

DOI:10.11766/trxb201802250024

# 中国北方第四纪黄土发育土壤铁锰结核形成环境及空间分布\*

王秋兵 蒋卓东 孙仲秀

(沈阳农业大学土地与环境学院, 农村农业部东北地区土壤与环境重点实验室, 辽宁省农业资源与环境重点实验室, 沈阳 110866)

**摘 要** 土壤铁锰结核是土壤形成过程的产物, 记录着土壤发育过程和成土环境变化信息, 也是土壤类型划分的重要依据, 具有很高的研究价值。通常认为铁锰结核主要分布在地势较低、地下水位较浅的地区, 但在我国东北地区位于高平地、地下水位较深, 发育于第四纪黄土状物质的土壤中有铁锰结核的分布, 对该地区土壤分类造成了很多问题。为了摸清我国北方温带地区第四纪黄土状物质发育土壤中铁锰结核的分布规律及形成原因, 通过实地调查, 并收集整理第二次全国土壤普查资料, 对中国北方 10 个省份的 345 个处于高平地(地下水位深)、发育在第四纪黄土状物质的土壤剖面资料进行整理和统计分析。研究表明, 有铁锰结核存在的土壤剖面分布具有明显规律, 即主要分布在温带湿润地区(41.19° ~ 49.01° N, 120.82° ~ 133.37° E), 该区域年均降水量在 370.6 ~ 917.7 mm 之间, 年均气温在 0.9 ~ 14.9℃ 之间, 气候的共同特点是降水量大、蒸发量小、冬季土壤结冻持续时间长、春季土壤冻融交替持续时间久, 且土壤“返浆现象”明显。研究进一步表明, 位于高平地、发育在第四纪黄土状物质土壤中铁锰结核的形成与土壤冻融交替有关。

**关键词** 铁锰结核; 冻融交替; 第四纪黄土状物质; 温带地区; 空间分布

**中图分类号** S159.2 **文献标识码** A

土壤铁锰结核是土壤中常见的一种新生体形态<sup>[1-2]</sup>, 是土壤形成过程的产物<sup>[3]</sup>, 在土壤环境化学反应中扮演着十分关键的角色<sup>[4]</sup>, 是划分土壤类型的重要依据<sup>[5]</sup>。铁锰结核对于 pH、Eh 和水分等周围环境变化的反映十分敏感, 记录着区域土壤水分状况、土壤发育过程以及环境变化等多种重要信息<sup>[6-8]</sup>。因此, 研究土壤铁锰结核具有很高的科学价值。

铁锰结核是在土壤发育过程中土壤环境干湿交替的产物, 铁锰氧化物在渍水条件下还原为 Fe<sup>2+</sup> 和 Mn<sup>2+</sup>, 随着土壤溶液迁移, 又在土壤变干时氧化淀积, 长期的干湿交替下, 形成铁锰结核并逐渐

增大<sup>[9]</sup>。一般认为, 铁锰结核的形成与地形、母质等因素关系密切, 存在铁锰结核的土壤主要分布在地势低平、地下水位较浅的地区, 土壤形成受地下水位的强烈影响, 成土母质多为河流冲积物、湖积物、坡积物等, 属于隐域土<sup>[10-12]</sup>; 而位于地下水位较深的高平地, 不会有铁锰结核的存在, 通常将这些土壤称为地带性土壤。然而, 在我国东北地区土壤调查过程中发现, 在位于高平地、地下水位较深的第四纪黄土状母质发育土壤中通常能够看到铁锰结核的分布<sup>[13-14]</sup>, 这与传统认识的土壤与景观关系相矛盾。目前, 其形成机制尚不明确, 有专家认为是现代成土条件下的产物, 有专家认为是古

\* 国家自然科学基金项目(41771245、41371223)、科技部国家科技基础性工作专项(2008FY110600、2014FY110200)资助  
Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41771245 & 41371223), National S&T Special Basic Project (Nos. 2008FY110600 & 2014FY110200)

作者简介: 王秋兵(1962—), 男, 教授, 博导, 主要从事土壤地理研究。E-mail: qiubingwangsy@163.com

收稿日期: 2018-02-25; 收到修改稿日期: 2018-10-24; 优先数字出版日期: (www.cnki.net) 2018-12-14

土壤中存在的产物，这在该地区土壤分类过程中造成了很多困扰<sup>[15-16]</sup>。在我国第二次土壤普查时使用的地理发生学分类体系，主要依据生物气候条件和地理环境等成土条件来划分土类，忽视了剖面的形态和发育，未能体现出铁锰结核对于分类的影响；而中国土壤系统分类以诊断层和诊断特性为基础，更加注重强调土壤本身性质，土壤中铁锰结核的存在符合诊断特性中的氧化还原特征，影响土类及亚类的划分<sup>[17]</sup>。对于土壤铁锰结核的研究，目前主要集中于热带、亚热带地区铁锰结核的结构、元素组成和变化等方面<sup>[18-19]</sup>，缺少对于温带地区铁锰结核的形成及空间分布规律的研究。因此，为科学划分土壤类型，对温带地区具有铁锰结核土壤的空间分布规律和形成环境开展研究显得十分必要。

为了摸清我国温带地区地带性土壤中铁锰结核空间分布规律，本文以我国北方10省（市、区）为研究区域，选择位于高平地、发育在第四纪黄土状物质的土壤为研究对象，以实地调查研究成果和收集整理全国第二次土壤普查资料为研究材料，探讨存在铁锰结核土壤的空间分布特征，为进一步研究

