



东北黑土区黑土层厚度的时空变化

刘凯^{1,2,3}, 魏明辉^{1,2,3}, 戴慧敏^{1,2,3}, 刘国栋^{1,2,3}, 贾树海⁴, 宋运红^{1,2,3}, 梁帅^{1,2,3}

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;

2. 自然资源部 黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034;

3. 辽宁省黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034; 4. 沈阳农业大学, 辽宁 沈阳 110866

摘要: 黑土层厚度是评价东北黑土区土壤质量的重要参数,但其厚度的空间分布及多年变化情况仍然不够明确。针对东北黑土区第二次土壤普查的61处典型土壤剖面进行了现状实地调查,并对黑土层厚度变化进行了对比分析。结果表明:近40年来,东北黑土区黑土层厚度平均减少了12 cm,平均减薄速度为0.32 cm/a。四省(区)黑土层减薄厚度具有显著差异,表现为吉林(23.65 cm)>辽宁(11.83 cm)>内蒙古(10.33 cm)>黑龙江(6.83 cm)。吉林省黑土层减薄厚度和比例最大,生态风险最为严峻。吉林省黑土层厚度变化值与气温升高值呈显著的负相关关系,表明随着气候变暖,土壤有机质下降明显,黑土层的厚度也呈减薄趋势。研究表明,水蚀作用也是黑土层厚度减薄的重要影响因素。未来应加强黑土层厚度判定和黑土层厚度空间制图等方面研究,对指导黑土地保护利用具有重要意义。

关键词: 黑土;土壤厚度;时空变化;土壤剖面;东北黑土区

SPATIOTEMPORAL VARIATION OF BLACK SOIL LAYER THICKNESS IN BLACK SOIL REGION OF NORTHEAST CHINA

LIU Kai^{1,2,3}, WEI Ming-hui^{1,2,3}, DAI Hui-min^{1,2,3}, LIU Guo-dong^{1,2,3}, JIA Shu-hai⁴,

SONG Yun-hong^{1,2,3}, LIANG Shuai^{1,2,3}

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 2. Key Laboratory of Black Soil Evolution and Ecological Effects, Ministry of Natural Resources, Shenyang 110034, China; 3. Key Laboratory of Black Soil Evolution and Ecological Effects of Liaoning Province, Shenyang 110034, China; 4. Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

Abstract: The thickness of black soil layer is an important parameter to evaluate the soil quality in Northeast China. To find out its spatial distribution and secular variation, the paper conducts field investigation on the present condition of 61 typical soil profiles from the Second National Soil Survey in the black soil region of Northeast China and analyzes the variation of black soil layer thickness. The results show that the thickness of black soil layer has decreased by 12 cm on average, with the mean thinning rate of 0.32 cm/a in the past 40 years. The thinning thickness of black soil layer in four provinces/regions are significantly different, with the largest thickness and proportion of black soil layer thinning and

收稿日期:2021-12-31;修回日期:2022-04-29. 编辑:张哲.

基金项目:中国地质调查局项目“兴凯湖平原及松辽平原西部土地质量地球化学调查”(编号 DD20190520);“松辽平原黑土地生态地质调查”(编号 DD20221779).

作者简介:刘凯(1989—),男,高级工程师,主要从事土壤地球化学和生态地质研究工作,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号,E-mail//liu.kai@mail.cgs.gov.cn

通信作者:梁帅(1986—),男,高级工程师,主要从事基础地质和生态地质研究,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号,E-mail//ls476476@163.com

the most severe ecological risk in Jilin (23.65 cm), followed by Liaoning (11.83 cm), Inner Mongolia (10.33 cm) and Heilongjiang (6.83 cm). There is a remarkable negative correlation between the black soil layer thickness variation and rising temperature in Jilin Province, indicating that with the climate warming, soil organic matter decreases obviously, and also the thickness of black soil layer. In addition, water erosion is also an important factor affecting the thickness thinning of black soil layer. It is suggested the study on black soil thickness determination and spatial mapping be strengthened in the future, which is of great significance to guide the protection and utilization of black land.

Key words: black soil; soil thickness; spatiotemporal variation; soil profile; black soil region of Northeast China

0 引言

东北黑土区是全球四大黑土分布区之一^[1],也是我国重要的商品粮基地,其粮食总产量占全国 1/4,商品粮产量占全国 1/3。黑土区土壤具有养分含量丰富、结构良好、土壤肥力高等优势^[2],但自 20 世纪初大面积开垦以来,由于长期的高强度利用,加之土壤侵蚀,土壤质量显著下降,主要表现为变“瘦”、变硬和变薄。变“瘦”是指土壤肥力下降,尤其表现为土壤有机质含量的降低,黑土肥力下降现状和机制方面的研究在近年来取得了重要进展^[3-7]。变硬指土壤的物理结构受到破坏,主要表现为土壤容重增加^[8],相关研究成果多见报道^[9-10]。但在区域尺度上,黑土层厚度的研究需要基于大量的野外实地调查,因此关于黑土层厚度时空变化的研究成果相对较少,黑土层的变薄情况依然不明。

