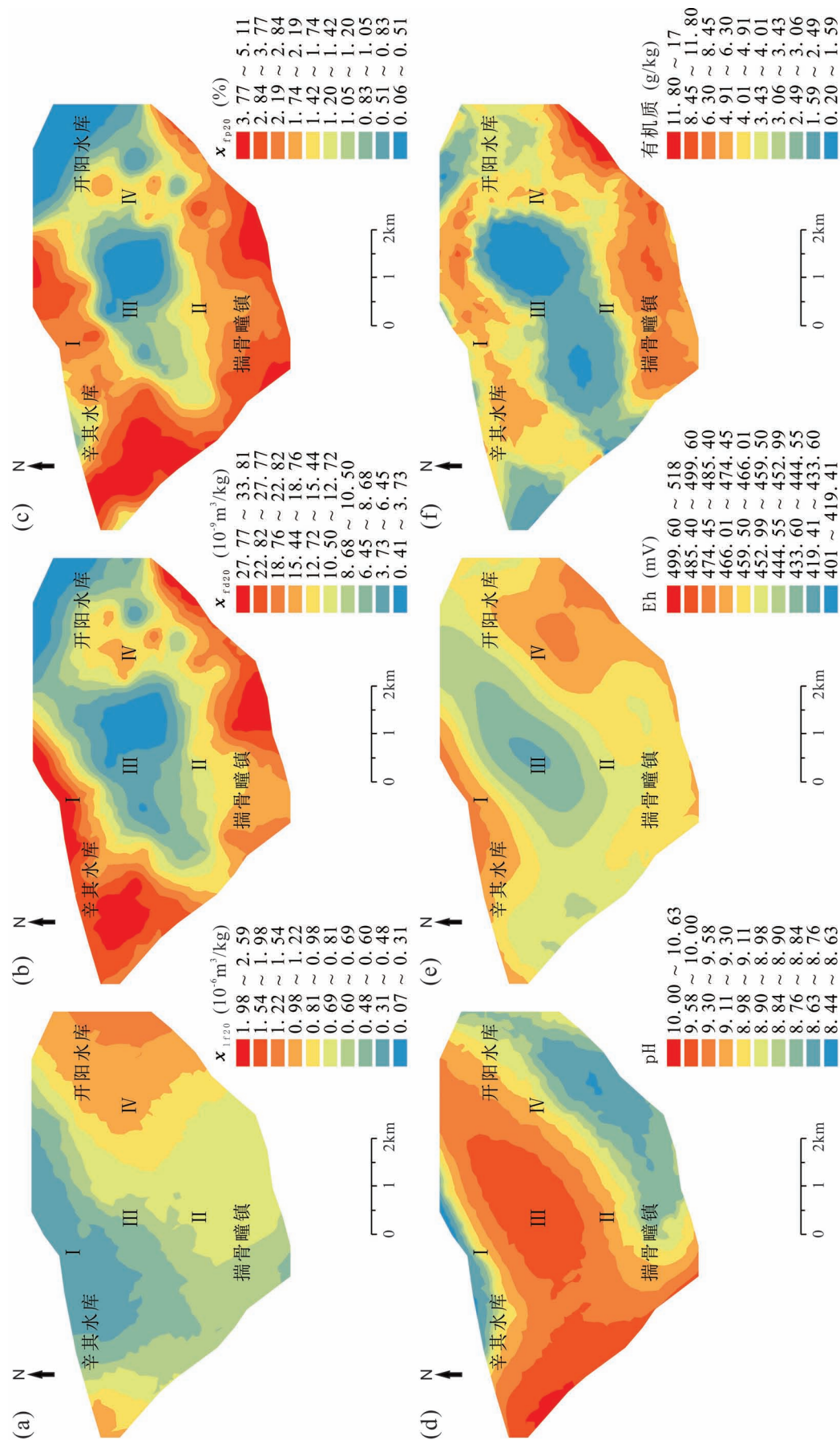


图5-1 阳原县桑干河地区亚表层（20 cm深）土壤指标空间分布图

Fig.5-1 Spatial patterns of soil subsurface soil parameters at 20cm depth of Sanggan River in Hebei

(a) χ_{r20} (亚表层20cm土壤磁化率); (b) χ_{a20} (亚表层20cm土壤频率磁化率); (c) χ_{p20} (亚表层20cm土壤频率磁化率百分数); (d) pH; (e) Eh; (f) 有机质

(a) χ_{r20} (magnetic susceptibility in 20 cm subsoil); (b) χ_{a20} (frequency-dependent magnetic susceptibility in 20 cm subsoil); (c) χ_{p20} (frequency-dependent magnetic susceptibility percentage in 20 cm subsoil); (d) pH; (e) Eh; (f) organic matter