该地区土壤铁锰结核的形成机理奠定基础，同时也为该地区土壤科学分类提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于我国北方温带湿润半湿润地区，地理位置为 $34^{\circ} \sim 53^{\circ} \text{N}$ 和 $97^{\circ} \sim 134^{\circ} \text{E}$ 之间，行政范围包括黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、北京、天津、河北、山西、山东、河南等10个省、自治区和直辖市（图1）。研究区经纬度跨度大，水热条件的空间分布差异非常显著，年平均气温为 $-4 \sim 16^{\circ}\text{C}$ ，年均降水量为 $100 \sim 1\,400 \text{ mm}$ ，由沿海向内陆逐渐形成了湿润、半湿润、半干旱、干旱的干湿区<sup>[20]</sup>。研究区有大面积的第四纪黄土状物质沉积，土壤类型的地理空间变化也十分明显，由北向南分布着棕色针叶林土、暗棕壤、棕壤和褐土；自东向西分布着黑土、黑钙土、栗钙土、棕钙土、灰钙土、灰漠土和棕漠土。

### 1.2 样点的布置

本文采集土壤剖面共计345个（如图1所

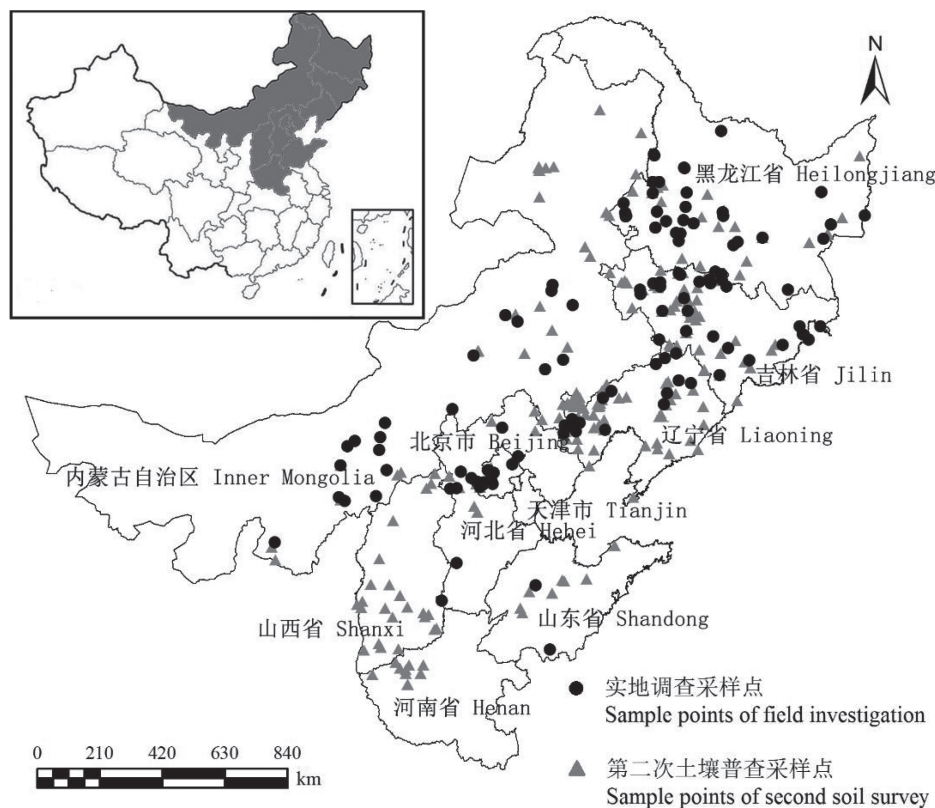


图1 样点分布图

Fig. 1 Spatial distribution of sampling points

示)。样点来自两个方面:一是由实地调查而来(130个剖面),二是来自全国第二次土壤普查资料<sup>[21-24]</sup>(215个剖面)。所有样点选择母质为第四纪黄土状物质,地处稳定的高平地,包括阶地、台地、岗地的顶部,不受地下水影响。

### 1.3 土壤剖面调查

实地调查主要由本课题组完成,部分由科技部国家科技基础性工作专项“我国土系调查与《中国土系志》编制”项目组提供,各样点均按照中国科学院南京土壤研究所《野外土壤描述与采样规范(第一版)》进行野外景观和土壤形态描述;对第二次全国土壤普查资料<sup>[21-24]</sup>的土壤剖面,收集整理采样地点、景观描述和土壤形态特征,保证母质类型一致,景观部位相近,并根据资料中采样点地理位置信息,结合地形地貌图等辅助资料,确定样点位置并获取其经纬度。对所有供试土壤,重点考察土壤是否存在铁锰结核,并记录铁锰结核在土壤剖面出现的初始深度。

### 1.4 数据处理

各土壤剖面的大气温度、降水量、地温等数据来自中国气象局中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn>),仔细筛选和剔除气象数据与区域气候特点差异较大的海拔极端的气象站数据后选择783个气象站点的1981—2010年的日值数据,包括各个气象站的经纬度、气温、地温以及降水量等数据。本文根据Henry<sup>[25]</sup>的方法定义地表土壤温度 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 确定土壤冻结状态,并以此为标准计算土壤冻结天数和春季土壤冻融交替天数。土壤冻结天数为1981—2010年每年从7月1日至次年6月30日的日平均地温低于 $0^{\circ}\text{C}$ 的天数之和的累年平均值,春季土壤冻融交替天数为1981—2010年每年1月1日至6月30日地温在 $0^{\circ}\text{C}$ 左右波动的天数之和的累年平均值。运用ArcGIS 10.2空间分析模块中的反距离权重(IDW, Inverse Distance Weighted)插值工具进行空间插值得到中国北方温带地区10个省份的年平均气温、降水量、土壤冻结天数和春季土壤冻融交替天数的空间分布图。