深厚的黑土层(或腐殖质层)是黑土最本质的特征之一,黑土层厚度能够反映土壤的发育程度,也是野外鉴别土壤肥力的重要指标^[11-12],同时黑土层厚度的变化对判断黑土的退化程度也有重要的指示意义^[13]。东北黑土层的厚度在文献中多有提及,但说法不一,且多无确切的数据来源。沈波等^[14]在黑土区调查的结果显示,黑土平均每年流失厚度为 0.7~1 cm,一些地方黑土厚度已从开垦初期的 80~100 cm 减少到 20~30 cm。刘丙友^[15]指出典型黑土区内每年流失表层黑土 0.3~1 cm,黑土厚度已由 20 世纪 50 年代的平均 60~70 cm,下降到目前的平均 20~30 cm。于磊等^[16]提出黑土层每年减少 0.4~0.5 cm,局部黑土层由开垦初期的 60~70 cm 减少到 20~30 cm。解运杰等^[17]指出,黑龙江省典型黑土的黑土层厚度自开垦以来下降明显,黑土层厚度在 40~60 cm 的土壤面积仅占黑土面积的 0.1%,黑土层厚度 20~40 cm 的土壤面积占黑土面积的

94.7%。从区域性的土壤调查工作来看,20 世纪 80 年代开展的第二次土壤普查(以下简称“二普”)相对较为系统,具有较详细的野外调查记录,并据此编制了全国 1:100 万土壤图。张之一^[18]根据“二普”土壤剖面记录情况,对黑龙江省和吉林省的黑土层厚度按照薄层(<30 cm)、中层(30~60 cm)和厚层(>60 cm)进行了统计,3 个厚度的土壤比例大致为 4:4:2。

黑土层的减薄会造成土壤生产力的急剧下降^[12,19],但东北黑土区黑土层厚度变化特征尚未查清,亟需开展相关研究。为查明东北地区黑土层在近 40 年的时空变化特征,本研究团队于 2017 年对“二普”记录的典型土壤剖面进行了实地调查,通过土壤剖面判断黑土层厚度,并与“二普”数据进行比较,从而较准确地研究黑土层厚度变化情况,为黑土地保护决策提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 土壤剖面选择

本次黑土层厚度调查以“二普”的典型土壤剖面为调查对象,数据库来源于国家地球系统科学数据中心。该数据库共有典型土壤剖面 2 473 个,其中东北地区土壤剖面约 450 个,每个剖面含有地理位置、土壤剖面分层数据以及不同层次的有机质含量等参数。由于受当时技术限制,“二普”土壤剖面的位置并没有经纬度坐标,而是以描述性信息为主,因此在野外调查前,先在地图上按照描述信息尽可能将剖面位置准确地投在地图上,在野外调查时根据土壤景观或土地利用方式等信息进行位置调整,使调查位置更接近“二普”的实际位置。

在选定点位后,通过挖掘土壤剖面或土壤浅钻的方式进行土壤剖面的观察(图 1),并划定土壤层次。黑

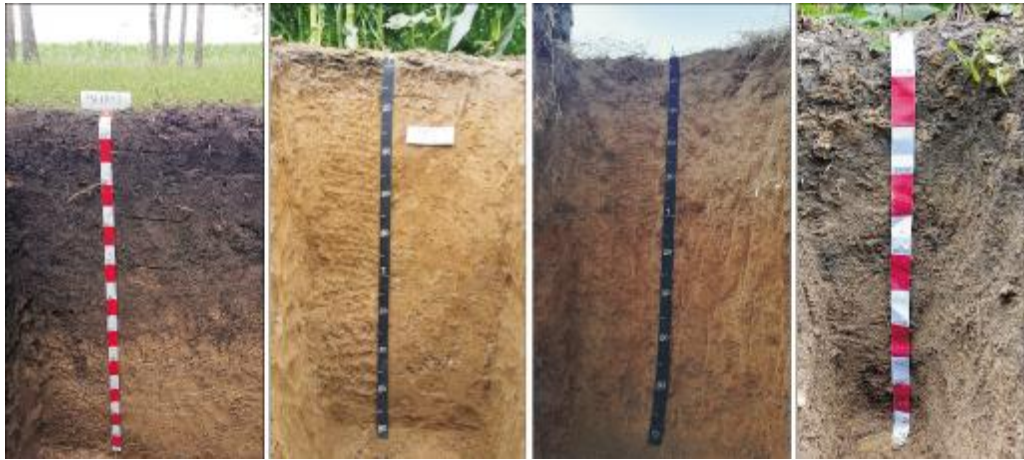


图 1 部分土壤剖面照片

Fig. 1 Photographs of soil profiles

土层厚度主要依靠土壤层次特征以及 Munssel 比色卡进行判定. 参考中国土壤系统分类和美国土壤系统分类中暗沃土层的颜色要求,土壤润态条件下,明度 ≤ 3 ,彩度 ≤ 3 的层位判定为黑土层 [20-21]. 如果局部地区黑土厚度空间变异性较大,需在附近打多个钻孔确认黑土层的平均厚度. 2017 年 6—10 月,共调查了 171 个土壤剖面,经室内反复筛选,有 61 个土壤剖面与“二普”有较严格的对应关系,其中黑土剖面 14 个,草甸土剖面 14 个,黑钙土剖面 11 个,暗棕壤剖面 10 个,其他土壤(潮土、新积土、沼泽土、风沙土、棕壤、褐土等)剖面 12 个,其中有 53 个剖面采自旱田,8 个采自林地. 土壤剖面调查位置见图 2.