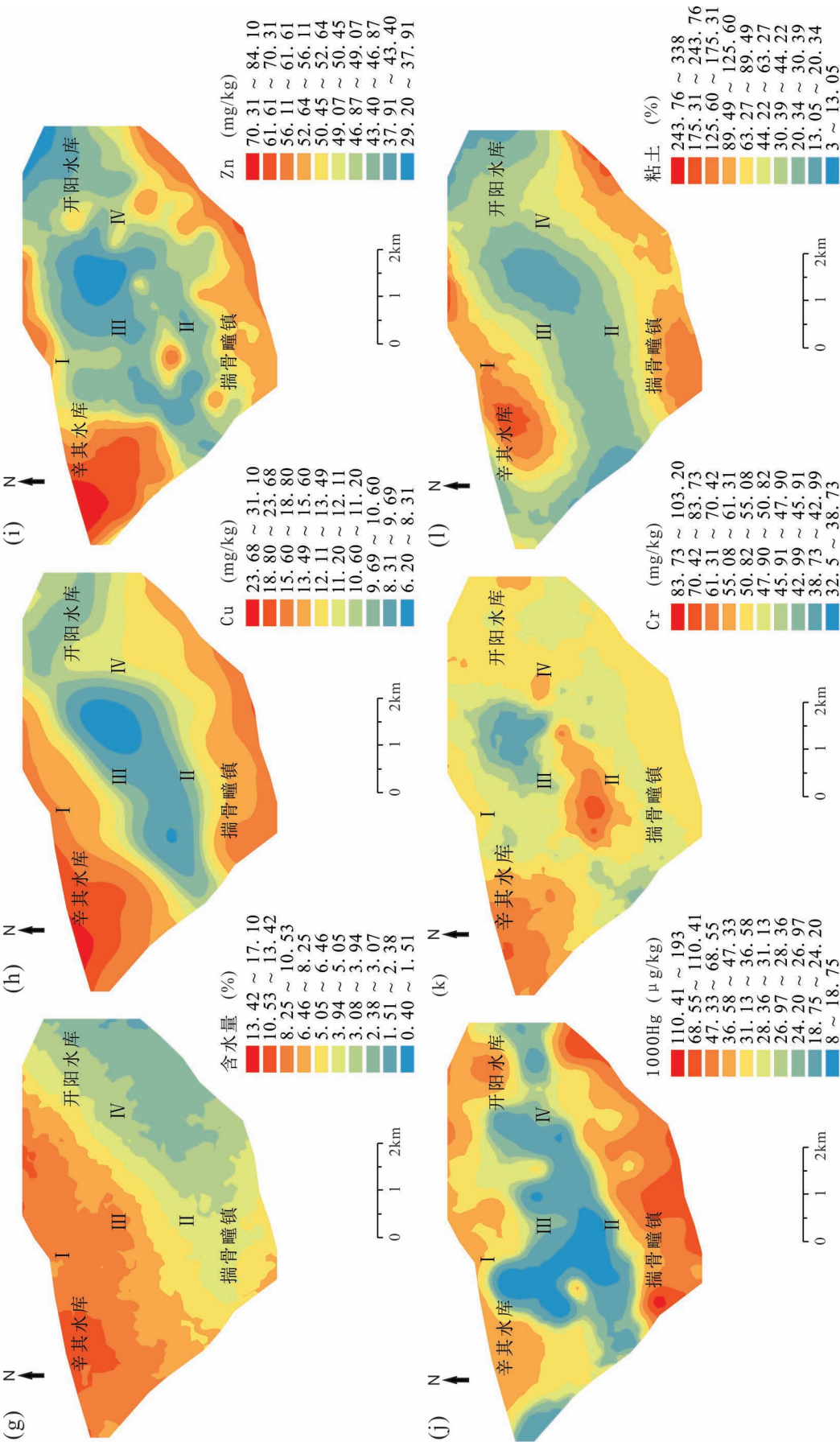


图5-2 阳原县桑干河地区亚表层（20 cm 深）土壤指标空间分布图

(g) 含水量; (h) Cu; (i) Zn; (j) Hg•1000; (k) Cr; (l) 黏土

(g) water storage; (h) Cu; (i) Zn; (j) Hg•1000; (k) Cr; (l) clay

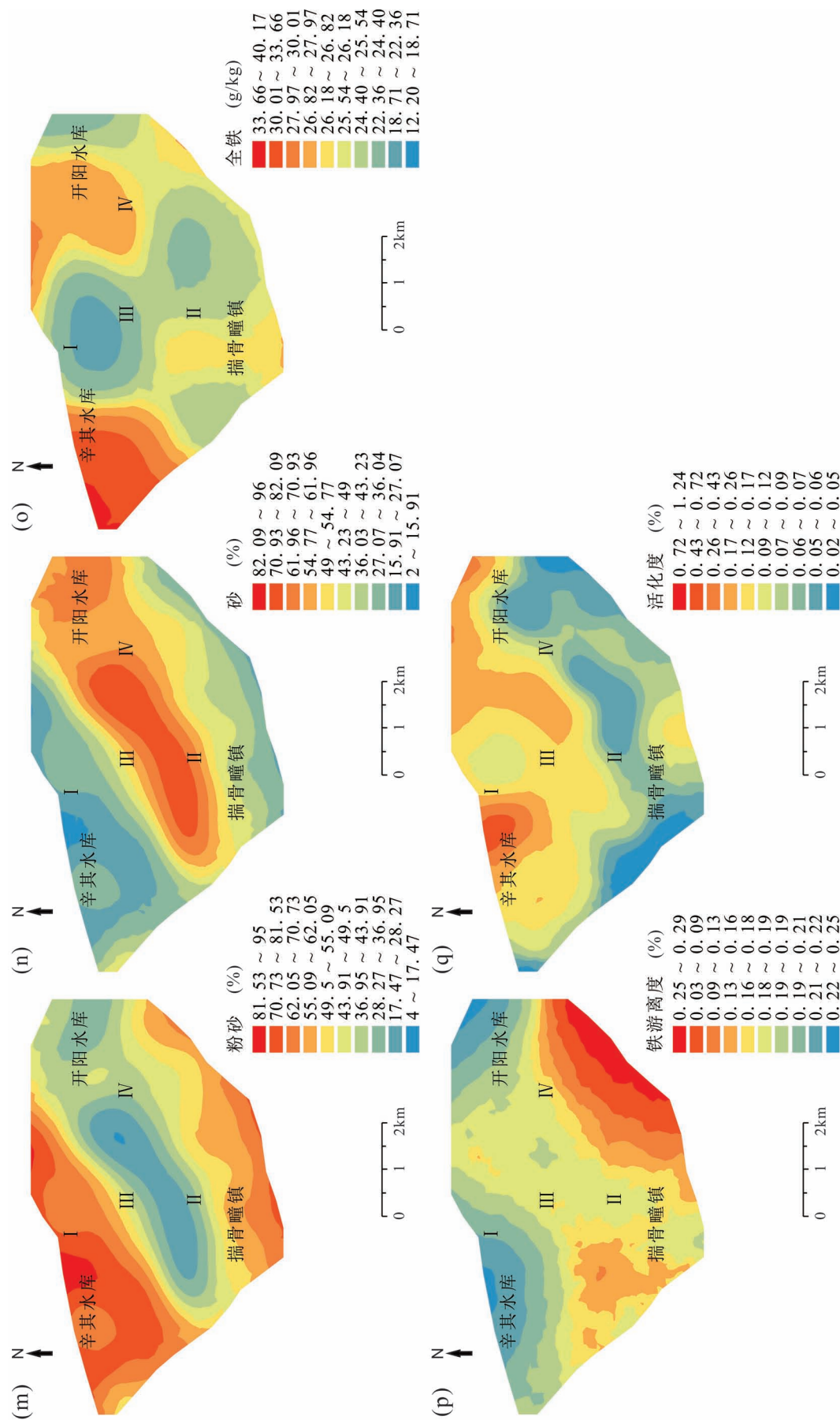


图5-3 阳原县桑干河地区亚表层 (20 cm深) 土壤指标空间分布图

Fig. 5-3 Spatial patterns of soil subsurface soil parameters at 20 cm depth of Sanggan River in Hebei

(m) 粉砂; (n) 砂; (o) 全铁; (p) 铁游离度; (q) 铁活化度

(m) silt; (n) sand; (o) Fe; (p) Fe_d; (q) Fe_a

律, Fe_d/Fe_t 在南部地区呈现高值, 而 Fe_o/Fe_d 在北部地区呈现高值, 与研究区含水量的分布特征相似。

3 讨论

3.1 土壤参数变化机制分析

3.1.1 pH 值、Eh 值、有机质、粒度变化分析

图 5d 显示, 研究区土壤 pH 值均大于 8, 整体偏碱性。土壤 pH 值是指示土壤酸碱度的关键指标 (Thomas, 1996)。土壤胶体吸附 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ 等盐基离子以及 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 等阴离子, 当盐基离子饱和度增加时, 引起交换性阳离子的水解, 最终产生 OH^- 使土壤总体呈现碱性 (戴树桂, 2006)。相对本次研究而言, 土壤 pH 在南部和北部呈现低值, 中部呈现高值, 这可能是因为受地形影响, 桑干河从中部穿过, 中间地势较低容易积水, 地层水和地下水中所含的盐分在土壤毛细管作用下上升到地表层 (杨劲松等, 2007), 而 Mg^{2+} , K^+ , Na^+ 随盐度升高而增加, 最终引起水解作用使溶液呈碱性。在实地取样过程中发现附近发育白色碱土, 与 pH 值空间分布特征一致。研究区北部和南部地区 pH 值偏低, 接近中性, 可能是因为桑干河两边地势较高, 排水性好, 盐基淋失作用增强, 有利于成壤作用的发生 (于天仁等, 1987), 实地调查显示, 此区域土地利用类型主要为耕地。