## 2 结果

### 2.1 铁锰结核在地理空间的水平分布特征

本研究供试土壤中有74个剖面存在铁锰结

核,占供试土壤剖面的21.5%,如图2a所示。研究发现存在铁锰结核的剖面分布于研究区域的东部( $41.19^{\circ} \sim 49.01^{\circ} \text{N}$ ,  $120.82^{\circ} \sim 133.37^{\circ} \text{E}$ ),集中于黑龙江、吉林、辽宁等地,在北京、山东等地也有少量分布,在其他地区的供试土壤中尚未发现有铁锰结核存在,呈现出“北多南少、东多西少”的地理分布特点。进一步分析可以看出,供试土壤中存在铁锰结核的74个剖面均分布在年均降水量350 mm以上的地区。年均降水量在350~400 mm、400~500 mm、500~600 mm、600~700 mm、700~800 mm及800 mm以上的区域,存在铁锰结核的剖面分别为3个、12个、36个、9个、12个和2个,分别占存在铁锰结核剖面总数的4.1%、16.2%、48.6%、12.2%、16.2%和2.7%(图2b)。供试土壤存在铁锰结核的74个剖面均分布在年均气温 $1^{\circ}\text{C}$ 以上地区。年均气温在 $1 \sim 3^{\circ}\text{C}$ 、 $3 \sim 5^{\circ}\text{C}$ 、 $5 \sim 7^{\circ}\text{C}$ 、 $7 \sim 9^{\circ}\text{C}$ 、 $9 \sim 11^{\circ}\text{C}$ 及 $11^{\circ}\text{C}$ 以上的区域,存在铁锰结核的剖面分别为9个、29个、24个、6个、4个和2个,分别占存在铁锰结核剖面总数的12.2%、39.2%、32.4%、8.1%、5.4%和2.7%(图2c)。由此可见,供试土壤中存在铁锰结核的土壤剖面主要分布于年均气温 $1 \sim 9^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量400~800 mm的中温带湿润半湿润气候地区,占研究区域内所有存在铁锰结核剖面的86.5%。

我国北方温带地区有广泛的多年冻土和季节性冻土分布,供试土壤存在铁锰结核的74个采样点剖面均分布在土壤冻结天数100 d以上的地区。土壤冻结天数在100~130 d、130~160 d、160~190 d、190~220 d及220~250 d的区域,存在铁锰结核的剖面分别为2个、的区域仅有2个、1个、14个、56个和1个,分别占存在铁锰结核土壤剖面总数的2.7%、1.4%、18.9%、75.6%和1.4%(图3a)。供试土壤中存在铁锰结核的74个剖面均分布在春季土壤冻融交替天数50 d以上的地区。春季土壤冻融交替天数在50~60 d、60~70 d、70~80 d及80~90 d的区域,存在铁锰结核的剖面分别为15个、49个、8个和2个,分别占存在铁锰结核土壤剖面总数的20.3%、66.2%、10.8%和2.7%(图3b)。由此可见,研究区域内铁锰结核的分布随土壤冻融交替天数及土壤冻结天数的变化产生了较大的差异性,即供试土壤中存在铁锰结核剖面集中分布于春季土壤冻融交替天数为50~70 d,土壤冻结

