

松辽平原典型黑土区有机质的变化及影响因素分析

刘 驰¹,刘希瑶²,刘 澎³

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心,辽宁 沈阳 110034; 2. 辽宁省地质矿产调查院有限责任公司,辽宁 沈阳 110032; 3. 辽宁省矿产勘查院有限责任公司,辽宁 沈阳 110032

摘 要: 根据 2003~2008 年松辽平原中南部地区多目标区域地球化学调查成果,研究了典型黑土区有机质的分布特征,提出了绥化-哈尔滨-四平一线典型黑土区有机质含量具有纬度地带性分布特点,有机质由北向南逐渐降低。分析了土壤有机质的影响因素,认为土壤的成土母质和土壤质地是决定有机质含量的重要基础,湖相沉积物和土壤质地细腻,黏粒成分多,有机质含量高。气温和降水等气候条件是影响土壤有机质的主要因素,低温湿润气候条件有利于有机质积累。耕地开垦时间长、作物连作和化肥使用等人为因素降低了有机质含量。

关键词: 有机质;分布特征;影响因素;气候条件;典型黑土区;松辽平原

开放科学标志码(OSID):



DOI: 10.13686/j.cnki.dzyz.2020.06.007

ANALYSIS ON THE CHANGES OF ORGANIC MATTERS AND THEIR INFLUENCING FACTORS OF TYPICAL BLACK SOIL AREAS IN SONGLIAO PLAIN

LIU Chi¹, LIU Xi-yao², LIU Peng³

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 2. Liaoning Geological and Mineral Survey Institute Co., Ltd., Shenyang 110032, China; 3. Liaoning Institute of Mineral Exploration Co., Ltd., Shenyang 110032, China

Abstract: Based on the results of multi-objective regional geochemical survey in the south-central Songliao Plain during 2003–2008, the paper studies the distribution characteristics of organic matters in typical black soil areas, proposing that the organic contents in the typical black soil areas along Suihua-Harbin-Siping are characterized by latitudinal zoning distribution, with decreasing gradually from north to south. By analyzing the influencing factors of soil organic matters, it is considered that the parent material and soil texture are important basis for organic contents. The lacustrine sediments and soil with fine texture containing clayey components usually have high organic matter contents. Climate conditions such as temperature and precipitation are the key factors affecting soil organic matters. Low temperature and humid climate are conducive to organic matter accumulation. Human factors such as long cultivation, continuous cropping and fertilizer use can reduce organic content.

Key words: organic matter; distribution characteristic; influencing factor; climatic condition; typical black soil area; Songliao Plain

收稿日期:2020-07-07;修回日期:2020-07-22. 编辑:张哲.

基金项目:中国地质调查局项目“松辽平原中南部地区多目标区域地球化学系列图编制”(编号 ZTR20070206).

作者简介:刘驰(1954—),男,教授级高级工程师,从事地球物理和地球化学研究,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号,E-mail/liuchi1231@163.com

0 前言

黑土地是不可多得的优质宝贵土地资源. 广义的黑土包含黑土、黑钙土、草甸土、暗棕壤、棕壤、棕色针叶林土等几大土类, 中国黑土地主要分布在黑龙江、吉林、辽宁和内蒙古东部地区, 简称东北黑土区^[1-2]. 其中“典型黑土”(土壤类型为黑土)主要分布在松辽平原. 黑土是特有的气候和植被相互作用而形成的土壤类型. 黑土是发生在森林草原和草甸草原下的一种腐殖质层, 数万年甚至几十万年前, 草原植被和森林植被枯死后的残体, 在原先的沙砾层上逐渐堆积, 形成厚重的腐殖质层, 最终发育成养分丰富的黑土. 黑土有机质丰富, 含量一般在 3%~8%. 有研究认为, 有机质在自然土壤为 5%~10%, 在草原土壤中是最高的. 黑土的有机质含量是黑土质量的重要标志之一. 因此, 了解有机质的分布特征及变化影响因素, 对黑土地的研究具有重要的意义^[3-6]. 本文依据 2003~2008 年松辽平原中南部地区多目标区域地球化学调查所获得的成果, 选择土壤类型为黑土的地球化学资料^[7], 重点分析黑土土壤类型中有机质的分布特征及影响因素.