图 5e 显示, 整个研究区土壤 Eh 值均大于 400 mV, 偏于氧化环境, 相对而言, 中部地区氧化条件比北部和南部地区弱。氧化还原电位指示土壤的氧化还原条件 (Becking et al., 1960)。中部偏于还原条件可能是因为中部地势较低, 土壤长时间处于渍水环境, 还原作用相对较强 (Ponnamperuma, 1972)。

图 5f 显示, 有机质含量在北部和南部地区高于中部。有机质是指示土壤肥力状况的重要指标 (张勇等, 2005)。研究区北部和南部有机质偏高可能是因为所处环境使微生物具有适宜的生存条件, 从而使有机质浓度升高, 土壤肥力更好 (Singhet et al., 1989; 张勇等, 2005)。

图 5l—n 显示, 北部和南部地区以粘土和粉砂为主, 中部地区以砂粒为主。根据区域地质资料, 研究区是在晚更新世湖相台地和全新世洪积台地上发育的桑干河冲积河谷平原 (闵隆瑞等, 2003)。根据土壤分类, 河床组成物质主要为新成土和砂壤土, 其土质较松散, 抗冲刷能力较低。当雨季水量较大时, 由于中部地势较低, 水势较大, 流速较高, 河水更容易冲刷带走细颗粒物, 留下粗砂, 不利于土壤发

育; 而北部和南部由于地势较高, 水势较小, 细颗粒物更容易保留, 利于土壤发育。

综合分析, 北部和南部土壤具有偏中性和偏氧化的环境以及相对较高的有机质含量, 表明北部和南部的土壤发育相对于中部地区更好 (于天仁等, 1987; 张勇等, 2005), 更适合种植农作物, 这与野外实地踏勘调查发现北部和南部土地利用类型以耕地为主, 而中部土壤类型以砂质河道为主的结果一致。

3.1.2 Cu、Zn、Hg 等重金属元素变化分析

图 5h—j 显示, 重金属 Cu、Zn、Hg 具有南北高, 中间低的空间分布特征, 与 pH 值、有机质、土壤粒度等土壤参数分布特征非常相似, 且重金属 Cu、Zn、Ni、As、Pb 元素含量均在土壤背景值范围内。研究区北部和南部重金属含量偏高, 这可能是因为南北部土壤颗粒较细, 带负电荷的粘土矿物 (如蒙脱石等) 偏多, 比表面积大, 从而吸附性能较强, 同时, pH 值、有机质等土壤化学性质也会影响重金属元素的富集特性 (刘付程等, 2003; 卢瑛等, 2004)。

3.1.3 含水量、 Fe_d/Fe_t 、 Fe_o/Fe_d 变化分析

图 5g 显示, 西北地区的含水量大于东南地区, 可能与坡向 (图 2c) 有关。研究区的西北地区主要为东南坡向。由于研究区属于东亚大陆性季风气候, 夏季盛行东南风, 湿润多雨, 冬季盛行西北风, 气候寒冷干燥。本次研究采样时 (10 月下旬) 以东南风为主的雨季刚结束, 导致东南坡向含水量较高; 而西北坡向由于位于背风一侧, 含水量明显偏少 (朱素行等, 2010; 刘玉芝等, 2018; 杜军凯等, 2019)。