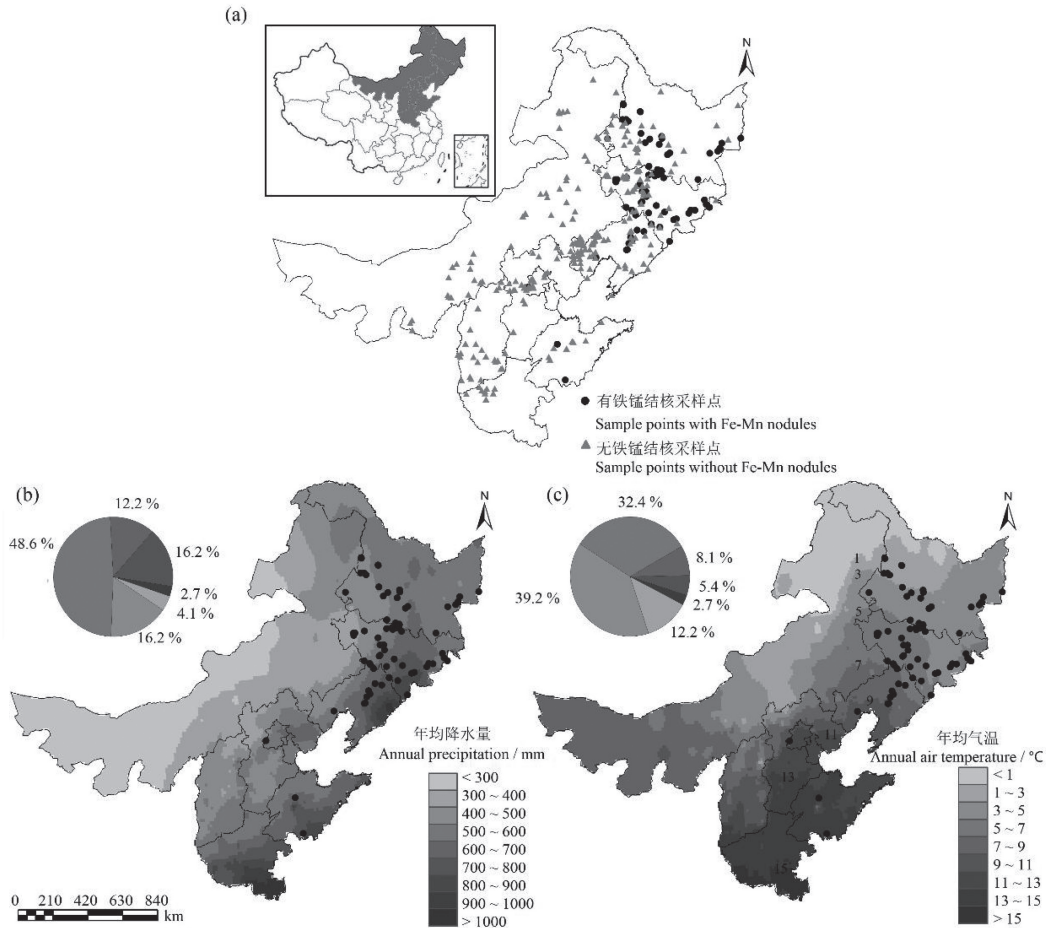


图2 土壤铁锰结核在地理空间的水平分布特征

Fig. 2 Distribution of sample points with Fe-Mn nodules

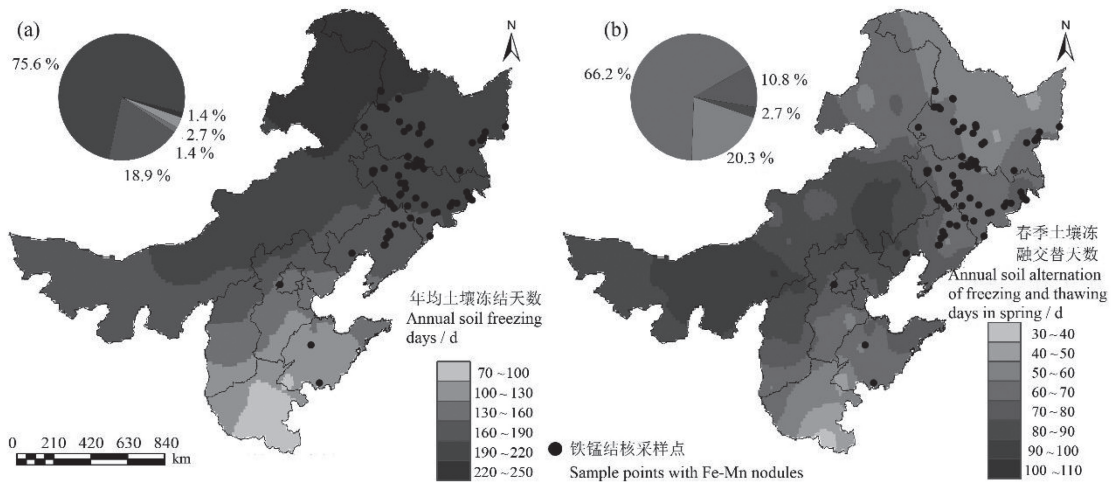


图3 研究区30年（1981—2010）平均土壤冻结天数（a）和春季土壤冻融交替天数（b）空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the mean number of soil freezing days (a) and mean number of soil freezing and thawing alternation of days in spring (b) for 30 years from 1981 to 2010 in the study area

天数为160~220 d的区域，该区域主要位于辽宁省中部及东北部地区、吉林省和黑龙江省南部地区，

气候类型为温带湿润半湿润气候,在该区域内位于高平地、黄土母质发育土壤中存在铁锰结核剖面共63个,占该区域所有供试土壤剖面的55.3%,占研究区内所有存在铁锰结核土壤剖面的85.1%。

## 2.2 铁锰结核在土壤剖面中的垂直分布特征

本研究供试土壤中铁锰结核出现初始深度在0~15 cm、15~30 cm、30~45 cm、45~60 cm、60~75 cm、75~90 cm及90~105 cm的剖面分别为39个、10个、13个、1个、4个、3个和4个,分别占存在铁锰结核剖面总数的52.7%、13.5%、17.6%、1.4%、5.4%、4.1%和5.4%。

## 3 讨论

### 3.1 铁锰结核形成环境

铁锰结核作为成土过程中氧化还原作用的产物,以往研究认为存在铁锰结核的土壤所处地形部位较低,常常为低洼地、河间地、沟谷地、河流两岸、湖泊周围以及坡麓等地下水水位较浅的地区,其形成主要原因是地下水水位升降造成频繁的氧化还原交替。而实地调查发现在我国北方温带湿润地区位于高平地、发育在第四纪黄土状物质的土壤中有大量铁锰结核存在,这可能与该地区气候特点密切相关。该地区在秋季气温较低、降水丰富、潜在蒸散量较低,土壤含水量较高,为土壤铁锰结核的形成提供了良好的水分条件。在深冬时节,土壤温度逐渐稳定在0℃以下时,随着土温从地表向下逐渐降低,冻层厚度和总含水率逐渐增加<sup>[26-27]</sup>,同时土体下部的水分受到水汽压和温度梯度的影响向上迁移,土壤中液态水和气态水向冻结层的下界面运移、聚积、凝结,即“冻后聚墒”现象<sup>[28]</sup>,形成了紧实的冻结层,因而该阶段土壤水分的蒸散量较低,土壤水分损耗较小。在翌年春季土壤冻融交替期,由于受到太阳辐射等因素的影响,造成土壤表层温度在0℃左右波动,从而引起水的相变,土壤表层出现昼融夜冻的冻融交替循环现象,该期间内土壤冻融交替主要发生在表层0~15 cm深度范围内,而深层土壤不会经历冻融交替,仍维持冻结状态<sup>[29]</sup>;由于我国北方温带湿润地区春季土壤冻融交替持续时间在两个月以上,土壤表层经历持续时间较长的冻融交替,有利于氧化还原反应交替进行,因而很多供试土壤剖面表层就有铁锰结核存