1.2 黑土层厚度比较

采用比较法研究黑土层厚度的变化. 由于土壤发生学分层时会存在过渡层,如 A_hB 层、 BA_h 层等,为便于比较,需对本次调查和“二普”的黑土层厚度进行数学转换,特制定如下规则:1)黑土层厚度= A_h 厚度+ A_hB 厚度 $\times 2/3$,或 A_h 厚度+ BA_h 厚度 $\times 1/3$,并经剖面照片验证通过;2)参考 A_hB 层或 BA_h 层的形态学特征,如团粒或团块结构计入,核状结构则不计入;3)O 层(枯枝落叶层)不计入黑土层厚度;4)白浆化黑土由于特殊发生学层次 E 层(白浆层)的存在,黑土层厚度不能连续计算,故不参与统计分析.

2 结果与分析

2.1 黑土层厚度变化情况

对 61 个土壤剖面实测厚度和“二普”记录厚度进

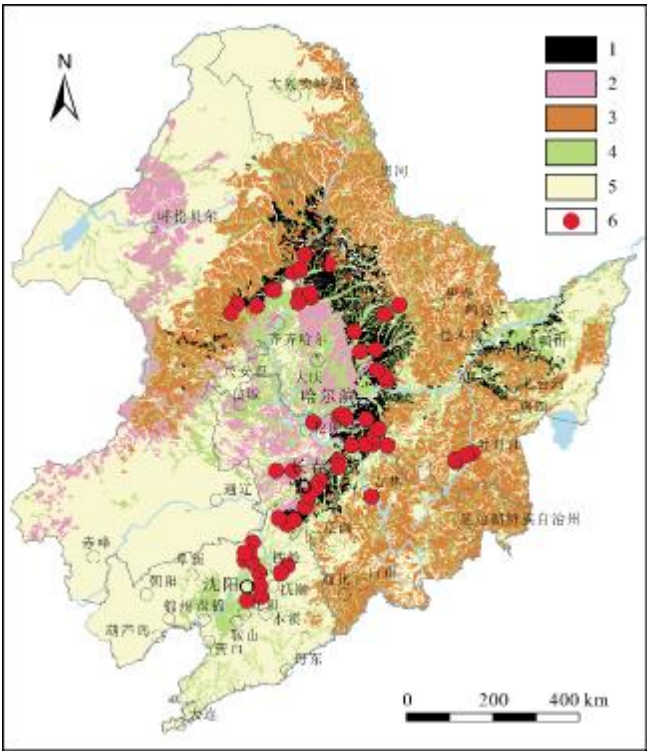


图 2 土壤剖面点位图

Fig. 2 Location map of soil profiles

1—黑土(black soil); 2—黑钙土(chernozem); 3—暗棕壤(dark brown soil); 4—草甸土(meadow soil); 5—其他土壤(other soil); 6—土壤剖面位置(location of soil profile)

行统计(表 1). 结果显示,两期黑土层厚度分布均呈左偏形态(图 3). “二普”黑土层厚度在 17~141 cm,平均值为 44 cm,中位数为 38 cm,2017 年实测黑土层厚度在 5~105 cm,平均值为 31.32 cm,中位数为 25 cm. 共

表 1 黑土层厚度统计表
Table 1 Statistics of black soil layer thickness

黑土层厚度	均值	中位数	变幅	标准离差
二普/cm	44	38	17~141	22.99
实测/cm	31.32	25	8~105	19.39
变化值/cm	-12.67	-12	-45~+35	15.06
变化率/%	-25	-29.58	-78~+108	34.40

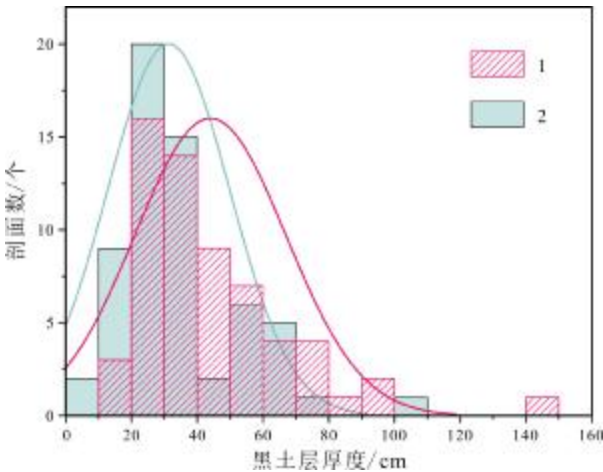


图 3 黑土层厚度直方图

Fig. 3 Histogram of black soil layer thickness

1—“二普”数据(data from the 2nd national soil survey); 2—实测数据
(data of this study)

有 52 个土壤剖面的黑土层厚度减薄,9 个土壤剖面黑土层增厚,厚度变化范围为-45~+35 cm,集中分布于-20~+10 cm 之间,平均值为-12.67 cm,中位数为-12 cm,说明黑土层整体呈减薄趋势,与“二普”相比,黑土层厚度的减薄比例平均值为-25.4%,说明黑土层厚度在 37 年内平均减薄了约 1/4,黑土层平均减薄速率为 0.32 m/a,与前人的观点基本吻合^[15].黑土层厚度变化值与“二普”黑土层厚度整体成负相关关系(图 4),即黑土层初始厚度越大,其减薄的厚度越大.