图 5p—q 显示, 铁游离度 (Fe_o/Fe_t) 和活化度 (Fe_o/Fe_d) 表现出与含水量相似的东南—西北差异空间分布特征。前人研究显示, 土壤水分状况会对不同形态铁氧化物转化、迁移与再分布造成影响 (黄来明等, 2017)。因此, 研究区铁游离度和活化度分布特征可能是受含水量控制。铁游离度为结晶态铁氧化物和无定形态铁氧化物占含铁氧化物总量的比重, 活化度为无定形铁氧化物 (主要是水铁矿和非晶质铁氧化物) 占含铁氧化物总量的比重。当土壤中含水量较少时, 偏氧化环境, 含 Fe^{3+} 较多的结晶态铁氧化物易保留, 导致铁游离度较高; 当含水量较多时, 偏还原环境, Fe^{3+} 易被还原成为 Fe^{2+} , 转化为无定形铁氧化物, 导致铁活化度较高 (Ponnamperuma, 1972; Kumke et al., 2005)。

3.2 土壤影响因素分析

前人研究发现, 影响土壤发育有五个因素: 分别

为母质(P)、气候(CI)、地形(R)、有机质(O)、时间(T)(Jenny, 1941)。

气候通过温度和降水量来影响土壤磁性变化,由于研究区范围较小,温度和降水量变化不明显,所以气候对其影响不大。母质是影响土壤磁性的“背景值”,而当其他因素保持不变时,时间则是决定后期成壤强度变化的唯一因素。对比图 2a 地质图发现,土壤发育与地质单元形成时期和地层岩性相关性并不明显,因此也可以排除母质和时间的影响。需要注意的是,从图 6 亚表层土壤磁化率与全铁的散点图可看出,当全铁(Fe_t)介于 20‰~30‰,该地区土壤磁化率与总铁呈现正相关关系,说明在一定条件下,总铁含量制约着土壤的磁性强度(Dearing et al., 1996)。

有机质、pH 值、Eh 值是指示土壤发育程度的重要指标(于天仁等, 1987)。频率磁化率也能较好的反映超顺磁性矿物的含量和成壤作用(Maher et al., 1988; Liu Qingsong et al., 2005b)。从表 5 中可以看出,亚表层土壤频率磁化率(χ_{fd20})、有机质、pH 值、Eh 值、粘土含量等参数具有较好的正相关性,与 pH 值呈现一定的负相关性,而空间分布图(图 5b-n)也显示出这些参数之间表现为相似的空间分布特征。此外,通过对比发现,这些参数的空间分布特征与高程有很好对应关系,表明研究区的成壤作用可能很大程度受高程影响。其中,频率磁化率(χ_{fd20})、有机质、Eh 值、粘土含量在研究区北部和南部呈现高值,在中部呈现低值;而 pH 值在研究区的北部和南部表现为低值,在中部表现为高值。根

据各参数之前的机制分析,推测可能是因为研究区所在的位置主要以土质疏松,抗冲刷能力低的砂壤土为主。雨季时水量较大,由于中部地势较低,水势较大,河水更容易冲刷带走细颗粒物质,留下粗砂,不利于有机质积累和土壤发育,且因为容易积水导致偏碱性和含氧量不足;而北部和南部由于地势较高,水势较小,细颗粒和有机质容易保留,有利于土壤发育和形成超顺磁磁性矿物(Singh et al., 1989; Fassbinder et al., 1990)。

需要注意的是,土壤发育可能还受坡向影响,这主要表现在含水量、铁游离度和铁活化度等指标上。研究区属于东亚大陆性季风气候,且研究区的西北部主要为东南坡向。由于本次研究采样时(10 月下旬)以东南风为主的雨季刚刚结束,导致东南坡向含水量较高。而较高的含水量又导致结晶态铁氧化物容易溶解形成无定形氧化物,造成铁活化度较高。

综上所述,研究区土壤发育主要是受地形影响,且主要体现在两个方面:① 高程;② 坡向。其中, χ_{fd20} 、 χ_{fp20} 、有机质、Eh 值、pH 值、土壤粒度、重金属元素等参数的空间分布特征与高程相似,反映了高程的影响;而含水量、铁游离度、铁活化度等参数的空间分布特征与坡向相似,反映了坡向的影响。

频率磁化率和铁游离度都能较好的反映土壤发育程度(Leigh, 1996; Liu Qingsong et al., 2005b)。频率磁化率主要反映成壤过程中形成的超顺磁性矿物含量(Maher et al., 1988; Liu Qingsong et al., 2005b),而铁游离度主要反映水铁矿、针铁矿、赤铁矿、磁赤铁矿等晶体和无定形铁氧化物总体含量(黄来明等, 2017)。本次研究显示,频率磁化率的空间分布特征与有机质、pH 值、Eh 值,以及土地类型相似,而铁游离度仅仅与含水量空间分布相似,表明频率磁化率相对于铁游离度能更好的反映土壤发育程度。

4 结论

(1) 对磁性参数的研究分析显示,表层和亚表层土壤磁性参数(χ_{lf} 、 χ_{fd} 、 χ_{fp})变异系数的变化范围在 0.62~0.72 之间,属于中等变异强度。同时,研究区土壤中总磁性矿物含量受到成土过程产生的超细粒磁性颗粒和由母质、风化作用以及人为活动产生的粗粒共同影响。