在。在土壤融化期随着气温的回升,土体表层受太阳辐射作用增强,地表融化逐渐加深,同时土体下部受到地热作用的影响,冻层从上、下部逐渐向中间融化。由于冻土层具有明显的减渗作用<sup>[30]</sup>,在土体没有化透之前,冻土层便成为减缓融化层水分下渗的滞水层,导致融化层与冻土层之间的界面处于饱和土壤水分状况,暂时形成了渍水的还原环境,促进了铁锰氧化物的还原和移动<sup>[31]</sup>。东北地区早春表层土壤普遍存在的“返浆现象”与此有关。随着冻结层逐渐融化,土体内滞水层消失,土壤渗透性增强,上部土层因水分含量降低而转变为氧化环境,还原态的 $\text{Fe}^{2+}$ 和 $\text{Mn}^{2+}$ 被氧化而淀积下来。同时,随着温度的回升,土体内微生物活性和化学反应速率均逐渐增大<sup>[32]</sup>,有利于铁锰氧化物的迁移、聚积以及铁锰结核的形成。可见春季土壤冻融交替对我国北方温带湿润地区位于高平地、发育在第四纪黄土状物质的土壤铁锰结核的形成和分布具有强烈影响。

在年均降水量小于350 mm的区域尚未发现有铁锰结核的剖面,在年均降水量小于400 mm的区域仅在两个剖面中发现铁锰结核。该区域主要位于内蒙古地区,主要气候类型是中温带干旱半干旱气候,气候干燥,降水量远小于蒸发量,并且干旱程度向西逐渐加剧<sup>[33]</sup>,所以位于高平地的土壤中水分含量常年处于较低水平,冬季土壤呈“干冻”状态,早春冻融交替时节土体内不能形成滞水层,上部土层很少处于渍水的还原状态,氧化还原交替次数较少,很难出现还原态的 $\text{Fe}^{2+}$ 和 $\text{Mn}^{2+}$ 迁移聚积<sup>[34-35]</sup>,不利于铁锰结核的形成。在年均气温11℃以上的北京市、天津市、河北省南部地区、山西省南部地区、山东省、河南省北部等地的第四纪黄土状物质发育土壤存在铁锰结核的土壤剖面比例很小,这主要是由于受到纬度等因素影响,气候温暖(属暖温带),冬季土壤结冻时间短,冻层深度浅,春季气温较高且气候干燥,冻融交替时间短暂,冻土层很快消失,不利于滞水层的形成,因而不利于氧化还原交替和铁锰结核的形成。在年均气温1℃以下的地区也尚未发现存在铁锰结核的剖面,这是由于该地区位于内蒙古自治区东北部和黑龙江省北部的大兴安岭、小兴安岭山区,成土母质主要是基岩风化的残积物、坡积物,而发育在第四纪黄土状物质的土壤分布很少<sup>[36-37]</sup>。

### 3.2 铁锰结核形成时间

该地区土壤表层存在大量铁锰结核，这可能主要为现代成土环境的产物。本研究供试土壤剖面均处于气候较为湿润且不受地下水位影响的高平地，并且调查土壤深度在1 m左右，假设土壤形成环境为现代气候条件，且不考虑土壤侵蚀和堆积作用对土壤发育的影响。该地区铁锰结核初始出现的深度集中在0~15 cm深度范围内，这是由于表层土壤温度受气温影响较强，在白天土壤解冻而下层土壤仍维持冻结状态，在解冻层和冻结层接触面因土壤水分饱和而形成还原环境，在夜晚温度降低表层土壤冻结转化为氧化环境，频繁的昼融夜冻造成的氧化还原交替为铁锰结核的形成创造了必要条件<sup>[38]</sup>。此外，早春土壤解冻从表层开始，随气温升高逐渐加深，直至冻土层完全化通，因此，上层土壤，特别是表层土壤每年经历的冻融交替时间较长，土壤获得氧化还原交替的频数较多，更有利于铁锰结核的形成；相反，下层土壤每年经历的冻融交替时间相对较短，土壤获得氧化还原交替的频数较少，不利于铁锰结核的形成。此外，表层土壤铁锰结核较多，可能与土壤侵蚀有关。表层土壤易受侵蚀影响，特别是在起伏较大的地形部位，在土壤遭受侵蚀过程中，细粒物质往往先被侵蚀迁移<sup>[39]</sup>，颗粒相对较大的铁锰结核在土壤中残留并在土壤表层呈现出富集现象。

不排除一些地区的土壤铁锰结核是过去环境条件的产物（古土壤）。在一些深厚黄土剖面中发现大量土壤铁锰结核，这与黄土逐渐沉积加厚、沉积与成土作用同时进行的这一特点有关<sup>[40-41]</sup>。新沉积的黄土处于地表，土壤经历着频繁的冻融交替变化，土体内氧化还原交替作用有利于铁锰结核的形成。随着黄土沉积厚度逐渐增大，土壤冻结层逐渐上移，当黄土沉积厚度超过当地冻层深度时，下层土壤便脱离冻融交替的影响，因而也不利于铁锰结核的形成。由于铁锰结核的形成过程是不可逆的，底层土壤原来已形成的铁锰结核（可视为古土壤）仍残留在土体内，因而在深厚土壤剖面的不同层次均有数量不等的铁锰结核分布。