1 典型黑土区有机质的纬度地带性分布特征

松辽平原中南部地区多目标区域地球化学调查的土壤采样方法是分别采集表层土壤样品和深层土壤样品. 表层采样密度为 1 个点/ km^2 , 采样深度 0~20 cm, 每 4 km^2 组合一个分析样. 深层采样密度为 1 个点/4 km^2 , 采样深度 150~180 cm, 每 16 km^2 组合一个分析样, 并分析全碳(TC)、有机碳(C_{org})、土壤酸碱性(pH)等 54 项元素及指标. 野外采样质量和样品分析测试质量由中国地质调查局组织检查验收, 检查验收结果显示质量可靠. 本研究以表层土壤样品为依据, 采用土壤类型为黑土的有机碳样本量为 6553 件, 覆盖面积约 26 212 km^2 , 纬度区间在 43~47°. 土壤有机碳换算成有机质的平均换算系数为 1.724^{[1]79-81}, 将有机碳含量换算为有机质含量, 并以有机质含量 1.5%、2.0%、2.5%、3.0%、5.0%编制了典型黑土区有机质分布图(图 1).

由图 1 可以清楚地看出有机质含量的分布特征:

1) 在哈尔滨以北, 以松花江为界的哈尔滨-绥化地区, 土壤有机质含量大于 3%, 且分布均匀; 在绥化的东北部分布着较大面积的有机质大于 5% 的土壤,

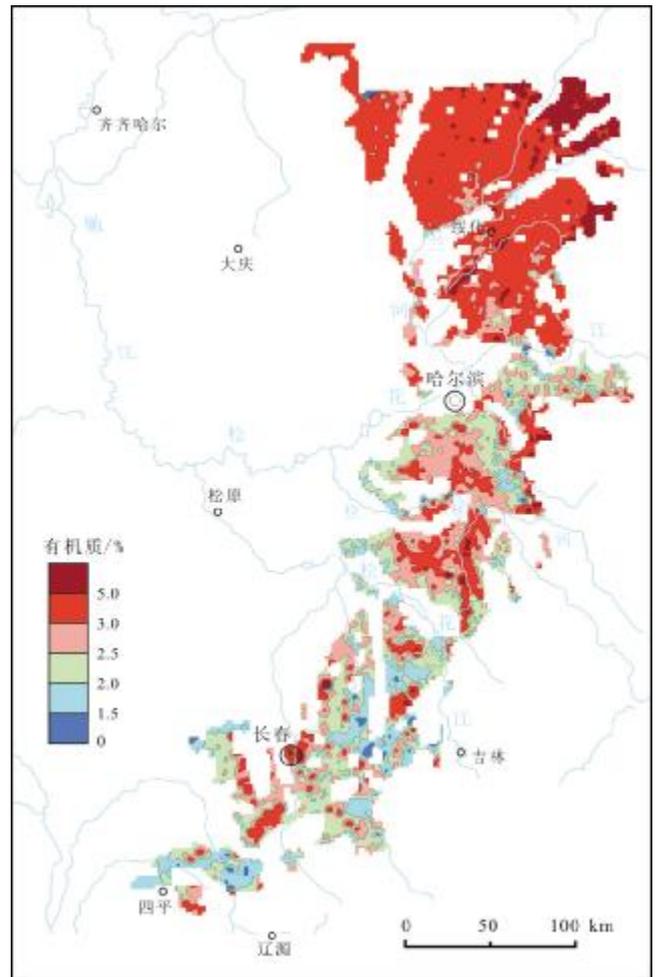


图 1 典型黑土区有机质分布图

Fig. 1 Distribution of organic matters in typical black soil areas
约 1680 km^2 . 表明在该地区土壤有机质丰富, 土壤肥力强.

2) 在松花江下游以南, 松花江上游以北的扶余-双城地区, 土壤有机质含量在 2.0%~5.0% 区间非均匀分布. 这种特征表明该地区土壤有机质较丰富, 土壤肥力质量也较高.

3) 从松花江上游以南至四平以北的四平-长春地区, 土壤有机质以 1.5%~2.5% 区间分布为主要特征, 个别地区也分布着有机质 3% 的土壤. 表明该地区总体上土壤有机质含量较低, 土壤肥力低.

同时, 对 3 个地区有机质含量的分布面积进行了统计对比, 见表 1.