(2) 土壤性质和重金属元素的变异

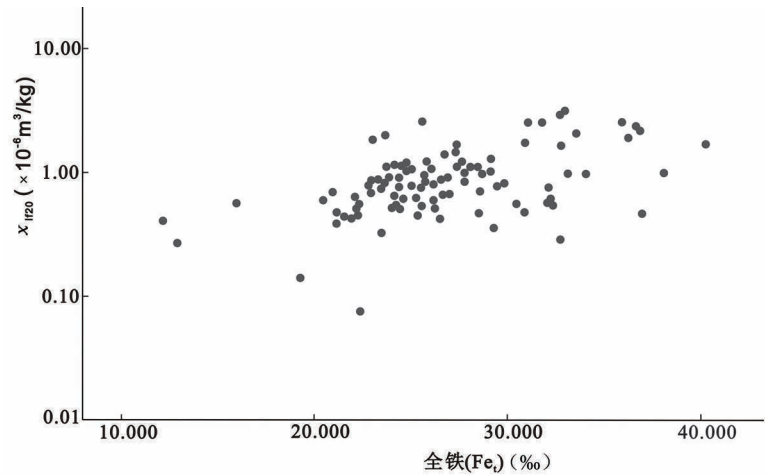


图 6 阳原县桑干河地区土壤亚表层磁化率与全铁散点图

Fig. 6 Scatter plots of χ_{fd20} versus Fe_t of the Sanggan River Basin in Yangyuan County

系数也均为中等变异强度,此外,重金属 Cu、Zn、Ni、As、Pb 均在国家自然背景值范围内,且元素之间呈现极显著正相关性。

(3) 通过众多参数的传统统计学和地统计学最终分析,地形是影响研究区成壤作用的关键因素。 χ_{fd20} 、 χ_{fp20} 、Eh 值、有机质、粘土—粉砂含量、重金属含量在北部和南部地区为高值,pH 值为低值,推测可能是高程导致水流侵蚀的变化,从而影响土壤发育,表明成壤作用很大程度上受高程控制;此外,含水量、铁游离度和活化度的空间分布特征与坡向相似,表明坡向也影响成壤作用。而坡向的影响可能是因为该地区为东亚季风区,采样时以东南风为主的雨季刚过,导致西北部东南坡向的含水量较大,东南部西北坡向的含水量较小。

(4) 虽然频率磁化率和铁游离度都能反映土壤中铁氧化物含量,但本次研究发现,频率磁化率与 pH、土壤粒度等反映成壤作用的土壤参数空间分布较为一致,而铁游离度仅仅与含水量分布特征相似,因此相对而言,频率磁化率能更好的反映土壤发育状况。

致谢:感谢中国地震局地球物理研究所王红强研究员、中国地质科学院地质研究所王丹博士在研究中给予的宝贵意见和帮助,感谢审稿专家和编辑提出的宝贵意见和建议!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 戴树桂. 2006. 环境化学(第二版). 北京:高等教育出版社:1~3.
- 邓成龙,刘青松,潘永信,朱日祥. 2007. 中国黄土环境磁学. 第四纪研究,27(2):193~209.
- 杜军凯,贾仰文,李晓星,牛存隐,刘欢,仇亚琴. 2019. 基于 TRMM 卫星降水的太行山区降水时空分布格局. 水科学进展, 30(1): 485~492.
- 郭旭东,傅伯杰,马克明,陈利顶,杨福林. 2000. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究——以河北省遵化市为例. 应用生态学报,11(4):557~563.
- 胡鹏翔,刘青松. 2014. 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,34(3): 458~473.
- 黄来明,邵明安,陈留美,韩光中,张甘霖. 2017. 水耕人为土时间序列铁氧化物与磁化率演变特征. 土壤学报,54(1):1~13.
- 李珊,胡雪峰,杜艳,姜琪,李洋,冯建伟,王建国. 2012. 上海嘉定区表土磁性强度的空间分异及环境指示意义. 土壤学报, 49(1): 9~17.
- 刘付程,史学正,王洪杰,张庆利. 2003. 苏南典型地区土壤锌的空间分布特征及其与土壤颗粒组成的关系. 土壤,35(4):330~333.
- 刘青松,邓成龙. 2009. 磁化率及其环境意义. 地球物理学报,52

(4):1041~1048.

- 刘秀铭,刘东生,Heller F,许同春. 1990. 黄土频率磁化率与古气候冷暖变换. 第四纪研究,10(1):42~50.
- 刘玉芝,常姝婷,华珊,黄建平. 2018. 东亚干旱半干旱区空中水资源研究进展,76(3):485~492.
- 刘志锋,刘青松. 2013. 陕西延安两个坡度不同土壤剖面磁学性质及其在古降雨量重建中的意义. 中国科学:地球科学,43(12):2037~2048.
- 卢瑛,龚子同,张甘霖. 2001. 城市土壤磁化率特征及其环境意义. 华南农业大学学报,22(4):26~28.
- 卢瑛,龚子同,张甘霖. 2004. 南京城市土壤重金属含量及其影响因素. 应用生态学报,15(1):123~126.
- 闵隆瑞,迟振卿. 2003. 河北阳原盆地西部第四纪地质. 北京:地质出版社:1~160.
- 王红强. 2007. 泥河湾盆地东谷坨剖面磁性特征及环境意义. 第四纪研究,27(6):1082~1091.
- 旺罗,刘东生. 2000. 污染土壤的磁化率特征. 科学通报,45(10):1091~1094.
- 杨劲松,姚荣江. 2007. 黄河三角洲地区土壤水盐空间变异特征研究. 地理科学,27(3): 348~353.
- 于天仁,陈志诚. 1987. 土壤化学原理. 北京:科学出版社:1~837.
- 袁宝印,同号文,温锐林,王燕华. 2009. 泥河湾古湖的形成机制及其与早期古人类生存环境的关系. 地质力学学报,15(1): 77~87.
- 詹硕仁. 1986. 影响宁夏土壤磁化率变化的主要因素初步探讨. 农业科学研究,2(z1): 7~12.
- 詹硕仁,王建宁. 1989. 宁夏土壤磁性分布与地形地貌的关系. 宁夏农学院学报,10(2):26~32.
- 张勇,庞学勇,包维楷,尤琛,汤浩茹,胡庭兴. 2005. 土壤有机质及其研究方法综述. 世界科技研究与发展,27(5): 72~78.
- 周国华,秦绪文,董岩翔. 2005. 土壤环境质量的制定原则与方法. 地质通报,24(8): 721~727.
- 朱素行,徐海明,徐蜜蜜. 2010. 亚洲夏季风区中尺度地形降水结构及分布特征. 大气科学,34(1):71~82.
- Balsam W L, Ellwood B B, Ji J, Williams E R, Long X, Hassani A E. 2011. Magnetic susceptibility as a proxy for rainfall: Worldwide data from tropical and temperate climate. Quaternary Science Reviews, 30:2732~2744.
- Becking L G M B, Kaplan I R, Moore D. 1960. Limits of the natural environment in terms of pH and oxidation—reduction potentials. The Journal of Geology, 68:243~284.
- Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, Karlen D L, Novak J M, Turco R F, Konopka A E. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil Science Society of America Journal, 58:1501~1511.
- Chen Tianhu, Xu Huifang, Xie Qiaoqin, Chen Jun, Ji Junfeng, Lu Huayu. 2005. Characteristics and genesis of maghemite in Chinese loess and paleosols: Mechanism for magnetic susceptibility enhancement in paleosols. Earth & Planetary Science Letters, 240:790~802.
- Chien Y J, Lee D Y, Guo H Y, Hwang K H. 1997. Geostatistical analysis of soil properties of mid—west Taiwan soils. Soil Science, 162(4): 291~298.
- Dai Shugui. 2006#. Environmental Chemistry (the second edition). Beijing:Higher Education Press: 1~3.
- Dearing J A, Hay K L, Baban S M J, Huddleston A S, Wellington E M H, Loveland P J. 1996. Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conflicting theories using a national data set. Geophysical Journal International, 127:728~734.
- Deng Chenglong, Vidic N J, Verosub K L, Singer M J, Liu Qingsong,