2.2 黑土层厚度变化的空间分布

黑土层厚度的空间分布具有一定规律性,整体表现为辽宁省最薄、黑龙江省和吉林省较厚的分布特征(图 5A、B).辽宁省黑土层实测厚度在 8~25 cm 之间,平均值仅 16.5 cm.黑龙江省和吉林省实测黑土层厚度平均值分别为 33.38 cm 和 37.47 cm,中位数均为 30 cm(表 2).

经单因素方差检验,四省(区)黑土层厚度的变化

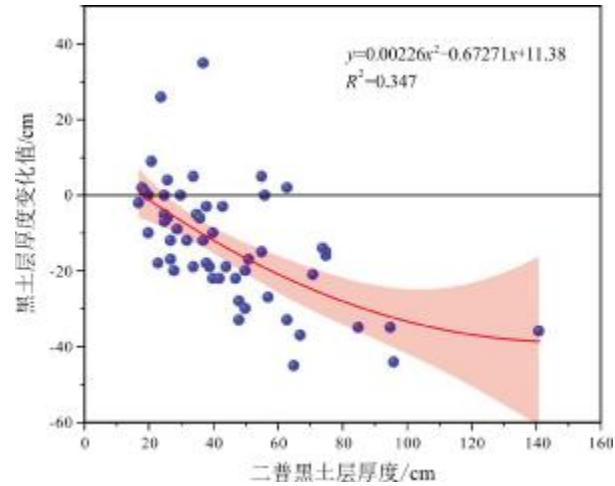


图 4 黑土层厚度变化值与“二普”黑土层厚度散点图

Fig. 4 Scatter diagram of black soil layer thickness variation vs. thickness by the 2nd national soil survey

值具有显著差异.在过去近40年的时间里,吉林省黑土层厚度减薄最为严重(图 5C),平均减薄了 23.65 cm,辽宁省和内蒙古自治区黑土层平均减薄厚度分别为 11.83 cm 和 10.33 cm,而黑龙江省黑土层减薄最小,平均减薄了 6.83 cm.

黑土层减薄比例结果显示,吉林、辽宁、内蒙古和黑龙江的黑土层减薄比例平均值分别为 40.96%、37.22%、21.52%和 11.80%(图 5D),减薄速率分别为 0.64、0.32、0.28 和 0.18 cm/a.

表 2 四省(区)黑土层实测厚度及变化量统计表
Table 2 Statistics of surveyed thickness and variations of black soil layer in four provinces/regions

厚度	地区	样品数	平均值	标准差	最小值	中位数	最大值
实测值	黑龙江	29	33.38	16.89	10	30	72
	吉林	17	37.47	22.99	5	30	105
	辽宁	12	16.50	5.20	8	17.5	25
	内蒙古	3	36.00	16.37	18	40	50
变化值	黑龙江	29	-6.83	16.13	-45	-5	35
	吉林	17	-23.65	11.24	-44	-20	-6
	辽宁	12	-11.83	9.83	-30	-11	1
	内蒙古	3	-10.33	9.45	-21	-7	-3

单位:cm.