哈尔滨-绥化地区黑土面积约 10 860 km^2 , 有机质大于 3% 以上面积占 81.14%, 有机质小于 2% 的面积仅占 1.51%. 表明该地区土壤有机质丰富, 土壤肥力质量

表1 不同地区有机质含量分布面积对比

Table 1 Comparison of distribution areas of organic matter contents between different areas

有机质 /%	哈尔滨-绥化		扶余-双城		长春-四平	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
3.0以上	8812	81.14	1872	23.28	1068	14.61
2.0~3.0	1884	17.35	5140	63.93	3828	52.35
2.0以下	164	1.51	1028	12.79	2416	33.04

高. 扶余-双城地区黑土面积 8 040 km², 有机质大于 3% 以上面积占 23.28%, 有机质在 2%~3% 之间的面积占 63.93%, 有机质小于 2% 的面积占 12.79%. 表明该地区土壤有机质较丰富, 土壤肥力质量较高. 四平-长春地区黑土面积 7 312 km², 有机质大于 3% 的面积占 14.61%, 有机质在 2%~3% 之间的面积占 52.35%, 有机质小于 2% 的面积占 33.04%. 表明该地区土壤有机质丰富的面积显著减少, 有机质缺乏的面积增大, 土壤肥力质量相对较低. 根据有关学者的研究划分, 中国土壤肥力质量(有机质含量)可分为高(>2%)、中(1%~2%)、低(<1%)^[8]. 可见, 研究区的整体土壤肥力质量还是属于较高的. 但是, 相比哈尔滨-绥化地区, 四平-长春地区在有机质高含量的面积上还是发生了较大的变化.

综合 3 个地区有机质含量的分布特征表明: 典型黑土区有机质含量具有明显的纬度地带性分布特征, 从北向南逐渐降低, 并且以主要河流为界, 形成不同的有机质含量分布区域.

由于地表接收太阳辐射的能量具有纬度分带性, 气候、水文、植物、土壤等呈现明显的地带性规律. 而元素的化学活动与水、温度、生物、土壤等因素密切相关, 因此, 表生地球化学环境也具有地带性规律^[9]. 中国土壤的纬度地带性分布是一种海洋性的土壤纬度地带性分布, 即东部受太平洋副热带高压暖湿气流影响的湿润森林土壤的南北变化^[10]. 可见, 典型黑土区有机质的这种纬度地带性分布特征与土壤的地理地貌、气候环境、成土母质和土壤性质等条件有重要的时空关系^[11-13].

2 黑土区有机质变化的影响因素分析

黑土退化的一个最重要标志就是有机质减少, 因

此, 分析有机质变化的影响因素对研究黑土退化具有重要的意义. 根据典型黑土区有机质的空间分布特征, 将哈尔滨-绥化地区(有机质大于 3.0% 为主要特征)和四平-长春地区(有机质小于 3.0% 为主要特征)作为对比研究对象, 探讨典型黑土有机质变化的影响因素及规律.

2.1 成土母质对有机质的影响

在一定的地质构造环境内, 土壤元素含量(如有机碳)和土壤性状与母质有着紧密的关系. 典型黑土区位于松辽平原的主要区域, 是冲、湖积平原地貌类型, 表层具有黑灰色-黄褐色壤质亚黏土. 黑土的成土母质主要是由中更新统的湖积黄色亚黏土和全新统的冲积沙质黏土组成, 是黑土形成的重要母质条件之一, 由于其含黏土成分高, 有利于黑土形成.

哈尔滨-绥化地区位于松嫩平原北部, 成土母质几乎全部由中更新统的湖积黄色亚黏土组成, 质地较细, 物质成分较单一, 形成面积大且连续, 有机质在该地区含量高, 分布面积大且连续. 另外, 该地区土地集中连片, 地势平坦, 土壤的成土母质质地细腻, 土壤黏粒性好, 土质优良.

四平-长春地区位于松嫩平原南部(松辽平原中部), 成土母质既有中更新统的湖积黄色亚黏土, 又有全新统的冲积沙质黏土, 物质成分较复杂, 形成面积相比较小且较分散. 有机质在该地区含量较低, 分布不均匀, 连续性相比也较差. 而该地区被长春-四平深断裂为主的构造分割成隆起山地与沉降平原的过渡区. 地质构造的过渡性决定了该地区地貌类型的多样性, 成土母质不像哈尔滨-绥化地区那样比较单一, 除了冲湖积外, 还有风积物. 如在长春-吉林之间, 成土母质有二叠纪、三叠纪和侏罗纪的砂岩和火山岩, 以及花岗岩、闪长岩等. 成土母质的成分多样, 使得土壤含沙质成分增加, 土壤的黏粒性降低, 有机质减少.