### 3.3 铁锰结核地理分布

土壤分布可以分为地带性土壤和非地带性土壤<sup>[42]</sup>。地带性土壤是指土壤形成过程主要受生物、气候等地带性因素制约而呈现带状分布的土

壤，主要分布于高平地以及低山丘陵地区；非地带性土壤是指土壤形成过程中母质、地形、地下水等地方性成土因素起主要作用的土壤<sup>[43]</sup>。传统土壤学对于土壤铁锰结核形成环境及地理分布的研究多集中于非地带性土壤中<sup>[44-45]</sup>，并认为其形成主要原因是地下水位升降引起的氧化还原电位频繁变化，主要出现在低平原、洼地、河流两岸、湖泊周围或山谷、缓坡坡麓等地区，与地形部位等地方性因子有关，而与气候等地带性因素无关，因此把存在铁锰结核的土壤归类为非地带性土壤，并且通常把土壤是否具有铁锰结核作为标志特征来判定微域成土环境。然而本研究在我国温带地区位于高平地的地带性土壤中发现有大量铁锰结核的存在，并且呈现出地带性分布规律。由此可见，铁锰结核的形成不仅仅受微域地形条件的影响，也可以广泛分布在冷凉湿润的温带地区地下水位较深的高平地，同样具有地带性土壤分布特征。这一结果改变了人们对于土壤类型地理分布的传统认识，丰富了土壤地理学理论。

## 4 结 论

我国北方位于高平地、发育在第四纪黄土状物质土壤中铁锰结核具有明显地带性分布规律，主要分布年均气温1~9℃，年均降水量400~800 mm，春季土壤冻融交替天数50~70 d的我国东北温带湿润地区，呈现出“东多西少、北多南少”的地理分布特点。该地区供试土壤中超过1/2的存在铁锰结核剖面在表层土壤0~15 cm内有铁锰结核出现，这与我国北方温带湿润地区春季土壤表层冻融交替频繁且持续时间较长有密切关系。研究结果表明该地区土壤铁锰结核形成与分布受到该地区降水量丰富、冬季漫长且春季土壤冻融交替持续时间较长等气候环境因素的强烈影响。

**致 谢** 本研究得到科技部国家科技基础性工作专项“我国土系调查与《中国土系志》编制”（2008FY110600、2014FY110200）项目组的帮助，在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] Timofeeva Y O, Karabtsov A A, Semal' V A, et al.

- Iron-manganese nodules in udepts: The dependence of the accumulation of trace elements on nodule size. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78 (3): 767—778
- [ 2 ] Yu X L, Fu Y N, Brookes P C, et al. Insights into the formation process and environmental fingerprints of iron-manganese nodules in subtropical soils of China. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79 (4): 1101—1114
- [ 3 ] Szymański W, Skiba M. Distribution, morphology, and chemical composition of Fe-Mn nodules in albeluvisols of the carpathian foothills, Poland. *Pedosphere*, 2013, 23 (4): 445—454
- [ 4 ] Zhang G Y, He J Z, Liu F, et al. Iron-manganese nodules harbor lower bacterial diversity and greater proportions of proteobacteria compared to bulk soils in four locations spanning from North to South China. *Geomicrobiology Journal*, 2014, 31 (7): 562—577
- [ 5 ] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类检索 (第三版). 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001
- Cooperative Research Group of Chinese Soil Taxonomy (CRG-CST). *Chinese Soil Taxonomy*. Beijing & New York: Science Press, 2001
- [ 6 ] Burns R G, Burns V M. Mechanism for nucleation and growth of manganese nodules. *Nature*, 1975, 255 (5504): 130—131
- [ 7 ] Cornu S, Cattle J A, Samouëlian A, et al. Impact of redox cycles on manganese, iron, cobalt, and lead in nodules. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73 (4): 1231—1241
- [ 8 ] White G N, Dixon J B. Iron and manganese distribution in nodules from a young texas vertisol. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60 (4): 1254—1262
- [ 9 ] 谭文峰, 刘凡, 李学垣. 武汉黄棕壤中铁锰结核的环带构造、元素富集特点与环境变化意义. 第四纪研究, 2004, 24 (2): 198—202
- Tan W F, Liu F, Li X Y. Characteristics of band structure in iron-manganese nodules from yellow-brown soil in Wuhan (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 2004, 24 (2): 198—202
- [ 10 ] Phillippe W R, Blevins R L, Barnhisel R I, et al. Distribution of concretions from selected soils of the inner bluegrass region of kentucky1. *Soil Science Society of America Journal*, 1972, 36 (1): 171—173
- [ 11 ] Ettlér V, Chren M, Mihaljević M, et al. Characterization of Fe-Mn concentric nodules from Luvisol irrigated by mine water in a semi-arid agricultural area. *Geoderma*, 2017, 299: 32—42
- [ 12 ] 章明奎. 浙江红壤中结核的矿物学研究. 浙江农业学报, 2000, 12 (3): 129—131
- Zhang M K. Mineralogy of some concretions in red soils from Zhejiang Province, China (In Chinese). *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2000, 12 (3): 129—131
- [ 13 ] 刘东生, 安芷生, 袁宝印. 中国的黄土与风尘堆积. 第四纪研究, 1985, 6 (1): 113—125
- Liu T S, An Z S, Yuan B Y. Eolian process and dust mantle (loess) in China (In Chinese). *Quaternary Sciences*, 1985, 6 (1): 113—125
- [ 14 ] 王秋兵, 汪景宽, 胡宏祥, 等. 辽宁省沈阳样区土系的划分. 土壤通报, 2002, 33 (4): 246—252
- Wang Q B, Wang J K, Hu H X, et al. Establishment of Soil Series in Shenyang Area, Liaoning Province (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33 (4): 246—252
- [ 15 ] Šegvić B, Girardclos S, Zanoni G, et al. Origin and paleoenvironmental significance of Fe, Mn nodules in the Holocene perialpine sediments of Geneva Basin, western Switzerland. *Applied Clay Science*, 2018
- [ 16 ] 傅桦, 丁瑞兴. 北亚热带江淮地区白浆土铁锰结核的研究. 生态环境学报, 1995 (2): 102—106
- Fu H, Ding R X. Study on Fe-Mn nodule of Albic soil in Jiangsu region of subtropic zone (In Chinese). *Ecology and Environmental Sciences*, 1995 (2): 102—106
- [ 17 ] 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
- [ 18 ] Huang L, Hong J, Tan W, et al. Characteristics of micromorphology and element distribution of iron-manganese cutans in typical soils of subtropical China. *Geoderma*, 2008, 146 (1): 40—47
- [ 19 ] Sipos P, Balázs R, Bozsó G, et al. Changes in micro-fabric and re-distribution of Fe and Mn with nodule formation in a floodplain soil. *Journal of Soils & Sediments*, 2016, 16 (8): 2105—2117
- [ 20 ] 郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 等. 中国1951-1980年及1981-2010年的气候区划. 地理研究, 2013, 32 (6): 987—997
- Zheng J Y, Bian J J, Ge Q S, et al. The climate regionalization in China for 1951-1980 and 1981-2010 (In Chinese). *Geographical Research*, 2013, 32