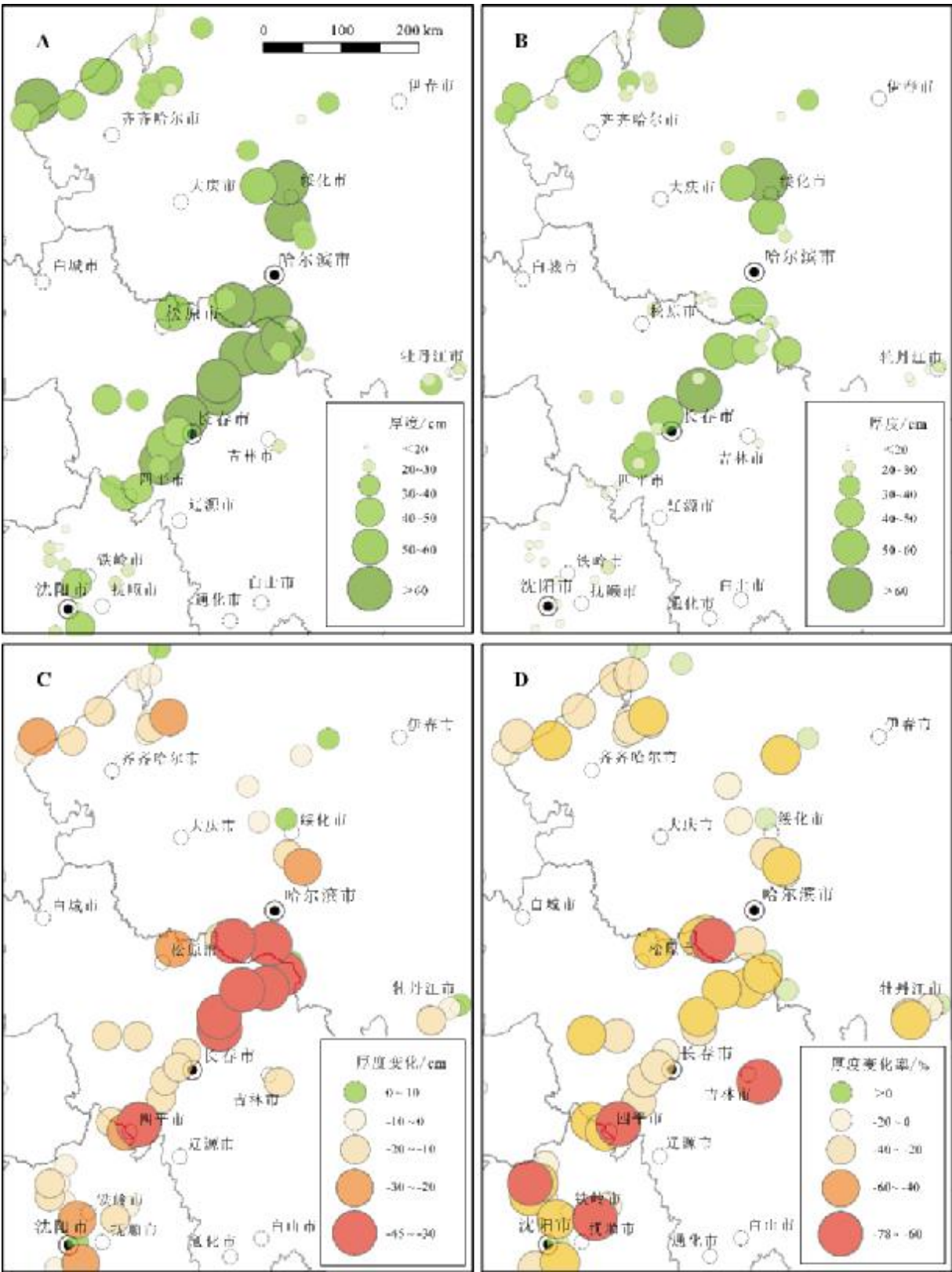


图 5 黑土层厚度分布及变化图

Fig. 5 Distribution and variation of black soil thickness

A—“二普”黑土层厚度(black soil thickness by the 2nd national soil survey); B—实测黑土层厚度(black soil thickness of this study); C—厚度变化(thickness variation); D—层厚度变化率(thickness change rate)

综上可知,无论从黑土层减薄厚度和减薄比例看,吉林省的情况最为严重,虽然目前黑土层平均厚度仍在 30 cm 以上,但其减薄比例和速率最大。吉林省的南部已经是黑土土类分布的南端,如果在这样的侵蚀速率下,黑土层逐渐变薄,土壤将发生逆向演替,即黑土→黑黄土→黄黑土→破皮黄→黄土,土壤肥力及土地生产力可能会快速下降。辽宁省黑土层减薄厚度在 10 cm 左右,虽然与内蒙古类似,但由于辽宁省“二普”的黑土层厚度本底较薄,因此其下降比例达到 37.22%,远高于内蒙古的 21.52%。

2.3 不同类型土壤黑土层厚度变化情况

不同类型土壤的黑土层发育程度往往不同,但另一方面,即使是同一种土壤类型,在不同地区也会表现出较明显的差异性。本次调查的土壤类型包括黑土、黑钙土、暗棕壤、草甸土以及其他土壤类型,经单因素方差检验,各土壤类型的黑土层厚度及变化量在 $P \leq 0.05$ 水平上均不显著。原因主要是本次调查的土壤剖面空间跨度大,气候-生物条件范围广,同一类型土壤的黑土层厚度变异性较大(图 6)。这说明不能简单地利用土壤类型来研究黑土层厚度变化,还要考虑研究区土壤类型的空间分布范围,在上一节中,各省(区)黑土层厚度具有显著差异也表明,在区域尺度上,黑土所处空间位置对黑土层发育的重要性要大于土壤类型的作用^[22]。

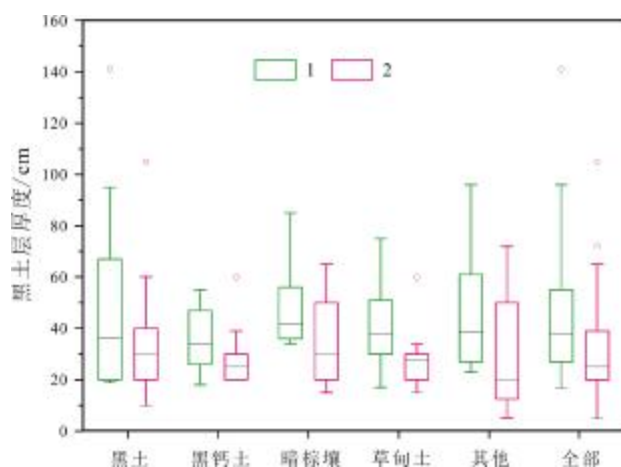


图 6 不同土壤类型黑土层厚度箱线图

Fig. 6 Box plot of black soil layer thickness by soil types

1—“二普”数据(data from the 2nd national soil survey); 2—实测数据
(data of this study)