可见, 由于成土母质的差异, 导致土壤有机质含量发生变化, 并影响着土壤肥力, 这表明土壤的成土母质是决定土壤有机质含量的基础因素. 成土母质是土壤形成的物质基础, 母质因素在土壤形成上具有极重要的作用, 它直接影响土壤的矿物组成和土壤颗粒组成, 并在很大程度上支配着土壤的物理、化学性质以及土壤生产力的高低.

2.2 土壤质地对有机质的影响

土壤的有机质含量与黏粒含量相关, 同时也在影响着土壤养分元素含量的变化^[14-15]. 土壤质地是根据机械组成划分的土壤类型. 土壤的质地主要继承了成土母质的类型和特点, 一般分为砂土、壤土和黏土3种. 不同质地组成反映不同的土壤性质, 是土壤的一种十分稳定的自然属性. 同时, 其黏、砂的程度对土壤中物质的吸附、迁移及转化有很大的影响^{[8]79-83}. 通常将土粒分为4级: 砾石、砂粒、粉砂和黏粒. 粒径在0.02~0.002 mm者为粉砂粒, 粒径小于0.002 mm为黏粒和胶体^[16].

黑土在腐殖质累积和灰分元素的生物循环过程中, 由于胡敏酸类腐殖质含量多, 黏粒和钙离子含量高, 自然植物根系发达, 因而相应地形成了良好的团粒状结构. 黑土的机械组成比较单一, 质地黏重, 一般为壤土和黏壤土, 以粉砂和黏粒两级比重最大, 分别占30%左右和40%左右^{[10]142-149}.

有学者研究了黑龙江克东地区和吉林德惠及榆树地区的黑土颗粒组成^{[10]142-149}, 与本次研究区的地形地貌、成土母质和土壤质地环境条件很接近, 可以参考对比. 在黑龙江克东地区, 0~19 cm深度, 土壤颗粒在0.02~0.002 mm的中、细粉砂的比例占42.35%, 土壤颗粒在0.2~0.02 mm的细砂的比例占30.01%. 而在吉林德惠地区, 0~20 cm深度, 土壤颗粒在0.02~0.002 mm的中、细粉砂的比例占26.05%, 土壤颗粒在0.2~0.02 mm的细砂比例占44.89%. 从中、细粉砂的比例来看, 吉林德惠地区明显低于黑龙江克东地区; 相反, 对于略粗些的0.2~0.02 mm细砂的比例, 吉林德惠地区却明显高于黑龙江克东地区. 尽管两个地区的土壤质地属于壤质黏土范畴, 但土壤的粒级差异还是较大. 土壤的粒级越细, 粒间孔隙越多, 土壤的容重减小, 促使土壤有机质含量增高. 土壤颗粒的黏粒成分也是导致有机质含量高低的原因之一, 土壤有机质的含量与其黏粒含量存在着显著的正相关, 它们是一种密切的共生关系. 可见, 有机质含量与土壤的颗粒关系密切. 说明哈尔滨-绥化地区和长春-四平地区土壤质地的差异影响着土壤有机质变化.

土壤有机质的含量与黏粒含量存在着显著的正相关^{[8]59-62}. 土壤中元素有效态含量与土壤元素全量、有效态、土类、有机质、黏粒和pH值相关^[17-18]. 细质地母质

上发育的土壤比从粗质地母质上形成的土壤一般有机质含量高, 是由于较细的质地保水能力强, 通过提供较多的水分和养分促进植物生长, 从而使较多的有机质追加到土壤中. 同时也因其通气不好和较低的土壤温度, 阻碍有机质分解, 而有助于有机质的积累.