- Shaw J, Zhu Rixiang. 2005. Mineral magnetic variation of the Jiaodao Chinese loess/paleosol sequence and its bearing on long-term climatic variability. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 110(B3):B03103.
- Deng Chenglong, Liu Qingsong, Pan Yongxin, Zhu Rixiang. 2007&. Environmental magnetism of Chinese loess—paleosol sequences. *Quaternary Sciences*, 27(2):193~209.
- Dixon J L, Hartshorn A S, Heimsath A M, Dibiase R A, Whipple K X. 2012. Chemical weathering response to tectonic forcing: A soils perspective from the San Gabriel Mountains. *California. Earth & Planetary Science Letters*, 323~324:40~49.
- Du Junkai, Jia Yangwen, Li Xiaoxing, Niu Cunwen, Liu Huan, Qiu Yaqin. 2019&. Study on the spatial—temporal distribution pattern of precipitation in the Taihang Mountain region using TRMM data. *Advances in Water Science*, 30(1):485~492.
- Evans M E, Heller F. 2010. Magnetic enhancement and palaeoclimate: Study of a loess/paleosol couplet across the Loess Plateau of China. *Geophysical Journal International*, 117(1):257~264.
- Fassbinder J W E, Stanjekt H, Vali H. 1990. Occurrence of magnetic bacteria in soil. *Nature*, 343:161~163.
- Goovaerts P. 1999. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 89:1~45.
- Guo Xudong, Fu Bojie, Ma Keming, Chen Liding, Yang Fulin. 2000#. Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS——A case study in Zunhua city of Hebei. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 11(4):557~563.
- Hay K L, Dearing J A, Baban S M J, Loveland P. 1997. A preliminary attempt to identify atmospherically-derived pollution particles in English topsoils from magnetic susceptibility measurements. *Physics & Chemistry of the Earth*, 22:207~210.
- Heller F, Liu Tungsheng. 1984. Magnetism of Chinese loess deposits. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 77:125~141.
- Heller F, Liu Tungsheng. 1986. Palaeoclimatic and sedimentary history from magnetic susceptibility of loess in China. *Geophysical Research Letters*, 13:1169~1172.
- Heller F, Liu Xingming, Liu Tungsheng, Xu Tongchun. 1991. Magnetic susceptibility of loess in China. *Earth & Planetary Science Letters*, 103:301~310.
- Hu Pengxiang, Liu Qingsong. 2014&. The production and transformation of magnetic minerals during pedogenesis and its paleoclimate significance. *Quaternary Sciences*, 34(3):458~473.
- Huang Laiming, Shao Ming'an, Chen Liumei, Han Guangzhong, Zhang Ganlin. 2017&. Evolution characteristics of iron oxide and magnetic susceptibility in stagnic anthrosols along chronosequences. *Acta Pedologica Sinica*, 54(1):1~13.
- Jenny H. 1941. *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology*. New York: McGraw-Hill:1~281.
- Jong E D, Pennock D J, Nestor P A. 2000. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada. *Catena*, 40:291~305.
- Jordanova N, Jordanova D, Petrov P. 2016. Soil magnetic properties in Bulgaria at a national scale—Challenges and benefits. *Global & Planetary Change*, (137):107~122.
- Kawamura N, Ishikawa N, Torii M. 2012. Diagenetic alteration of magnetic minerals in Labrador Sea sediments (IODP Sites U1305, U1306, and U1307). *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 8(13):1~16.
- Kukla G, Heller F, Liu Xiumin, Xu Tongchun, Liu Tungsheng, An Zhisheng. 1988. Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility. *Geology*, 16(9):811~814.
- Kumke T, Schoonderwaldt A, Kienel U. 2005. Spatial variability of sedimentological properties in a large Siberian lake. *Aquatic Sciences*, 67:86~96.
- Leigh D S. S. 1996. Soil chronosequence of brasstown creek, Blue Ridge mountains, USA. *Catena*, 26:99~114.
- Li Shan, Hu Xuefeng, Du Yan, Jiang Qi, Li Yang, Feng Jianwei, Wang Jianguo. 2012&. Spatial variation of magnetic intensity of topsoils in Jiading distribution, Shanghai and its environmental implication. *Acta Pedologica Sinica*, 49(1):9~17.
- Liu Fucheng, Shi Xuezheng, Wang Hongjie, Zhang Qingli. 2003&. Spatial distribution of soil Zn and relationship between soil Zn and soil particle composition in typical area of southern Jiangsu province. *Soils*, 35(4):330~333.
- Liu Qingsong, Banerjee S K, Jackson M J, Deng Chenglong, Pan Yongxin, Zhu Rixiang. 2004. New insights into partial oxidation model of magnetites and thermal alteration of magnetic mineralogy of the Chinese loess in air. *Geophysical Journal International*, 158:506~514.
- Liu Qingsong, Deng Chenglong, Yu Y, Torrent J, Jackson M J, Banerjee S K, Zhu Rixiang. 2005a. Temperature dependence of magnetic susceptibility in an argon environment: implications for pedogenesis of Chinese loess/paleosols. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 161:102~112.
- Liu Qingsong, Torrent J, Maher B A, Yu Y, Deng Chenglong, Zhu Rixiang, Zhao Xixi. 2005b. Quantifying grain size distribution of pedogenic magnetic particles in Chinese loess and its significance for pedogenesis. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 110(B11):1~7.
- Liu Qingsong, Deng Chenglong, Torrent J, Zhu Rixiang. 2007. Review of recent developments in mineral magnetism of the Chinese loess. *Quaternary Science Reviews*, 26:368~385.
- Liu Qingsong, Deng Chenglong. 2009#. Magnetic susceptibility and its environmental significance. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(4):1041~1048.
- Liu Qingsong, Roberts A P, Larrasoana J C, Banerjee S K, Guyodo Y, Tauxe L, Oldfield F. 2012. Environmental magnetism: Principles and applications. *Reviews of Geophysics*, 50:1~50.
- Liu Xiuming, Liu Tungsheng, Heller F, Xu Tongchun. 1990&. Frequency-dependent susceptibility of loess and quaternary paleoclimate. *Quaternary Sciences*, 10(1):42~50.
- Liu Yuzhi, Chang Shuting, Hua Shan, Huang Jianping. 2018&. Major studies of the atmosphere water resources over arid and semi-arid areas in east Asia. *Acta Meteorologica Sinica*, 76(3):485~492.
- Liu Zhifeng, Liu Qingsong. 2013&. Magnetic properties of two soil profiles from Yan'an, Shaanxi Province and their implications for paleorainfall reconstruction. *Science China: Earth Sciences*, 43(12):2037~2048.
- Lu Ying, Gong Zitong, Zhang Ganlin. 2001&. The magnetic susceptibility of characteristic of urban soil and its environmental significance. *Journal of South China Agricultural University*, 22(4):26~28.
- Lu Ying, Gong Zitong, Zhang Ganlin. 2004#. Heavy metal concentration in Nanjing urban soils and their affecting factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 15(1):123~126.
- Magiera T, Strzyszc Z, Kapicka A, Petrovsky E. 2006. Discrimination of lithogenic and anthropogenic influences on topsoil magnetic susceptibility in Central Europe. *Geoderma*, 130:299~311.
- Maher B A, Taylor R M. 1988. Formation of ultrafine-grained magnetite in soils. *Nature*, 336:368~370.
- Maher B A, Thompson R. 1995. Paleorainfall reconstructions from