3 黑土层厚度变化原因分析

3.1 气候因素

在全球及区域尺度上,气候对土壤有机质的积累和黑土层的形成往往起到决定性作用^[23]。一方面,气候通过影响地表植被类型及其生物量,控制有机质进入土壤环境中的数量和深度;另一方面,水热因素通过影响土壤微生物活性,控制了土壤有机质的分解与矿化速率,进而影响有机质的积累量^[24]。温度越高,土壤微生物对有机质的分解率越高^[25],土壤有机质积累越慢^[26],越不利于黑土层的形成,因此辽宁的黑土层发育厚度要薄于吉林和黑龙江。

近代以来,随着人类工业文明的兴起,全球气候发生剧烈变化,整体表现为气温的显著升高和降雨的不均匀性^[27]。东北地区是中国纬度最高的地区,同时也是气温升高最显著的地区之一^[28]。1961—2017年,东北区域年平均气温升高速率为 $0.31\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,高于全国同期平均升温速率和全球近 50 年升温速率^[29]。温度升高会提高土壤微生物活性,加快有机质的分解^[30],进而对黑土层的发育产生负面效应。但同时也有研究表明,气温升高并不是中国北方土壤有机质下降的主导因素^[31]。利用东北地区 1980 年和 2015 年的气温数据(来源于中国科学院资源环境科学与数据中心),计算了东三省土壤调查点所在位置的气温变化值,并与黑土层厚度变化进行相关性分析(图 7)。结果显示,吉林省黑土层减薄厚度与气温升高值呈显著的负相关性($P < 0.05$),说明温度升高越明显的地区,土壤有机质下降越明显,黑土层的厚度也呈现减薄的趋势。黑龙江省和辽宁省的黑土层厚度与气温没有显著相关性,可能与调查点比较分散有关,其他因素的影响要强于温度变化,从而掩盖了气候对黑土层厚度的作用。

3.2 侵蚀作用

东北黑土区地形以漫川漫岗为主,特征为坡缓坡长,平原区坡度一般为 $1\sim 5^{\circ}$,山前冲洪积台地坡度多在 $3\sim 8^{\circ}$ ^[32],这种地貌下,黑土水蚀发育,对黑土层的减薄具有重要影响^[33]。水蚀作用主要发生在坡的上部,坡上黑土水分饱和后形成径流,沿坡面向坡下流失,部分表层黑土可形成固体径流,由坡上转移到坡下,甚至流入江河。面蚀最严重的时期主要发生在春季耕作前,表层黑土解冻后随水流一起流失,在作物生长季,由于有植被的影响,面蚀较弱。在缓坡底部,黑土的堆

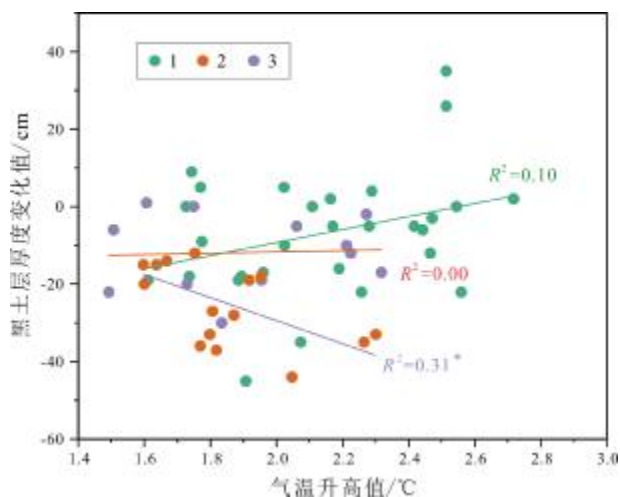


图7 黑土层厚度变化与气温变化散点图

Fig. 7 Scatter plot of black soil layer thickness variation vs. temperature change

1—黑龙江省(Heilongjiang Province); 2—吉林省(Jilin Province); 3—辽宁省(Liaoning Province)

积作用通常大于侵蚀作用^[34],造成黑土的空间再分布,这也是本次调查中个别土壤黑土层增厚的原因。

为了探讨黑土层厚度变化与侵蚀的关系,利用DEM数据计算了调查点位的坡度值(图8)。线性回归分析结果表明,各省黑土层厚度变化值与坡度之间均不具有显著的相关性。前人研究表明,坡度、坡长和土壤所处位置都对侵蚀强度产生影响^[12],因此在区域尺度上,难以用坡度等单个指标来定量分析侵蚀对黑土减薄的影响。近期一项研究表明,松辽平原东部黑土区水蚀对黑土的侵蚀速率在0~3 mm/a,在此速率下,黑土层可能在113 a后侵蚀消失^[35],因此侵蚀对黑土的影响不容忽视。

4 黑土层厚度研究展望

黑土层厚度是东北黑土地的一个重要指标,但至今研究程度较低。未来应着重开展以下两个方面工作:一是制定科学的黑土层厚度判定规则,二是加强黑土层厚度的空间制图方法研究。

4.1 黑土层厚度判定

在土壤调查中,土壤颜色通常是野外划定土壤层次的最直观方式,Munsell色卡可以将土壤颜色定量化,但仍具有较大的主观性和异读性,导致厚度监测的准确度不高。有学者提出利用图像处理判别黑土层厚度的方法^[36-37],即对土壤剖面拍照后,利用计算机进行