- (6): 987—997
- [21] 全国土壤普查办公室. 中国土种志(1~6卷). 北京: 中国农业出版社, 1993  
National Soil Survey Office. Soil Species of China (I~VI) (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press. 1993
- [22] 贾文锦. 辽宁土壤. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1992  
Jia W J. Soil in Liaoning (In Chinese). Shenyang: Liaoning Science and Technology Press. 1992
- [23] 内蒙古自治区土壤普查办公室. 中国内蒙古土种志. 北京: 中国农业出版社, 1994  
Office of Soil Survey in Inner Mongolia Autonomous region. Soil Species of Inner Mongolia (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press. 1994
- [24] 山东省土壤肥料工作站. 山东土壤. 北京: 中国农业出版社, 1994  
Soil and Fertilizer Station of Shandong Province. Shandong soils (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press. 1994
- [25] Henry H A L. Climate change and soil freezing dynamics: Historical trends and projected changes. *Climatic Change*, 2008, 87 (3): 421—434
- [26] Cheng Q, Sun Y, Jones S B, et al. In situ measured and simulated seasonal freeze-thaw cycle: A 2-year comparative study between layered and homogeneous field soil profiles. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 1466—1473
- [27] 王晓巍. 北方季节性冻土的冻融规律分析及水文特性模拟. 哈尔滨: 东北农业大学, 2010  
Wang X W. Study of soil freezing and thawing law and simulation of hydrologic properties in the northern seasonally frozen soil area (In Chinese). Harbin: Northeast Agriculture University, 2010
- [28] Watanabe K, Osada Y. Simultaneous measurement of unfrozen water content and hydraulic conductivity of partially frozen soil near 0°C. *Cold Regions Science & Technology*, 2017, 142
- [29] 赵显波, 刘铁军, 许士国, 等. 季节冻土区黑土耕层土壤冻融过程及水分变化. *冰川冻土*, 2015, 37 (1): 233—240  
Zhao X B, Liu T J, Xu S G, et al. Freezing-thawing process and soil moisture migration within the black soil plow layer in seasonally frozen ground regions (In Chinese). *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37 (1): 233—240
- [30] Klock G O. Snowmelt temperature influence on infiltration and soil water retention. *Journal of Soil & Water Conservation*, 1972, 27 (1)
- [31] 王康, 张廷军. 中国1956—2006年地表土壤冻结天数时空分布及其变化特征. *地球科学进展*, 2013, 28 (11): 1269—1275  
Wang K, Zhang T J. Spatial and temporal distribution and variations in the near-surface soil freezing days across China, 1956-2006 (In Chinese). *Advances in Earth Science*, 2013, 28 (11): 1269—1275
- [32] Laudicina V A, Sun B, Dennis P G, et al. Responses to increases in temperature of heterotrophic microorganisms in soils from the maritime antarctic. *Polar Biology*, 2015, 38 (8): 1153—1160
- [33] 黄会平, 曹明明, 宋进喜, 等. 1957—2012年中国参考作物蒸散量时空变化及其影响因子分析. *自然资源学报*, 2015, 30 (2): 315—326  
Huang H P, Cao M M, Song J X, et al. Temporal and spatial changes of potential evapotranspiration and its influencing factors in China from 1957 to 2012 (In Chinese). *Journal of Natural Resources*, 2015, 30 (2): 315—326
- [34] Dixon J B, Schulze D G, Dixon J B, et al. Soil mineralogy with environmental applications. 2002.
- [35] Shih H J, Zeng Y H, Chen Z S. Hydropedological implications of ferromanganiferous nodules in rice-growing plinthitic ultisols under different moisture regimes. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74 (3): 880—891.
- [36] 黑龙江省土地管理局, 黑龙江土壤普查办公室编. 黑龙江土壤. 北京: 农业出版社, 1992  
Heilongjiang Land Management Bureau, Soil Survey Office of Heilongjiang. eds. Soils in Heilongjiang (In Chinese) Beijing: Agriculture Press, 1992
- [37] 刘东生. 中国的黄土堆积: 中国黄土分布图说明书. 北京: 科学出版社, 1965  
Liu T S. Loess accumulation in China (In Chinese). Beijing: Science Press, 1965
- [38] Ymène Fouli, Barbara J. CadeMenun, Herb W. Cutforth. Freeze-thaw cycles and soil water content effects on infiltration rate of three Saskatchewan soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 2013, 93 (4): 485—496
- [39] 查小春, 唐克丽. 黄土丘陵林区开垦地人为加速侵蚀与土壤物理力学性质的时间变化. *水土保持学报*, 2001, 15 (3): 20—23  
Zha X C, Tang K L. Temporal Change about Man-made accelerated Erosion and soil Physical and Force Properties of Reclaimed Forest Lands in Loess Hilly Region (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15 (3): 20—23
- [40] Sun Z X, Owens P R, Han C L, et al. A quantitative reconstruction of a loess-paleosol sequence focused