2.3 气候因素对土壤有机质的影响

气候条件对土壤的形成起着积极能动的作用. 气候直接影响土壤的水热状况, 影响土壤中矿物质、有机质及其产物的转化、迁移、淋溶和淀积过程^[19]. 影响土壤发生的重要气候因素是温度和降水. 温度影响植物的生长和有机质的微生物降解. 一般情况下, 0℃以下, 土壤有机质的分解速率很小. 在0~35℃温度范围内, 温度提高促进了有机质分解. 在降水量和其他条件不变时, 在温带地区土壤的有机质含量随着温度的升高而减少, 这是由于较低的温度抑制了微生物对土壤有机质的分解. 另一方面, 温度保持不变时, 随着降水量的减少, 土壤有机质含量降低. 这是因为土壤水分对有机质分解和转化的影响是复杂的, 土壤中微生物的活动需要适宜的土壤含水量, 但过多的水分导致进入土壤的氧气减少, 从而改变了土壤有机质的分解过程. 降水量减少, 土壤常处于氧化环境, 土壤中较多的氧气环境促使微生物加快了有机质分解. 当降水量相似情况下, 温度较高, 土壤常处于较干燥的环境, 风化作用增强, 土壤的黏粒性降低, 土壤易于板结, 导致有机质含量减少.

哈尔滨-绥化地区年平均气温在1.3~4.0℃之间, 10℃及以上积温平均为2400~2700℃, 平均降水量500 mm; 而四平-长春地区年平均气温在5.0~5.9℃之间, 10℃及以上积温平均为3078.5℃, 年平均降水量为570 mm. 温度高, 则有机质分解快, 土壤中有有机质含量降低; 温度低, 则有机质分解慢, 土壤中有有机质含量增高. 从两个地区总体特征来看, 温度是影响有机质含量的一个重要因素. 另外, 虽然四平-长春地区年平均降水量略多些, 但过多的水分使得进入土壤的氧气减少, 影响了有机质分解过程和积累. 同时, 由于该地区温度较高, 土壤水分保留时间相对较短, 土壤常处于较干燥的环境, 风化作用增强, 土壤的黏粒性降低, 导致有机质含量减少. 而在四平-长春的局部地区有机质含量也略高, 这与局部地区的成土母质、地貌特点、气候等因素有关, 需要更具体的分析. 可见, 两个

地区气候差异对土壤中有机质的积累有着重要的影响. 对于区域性而言, 母岩和气候组合类型是决定地带性土壤微量元素含量的决定性因素^[20].

2.4 土壤的酸碱性对有机质的影响

土壤的 pH 值常被看作土壤性质的主要变量, 它对土壤的许多化学反应和化学过程都有很大影响, 对土壤中的氧化-还原、沉淀-溶解、吸附-解吸和配位反应起支配作用. 黑土一般呈微酸性至中性, pH 值在 6.5~7.0 之间变化. 土壤 pH 值对植物和微生物所需要的养分元素的有效性有显著的影响. 酸性土壤提高了元素的溶解度, 促进了微生物对有机物质和矿物质的分解吸收, 降低了有机质含量.

典型黑土区内 pH 值的变化范围在 4.28~10.10, 平均值为 6.62. 四平-长春地区平均值为 6.36, 扶余-双城地区平均值为 6.75, 哈尔滨-绥化地区平均值为 6.70. 虽然从平均值来看, 3 个地区土壤为弱酸性-中性, 但从空间分布来看, 哈尔滨-绥化地区以中性-弱碱性为主, 而四平-长春地区则是弱酸性为主, 且分布面积较大. 可见, 3 个地区土壤的酸碱性还是有一定的差异. 说明土壤的酸碱性对有机质的含量有一定的影响, 但规律性不明显.

2.5 人为因素对有机质的影响

一般来讲, 土壤退化更多的是指人为过程导致的土壤功能快速丧失的过程. 引起土壤退化的因素是多种多样的, 就农业土壤资源而言, 普遍存在的主要退化过程包括土壤侵蚀(水蚀和风蚀)、土地荒漠化、土壤酸化、土壤盐碱化等. 有机质含量减少是黑土退化的一个主要特征. 这些退化过程有自然背景的影响, 如气候、植被、地形、地貌、地下水状况等, 但毫无疑问人为作用的影响往往是决定性的. 将土壤开垦为耕地, 是人类对土壤进行改变影响的最重要的表现.