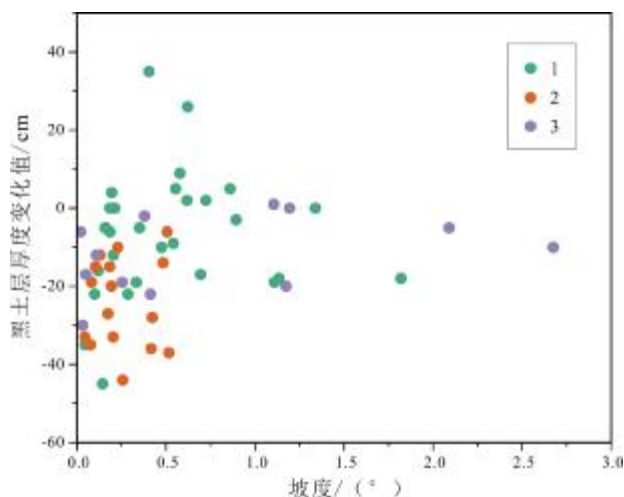


图8 黑土层厚度变化与坡度散点图

Fig. 8 Scatter plot of black soil layer thickness variation vs. slope gradient

1—黑龙江省(Heilongjiang Province); 2—吉林省(Jilin Province); 3—辽宁省(Liaoning Province)

图像处理划定土壤层次,然而受照相设备、土样特性、照相环境等影响,较难达到理想的判别结果,不利于大面积推广使用。近年来有学者利用便携式测色仪测定不同深度风干土壤的颜色指标^[38],建立了相对可靠的土壤色调、明度、彩度与有机质含量的模型。这种通过仪器设备将颜色定量化的方式应在黑土层判定中开展实践探索。

4.2 黑土层厚度空间制图

黑土层的厚度空间分布图有助于直观感受黑土的薄厚分布及变化情况,对于制定黑土保护措施具有重要意义。黑土厚度空间制图首先要建立标准的黑土厚度判定方法,然后根据制图比例尺按相应密度测定区域内一定数量点位的黑土层厚度,最后结合GIS手段,以土壤类型、地形地貌和土地利用方式等作为环境影响因子,建立黑土层厚度与影响因子间的关系方程^[39]。目前在景观尺度已有土壤厚度制图的相关研究^[33, 40-41],但由于区域尺度土壤厚度的空间变异性大,其空间制图方法和精度仍是挑战。

5 结论

与近40年前相比,本次调查的61个土壤剖面中,有52个土壤剖面黑土层厚度减薄,9个土壤剖面黑土层增厚,厚度变化范围为-45~+35 cm,整体呈减薄趋势,平均减薄了约1/4,减薄速率为0.38 cm/a。

在空间上,吉林省黑土层厚度减薄最为严重,平均减薄了 23.65 cm, 减薄比例达到 40.96%。辽宁省和内蒙古东部黑土层平均减薄厚度分别为 11.83 cm 和 10.33 cm, 但辽宁省减薄比例达到 37.22%。黑龙江省黑土层厚度变化最小,平均减薄了 6.83 cm。

水蚀作用是东北地区黑土层减薄的重要因素,本研究发现,气温升高能加快土壤有机质的分解,对黑土层的发育和保持具有负面效应。

致谢:感谢国家科技资源共享服务平台-国家地球系统科学数据中心 (<http://soil.geodata.cn>)和中国科学院资源环境科学与数据中心 (www.resdc.cn)提供的数据支撑;感谢沈阳农业大学徐威副教授对本文给予的指导。

参考文献(References):