pedogenic magnetic susceptibility variations in the Chinese loess and paleosols. *Quaternary Research*, 44:383~391.

Maher B A. 1998. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. *Paleogeography Paleoclimatology Paleoecology*, 137:25~54.

Maher B A, Alekseev A, Alekseeva T. 2002. Variation of soil magnetism across the Russian steppe: its significance for use of soil magnetism as a palaeorainfall proxy. *Quaternary Science Reviews*, 21:1571~1576.

Maher B A, Alekseev A, Alekseeva T. 2003. Magnetic mineralogy of soils across the Russian Steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation. *Paleogeography Paleoclimatology Paleoecology*, 201:321~341.

Min Longrui, Chi Zhenqing. 2003&. *Quaternary geology in the west of the yangyuan Basin in Hebei*. Beijing: Geological Publishing House: 1~160.

Orgeira M J, Compagnucci R H. 2006. Correlation between paleosol—soil magnetic signal and climate. *Earth Planets & Space*, 58:1373~1380.

Ouyang Tingping, Li Mingkun, Zhao Xiang, Zhu Zhaoyu, Tian Chengjing, Yan Qiu, Peng Xuechao, Hu Qiao. 2016. Sensitivity of sediment magnetic records to climate change during Holocene for the northern South China Sea. *Frontiers in Earth Science*, 4: 54.

Ponnamperuma F N. 1972. The Chemistry of submerged soils. *Advances in Agronomy*, 24:29~96.

Singer M J, Fine P. 1989. Pedogenic factors affecting magnetic susceptibility of northern California soils. *Soil Science Society of America Journal*, 53:1119~1127.

Singh J S, Raghubanshi A S, Singh R S. 1989. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna. *Nature*, 338:499~500.

Thomas G. 1996. Soil pH and soil acidity. In: *Methods of Soil Analysis, Part 3—Chemical Methods*. Madison, Wisconsin, USA, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy: 16.

Thompson R, Oldfield F. 1986. *Environmental Magnetism*. London: Allen and Union: 1~237.

Verosub K L, Fine P, Singer M J, Tenpas J. 1993. Pedogenesis and paleoclimate: Interpretation of the magnetic susceptibility record of Chinese loess—paleosol sequences. *Geology*, 21(11):1011~1014.

Wang Hongqiang. 2007&. Magnetic properties of lacustrine sediments at the Donggutuo section in the Nihewan Basin and their environmental significance. *Quaternary Sciences*, 27(6):1082~1091.

Wang Luo, Liu Tungsheng. 2000#. The characteristics of susceptibility of polluted soils. *Chinese Science Bulletin*, 45(10):1091~1094.