耕地质量是农业生产重要因素. 土地质量下降, 生产能力降低, 对农业生产的可持续发展构成巨大的桎梏^[21]. 黑土地开垦初期, 农田作物代替了自然植被, 作物收获后从地上部分被移出土壤生态系统, 进入土壤的有机质减少, 土壤有机质积累大于分解的过程消失, 导致土壤有机质在开垦后下降速度非常快^[22-24]. 黑土地开垦后, 人类活动和生态环境的改变使土壤中大团聚体不断破碎, 土壤有机质的物理保护减少, 微生物活动加剧使土壤中有机质分解速率增强, 土壤有机

碳的矿化率增强, 而补充的有机物数量不足, 导致黑土地开垦后土壤有机质含量下降迅速^{[5] 1034-1035}. 农田黑土有机质含量一般只有自然土壤的一半^{[10] 142-147}. 可见, 土壤被开垦为农用地对土壤有机质的影响是很大的. 黑土土壤被开垦作为耕地的时间越长, 其土壤有机质减少的程度越大.

对于本研究的典型黑土区而言, 土壤基本属于耕地类型. 从有关资料可知, 四平-长春地区土壤的大面积开垦时间始于 20 世纪 10~20 年代, 而哈尔滨-绥化地区大面积开垦时间约始于 20 世纪 40~50 年代. 哈尔滨-绥化地区由于土壤被开垦为耕地的时间短些, 土壤有机质损失少, 保留多. 而四平-长春地区土壤被开垦为耕地的时间长, 土壤有机质损失多, 保留少. 可见, 耕地开垦时间的长短对土壤有机质的损失有着重要影响. 另一方面, 农作物的连作也会减少土壤有机质, 有学者研究了黑龙江海伦地区的玉米连作 21 a 后导致土壤有机质含量下降了 15.6%^[25]. 化肥的使用也同样使土壤有机质含量降低. 这充分说明耕地开垦时间、耕种方式和使用化肥等人类的农业生产活动对土壤有机质的损失影响很大.

3 认识与结论

通过对典型黑土区有机质的变化和影响因素分析, 得到如下认识.

1) 绥化-扶余-四平一线的典型黑土区, 有机质含量具有纬度地带性分布特征. 有机质含量的总体变化趋势是, 随着纬度的降低有机质含量也逐渐降低. 有机质的这种纬度地带性分布特征与成土母质、地理地貌、气候环境和土壤物理化学性质等条件有重要的关系. 有机质作为土壤的一种物质成分与土壤整体的地带性分布是紧密相关的. 无论是土壤水平地带性(经纬度)分布和垂直地带性(高程)分布, 都明显地为生物气候条件所制约. 而在同一生物气候带内, 由于成土母质、土壤性质、地貌、气候条件不同以及人为因素的影响, 除了地带性特征外, 往往还有非地带性特征分布, 而且有规律地组合, 这便是土壤的地域性分布特点. 这种特点也决定了有机质的地域性分布特征.

2) 影响黑土区有机质变化的因素有成土母质、土壤质地、气候温度、土壤酸碱性和人为因素等. 成土母质和土壤质地是决定土壤有机质含量的重要基础. 湖

相沉积母质(细质)及土壤黏粒成分越多,土壤有机质含量越高.气温、降水量影响土壤有机质的积累和分解,低温湿润气候条件有利于有机质的增加.耕种开垦时间长、化肥农药施用多和农作物连作等人为因素,减少了有机质的积累.土壤酸碱性对有机质的含量有一定的影响.通常情况下,弱碱性土壤有利于有机质的积累,但本次研究的典型黑土区土壤酸碱性对有机质影响的规律性不明显.

参考文献:

- [1]李世泉,王岩松.东北黑土区水土保持监测技术[M].北京:中国水利水电出版社,2008:1-3.
- [2]刘春梅,张之一.我国东北地区黑土分布范围和面积的探讨[J].黑龙江农业科学,2006(2):23-25.
- [3]方洪宾,赵福岳,姜琦刚,等.松辽平原第四纪地质环境与黑土退化[M].北京:地质出版社,2009:158-198.
- [4]韩晓增,李娜.中国东北黑土地研究进展与展望[J].地理科学,2018,38(7):1032-1041.
- [5]韩晓增,邹文秀.我国东北黑土地保护与肥力提升的成效与建议[J].中国科学院院刊,2018,33(2):206-212.
- [6]王文娟,邓荣鑫,张树文.东北典型黑土区沟蚀发生风险评价研究[J].自然资源学报,2014,29(12):2058-2067.
- [7]国土资源部中国地质调查局.中华人民共和国多目标区域地球化学图集——松辽平原中南部地区[M].北京:地质出版社,2013:214-307.
- [8]陈怀满.环境土壤学[M].北京:科学出版社,2005:14-19.
- [9]蒋辉.环境地质学[M].北京:化学工业出版社,2008:50-52.
- [10]张凤荣.土壤地理学[M].北京:中国农业出版社,2002:16-17.
- [11]刘景双,于君宝,王金达,等.松辽平原黑土有机碳含量时空分异规律[J].地理科学,2003,23(6):668-673.
- [12]汪景宽,张旭东,王铁宇,等.黑土土壤质量演变初探Ⅱ——不同地区黑土中有机质、氮、硫和磷现状及变化规律[J].沈阳农业大学学报,2002,33(4):270-273.
- [13]伍光和,田连恕,胡双熙,等.自然地理学[M].3版.北京:高等教育出版社,2000:256-264.
- [14]张素荣,张燕,杨俊泉,等.海河流域平原区土壤碳密度分布特征和碳储量估算[J].地质调查与研究,2015,38(4):305-310.
- [15]蒋小燕,张琴,谢振东.鄱阳湖及周边经济区表层土壤营养元素分布现状与丰缺评价[J].地质调查与研究,2010,33(3):226-231.
- [16]牟树森,青长乐.环境土壤学[M].北京:农业出版社,1993:7-37.
- [17]李瑞敏,刘永生,陈有鉴,等.农业地质地球化学评价方法研究—土地生态安全之地学探索[M].北京:地质出版社,2007:8-28.
- [18]朱立新,马生明,汤丽玲.中国东部平原土壤地球化学基准值、重金属元素异常成因和生态效应[M].北京:地质出版社,2012:59-66.
- [19]储金宇,秦明周.环境地学[M].武汉:华中科技大学出版社,2010:113-145.
- [20]王云,魏复盛.土壤环境化学元素[M].北京:中国环境科学出版社,1995:27-41.
- [21]赵羿,胡远满,曹宇,等.土地与景观—理论基础·评价·规划[M].北京:科学出版社,2005:166-169.
- [22]张之一.黑龙江省土壤开垦后土壤有机质含量的变化[J].黑龙江八一农垦大学学报,2010,22(1):1-4.
- [23]辛刚,颜丽,汪景宽,等.不同开垦年限黑土有机质变化的研究[J].土壤通报,2002,33(5):332-335.
- [24]张孝存,郑粉莉,王彬,等.不同开垦年限黑土区坡耕地土壤团聚体稳定性与有机质关系[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2011,39(5):90-95.
- [25]韩天富,韩晓增.走粮豆轮作均衡持续丰产的农业发展道路[J].大豆科技,2016,(1):1-3.
- [29]王祖伟,徐利森,张文具.土壤微量元素与人类活动强度的对应关系[J].土壤通报,2002,33(4):303-305.
- [30]张哲寰,赵君,戴慧敏,等.黑龙江省讷河市土壤-作物系统 Se 元素地球化学特征[J].地质与资源,2020,29(1):38-43.
- [31]孙梓耀,王菲,崔玉军.黑龙江省松嫩平原南部土壤硒元素的有效性与生态效应[J].黑龙江农业科学,2016(9):43-49.
- [32]王锐,余涛,杨忠芳,等.富硒土壤硒生物有效性及影响因素研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(7):1647-1654.
- [33]梁若玉,和娇,史雅娟,等.典型富硒农业基地土壤硒的生物有效性与剖面分布分析[J].环境化学,2017,36(7):1588-1595.
- [34]安梦鱼,张青,王煌平,等.土壤植物系统硒累积迁移的影响因素及调控[J].中国农学通报,2017,33(11):64-68.
- [35]孙朝,侯青叶,杨忠芳,等.典型土壤环境中硒的迁移转化影响因素研究——以四川省成都经济区为例[J].中国地质,2010,37(6):1760-1768.
- [36]付强,王冬艳,李月芬.吉林中部黑土区土壤硒元素土壤地球化学研究[J].世界地质,2014,33(1):102-111.

(上接第 591 页/Continued from Page 591)