- on paleosol genesis: An example from a section at Chaoyang, China. *Geoderma*, 2016, 266: 25—39
- [41] Sun Z X, Jiang Y Y, Wang Q B, et al. Fe-Mn nodules in a southern Indiana loess with a fragipan and their soil forming significance. *Geoderma*, 2018, 313: 92—111
- [42] 朱鹤健. 世界土壤地理. 北京: 高等教育出版社, 1986. Zhu H J. *World soil geography* (In Chinese). Beijing: Higher Education Press, 1986
- [43] Б. Г. 罗札诺夫. 王浩清, 郑军译, 陈恩健校. 土壤形态学. 北京: 科学出版社, 1988  
Розанов, Б. Г. Wang H Q, Zheng J, trans. Chen E J, proof. *Soil morphology science* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1988
- [44] 柯夫达 B A. 陆宝树, 周礼恺, 吴珊媚, 等译, 盛祖贻校. 土壤学原理 (上、下). 北京: 科学出版社, 1981  
Ковда B A. Lu B S, Zhou L K. Wu S M, et al, trans. Sheng Z Y, proof. *Principle of Soil Science* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1981
- [45] D' Amore D V, Stewart S R, Huddleston J H. Saturation, Reduction, and the Formation of Iron-Manganese Concretions in the Jackson-Frazier Wetland, Oregon. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68 (3): 1012—1022

## Distribution and Formation Environment of Fe-Mn Nodules in Soils Derived from Quaternary Loess in North China

WANG Qiubing JIANG Zhuodong SUN Zhongxiu

(College of Land and Environmental, Shenyang Agricultural University, Key Laboratory of Soil and Environment in Northeastern China, MOA, Liaoning Province Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Shenyang 110866, China)

**Abstract** 【Objective】 Fe-Mn nodules in soils, pedogenic products of the soils, contain a lot of information related to soil-forming processes and variation of soil-forming environment and can be used as important basis for soil classification. So distribution of Fe-Mn nodules plays an important role in understanding of the mechanism of Fe-Mn nodules formation and soil classification. It is generally believed that Fe-Mn nodules are mainly distributed at lowlands with shallow groundwater table. However, Fe-Mn nodules are found in uplands with deep groundwater table in Northeast of China, which causes a lot of problems in soil classification in this region. The objectives of this study were to explore the spatial distribution of soil Fe-Mn nodule and explore the environment and mechanism of their formation in North China. The principles for selecting soil profiles were: (1) choose soil profiles situated in stable uplands with deep groundwater table, to ensure that the soils are not affected by groundwater, and in uplands free of obvious evidence of erosion and deposition in the processes of soil formation; (2) pick soils developed from the Quaternary loess-like materials, to ensure that soils were derived from the same parent materials as much as possible. 【Method】 A total of 345 soil profiles, based on the soil series survey in 2010' s and the legacy data of the Second National Soil Survey (SNSS) during 1980' s, were prepared in 10 provinces in the temperate zone of North China. Whether the Fe-Mn nodules were presence or not in each soil horizon was examined. The mean annual precipitation (MAP) and mean annual temperature (MAT) of each soil sample site was retrieved from the China Meteorological Science Data Sharing Service. Relationships between formation of Fe-Mn nodules in soils and climate conditions of soil-forming were analyzed. 【Result】 Results show that Fe-Mn nodules were found in 74 profiles or 21.5% of 345 soil profiles studied in total. The soil profiles with Fe-Mn nodules are distributed mainly in a region, 120.82° ~ 133.37° E and 41.19° ~ 49.01° N, a part of the humid temperate zone, where MAP is 370.6 ~ 917.7 mm, and MAT 0.9 ~ 14.9°C. In winter the soils there in remain frozen for a long time, and in spring they undergo a long period of freezing-thawing alternation, with the surface soil getting pulpy, because soil water keeps

moving up in the topsoil layer when it gets frozen in winter and when the frozen topsoil begins to thaw, soil water remain in the topsoil layer making it pulpy in early spring because the subsoil layer is still not thawed, preventing the water in the topsoil layer from percolating down. This results in a reducing environment close to the freezing layer for a period of time before the frozen soil thaws thoroughly, which lays a solid foundation for the formation of Fe-Mn nodules. 【 Conclusion 】 It is, therefore, concluded that the formation of Fe-Mn nodules in stable upland soils is closely related to the alternation of freezing and thawing in spring.

**Key words** Fe-Mn nodules; Alternation of freezing and thawing; Loess-like materials; Temperate region; Spatial distribution

(责任编辑：檀满枝)