Webster R, Oliver M A. 2009. *Geostatistics for Environmental Scientists (Second Edition)*. UK: John Wiley & Sons Ltd. :1~309.

Yang Jingsong, Yao Rongjiang. 2007&. Spatial variability of soil water and salt characteristics in the Yellow River Delta. *Scientia Geophysica Sinica*, 27(3):348~353.

Yang Pingguo, Mao Renzhao, Shao Hongbo, Gao Yunfeng. 2009. The spatial variability of heavy metal distribution in the suburban farmland of Taihang Piedmont Plain, China. *Comptes Rendus Biologies*, 332(6):558~566.

Yang Pingguo, Yang Miao, Mao Renzhao, Byrne J M. 2015. Impact of long-term irrigation with treated sewage on soil magnetic susceptibility and organic matter content in north China. *Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology*, 95:102~107.

Yost R S, Uehara G, Fox R L. 1982. Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. I. Semi-variograms I. *Soil Science Society of America Journal*, 46(5):1028~1032. .

Yu Tianren, Chen Zhicheng. 1987#. *The Principles of Soil Chemistry*. Beijing: Science Press: 1~837.

Yuan Baoyin, Tong Haowen, Wen Ruilin, Wang Yanhua. 2009&. The formation mechanism of the Nihewan paleo-lake and its relationship with living environment for early ancient humen. *Journal of Geomechanics*, 15(1):77~87.

Zhan Shuoren. 1986#. Discussion on factors influencing the magnetic susceptibility change of Ningxia soils. *Journal of Ningxia Agricultural College*, 2(S1):7~12.

Zhan Shuoren, Wang Jianning. 1989&. The relationship between topography and soil magnetism distribution in Ningxia Province. *Journal of Ningxia Agricultural College*, 10(2):26~32.

Zhang Yong, Pang Xueyong, Bao Weikai, You Chen, Tang Haoru, Hu Tingxing. 2005#. A review of soil organic matter and its research methods. *World Sci.-Tech. R. & D.*, 27(5):72~78.

Zhou Guohua, Qin Xuwen, Dong Yanxiang. 2005#. Soil environmental quality standards: principle and method. *Geological Bulletin of China*, 24(8):721~727.

Zhu Suxing, Xu Haiming, Xu Mimi. 2010&. Structure and Distribution of Rainfall over Mesoscale Mountains in the Asian Summer Monsoon Region. *Chinese Journal of Atmosphere Sciences*, 34(1):71~82.

The spatial variability of modern topic magnetic susceptibility and its pedogenesis influencing factors study based on Sanggan River in Yangyuan County, Hebei

JIAO Tian¹⁾, DONG Jin¹⁾, TANG Wenkun²⁾, CHI Zhenqing¹⁾, WANG Yong¹⁾, PANG Jianfeng¹⁾, SUN Nan³⁾

1 *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;*

2) *Institute of Geomechanics, China Academy of Geological Science, Beijing, 100081;*

3) *Beijing East Allreach Certification Center Corporation, Ltd., Beijing, 101102*

Objectives: Although previous researchers were devoted to analyze the characteristics and mechanism of soil magnetism, mostly soil vertical profiles, very little work about lateral profiles have been employed. So we attempt to understand spatial distribution of different soil magnetic parameters and reveal the major influencing factors of soil pedogenesis.

Methods: The paper primarily takes advantage of geo-statistical methods to analyze spatial variability of conventional soil indexes and environmental magnetic parameters of topsoil in the Sanggan River Basin in Yangyuan County, Hebei Province. Besides, some basic approaches, such as descriptive and correlation analysis et al., can help us to comprehend the process of soil forming.

Results: The results of correlation coefficient for magnetic parameters show that total magnetic contents are mainly affected by superparamagnetic particles. The semi-variogram suggests human activities, for instance, apply fertilizer, cropping system et al., almost have no influence on magnetic susceptibility (χ_{lr}), frequency-dependent magnetic susceptibility (χ_{fd}) and the percentage of frequency-dependent magnetic susceptibility (χ_{fp}). Above all, the spatial distribution patterns show that soil frequency-dependent magnetic susceptibility (χ_{fd}), Eh, organic matter, clay—silt content, heavy metals et al. are controlled by elevation, while the moisture, free iron oxide and active iron are limited by aspect, speculating that elevation affect soil development by hydrodynamic change, and the aspect change moisture by winter monsoon, so we can conclude that topography (elevation, aspect) is the most important factor for soil pedogenesis among five soil influencing factors (parent rock, climate, topography, organic matter, time). Besides, in former study, the frequency-dependent magnetic susceptibility and free iron oxide can reflect the content of iron oxide/hydroxides and soil pedogenesis, but in this study, the spatial characteristics of frequency-dependent magnetic susceptibility appear to be more similar to organic matter, Eh et al., in particular, arable land, compared with free iron oxide. Thus we conclude that frequency-dependent magnetic susceptibility is better to indicate soil pedogenesis.

Conclusions: Frequency-dependent magnetic susceptibility and frequency-dependent magnetic susceptibility percentage are mainly controlled by topography in this study, in addition, these two index can instruct us to comprehend soil pedogenesis.

Acknowledgements: This study was financially supported by the National Science Foundation of China (Nos. 41372172), the Chinese Geological Survey Project (Nos. DD20190602 and 20160120) and the Basic Scientific Research Funding from the Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences (No. J1603). We would like to express our thanks to Dr. Wang Hongqiang from Institute of Geophysics, China Earthquake Administration and Dr. Wang Dan from Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences. We also thank the reviewers and editors for their valuable suggestions and comments.

Keywords: frequency-dependent magnetic susceptibility; pedogenesis; Kriging interpolation; spatial variability; influencing factors

First author: JIAO Tian, female, master student; Email: xtjiao95@163.com

Corresponding author: DONG Jin, male, associate professor, mainly working on environmental magnetism; Email: djin@cags.ac.cn

Manuscript received on: 2019-08-09; Accepted on: 2019-12-10; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2020.01.017