- [1] Sorokin A, Owens P, Láng V, et al. "Black soils" in the Russian soil classification system, the US soil taxonomy and the WRB: Quantitative correlation and implications for pedodiversity assessment[J]. *Catena*, 2021, 196: 104824.
- [2] 张新荣, 焦洁钰. 黑土形成与演化研究现状[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(2): 553-568.
Zhang X R, Jiao J Y. Formation and evolution of black soil[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50(2): 553-568.
- [3] Liu K, Dai H M, Liu G D, et al. Spatial analysis of land use change effect on soil organic carbon stocks in Sanjiang Plain of China between 1980 and 2016[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2019, 93(S1): 130-131.
- [4] 宋运红, 刘凯, 戴慧敏, 等. 35 年来东北松辽平原耕地土壤全氮时空变化[J]. 中国地质, 2021, 48(1): 332-333.
Song Y H, Liu K, Dai H M, et al. Spatio-temporal variation of total N content in farmland soil of Songliao Plain in Northeast China during the past 35 years[J]. *Geology in China*, 2021, 48(1): 332-333.
- [5] 刘国栋, 李禄军, 戴慧敏, 等. 松辽平原土壤碳库变化及其原因分析[J]. 物探与化探, 2021, 45(5): 1109-1120.
Liu G D, Li L J, Dai H M, et al. Change in soil carbon pool in Songliao Plain and its cause analysis[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(5): 1109-1120.
- [6] 宋运红, 张哲寰, 杨凤超, 等. 黑龙江海伦地区垦殖前后典型黑土剖面主要养分元素垂直分布特征[J]. 地质与资源, 2020, 29(6): 543-549.
Song Y H, Zhang Z H, Yang F C, et al. Vertical distribution of major nutrient elements in typical black soil sections in Hailun, Heilongjiang Province: Before and after reclamation[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(6): 543-549.
- [7] 戴慧敏, 刘凯, 宋运红, 等. 东北地区黑土退化地球化学指示与退化强度[J]. 地质与资源, 2020, 29(6): 510-517.
Dai H M, Liu K, Song Y H, et al. Black soil degradation and intensity in Northeast China: Geochemical indication[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(6): 510-517.
- [8] 卜崇峰, 吴淑芳, 张兴昌, 等. 东北黑土结皮发育过程[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 357-362.
Bu C F, Wu S F, Zhang X C, et al. Development process of crust in black soil of Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 357-362.
- [9] 魏丹, 匡恩俊, 迟凤琴, 等. 东北黑土资源现状与保护策略[J]. 黑龙江农业科学, 2016(1): 158-161.
Wei D, Kuang E J, Chi F Q, et al. Status and protection strategy of black soil resources in northeast of China[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2016(1): 158-161.
- [10] 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.
Han X Z, Li N. Research progress of black soil in Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(7): 1032-1041.
- [11] 李骞, 段兴武. 利用黑土层厚度评价东北黑土区土壤生产力——以鹤北小流域为例[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 154-159.
Li A, Duan X W. Productivity assessment for black soil region in Northeastern China using black soil thickness: A case study of Hebei watershed[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(1): 154-159.
- [12] Gu Z J, Xie Y, Gao Y, et al. Quantitative assessment of soil productivity and predicted impacts of water erosion in the black soil region of northeastern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 637-638: 706-716.
- [13] Duan X W, Xie Y, Ou T H, et al. Effects of soil erosion on long-term soil productivity in the black soil region of northeastern China[J]. *Catena*, 2011, 87(2): 268-275.
- [14] 沈波, 范建荣, 潘庆宾, 等. 东北黑土区水土流失防治试点工程项目概况[J]. 中国水土保持, 2003(11): 7-8.
Shen B, Fan J R, Pan Q B, et al. General situation of pilot project of comprehensive prevention and control of soil and water loss of chernozem region in northeast of China[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2003(11): 7-8.
- [15] 刘丙友. 典型黑土区土壤退化及可持续利用问题探讨[J]. 中国水土保持, 2003(12): 28-29.
Liu B Y. Approach to issues of soil deterioration and sustainable utilization of typical chernozem region[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2003(12): 28-29.
- [16] 于磊, 张柏. 基于 GIS 的黑土区土壤相对环境容量空间分异特征研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 511-516.
Yu L, Zhang B. Spatial characteristics of environmental capacity in

- black soil area based on GIS[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 511–516.
- [17]解运杰, 王岩松, 王玉玺. 东北黑土区地域界定及其水土保持区划探析[J]. *水土保持通报*, 2005, 25(1): 48–50.
- Xie Y J, Wang Y S, Wang Y X. Defining of chernozem area and zoning of soil and water conservation in northeastern China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2005, 25(1): 48–50.
- [18]张之一. 黑土开垦后黑土层厚度的变化[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2010, 22(5): 1–3.
- Zhang Z Y. The thickness changes of Ah horizon after the phaeozems cultivated [J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2010, 22(5): 1–3.
- [19]刘慧, 魏永霞. 黑土区土壤侵蚀厚度对土地生产力的影响及其评价[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(20): 288–296.
- Liu H, Wei Y X. Influence of soil erosion thickness on soil productivity of black soil and its evaluation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(20): 288–296.
- [20]Soil Survey Staff. Keys to soil taxonomy[M]. 12th ed. United States Department of Agriculture, 2014: 1–360.
- [21]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[M]. 3 版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.
- Soil System Classification Group, Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, China Soil Systematic Classification Research Cooperation Group. Soil systematic classification search in China[M]. 3rd ed. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001.
- [22]Fisher J P, Estop-Aragonés C, Thierry A, et al. The influence of vegetation and soil characteristics on active-layer thickness of permafrost soils in boreal forest [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(9): 3127–3140.
- [23]Shi Z, Allison S D, He Y J, et al. The age distribution of global soil carbon inferred from radiocarbon measurements[J]. *Nature Geoscience*, 2020, 13(8): 555–559.
- [24]Doetterl S, Stevens A, Six J, et al. Soil carbon storage controlled by interactions between geochemistry and climate[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 780–783.
- [25]Liu X M, Li Q, Liang W J, et al. Distribution of soil enzyme activities and microbial biomass along a latitudinal gradient in farmlands of Songliao Plain, Northeast China[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(4): 431–440.
- [26]Liu X Y, Zhao Y C, Shi X Z, et al. Uncertainty in CENTURY-modelled changes in soil organic carbon stock in the uplands of Northeast China, 1980–2050[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2019, 113(1): 77–93.
- [27]IPCC. Summary for policymakers [C]//IPCC. Climate change 2021: The physical science basis: Working Group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [28]任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 中国气温变化研究最新进展[J]. *气候与环境研究*, 2005, 10(4): 701–716.
- Ren G Y, Chu Z Y, Zhou Y Q, et al. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2005, 10(4): 701–716.
- [29]《东北区域气候变化评估报告: 2020》编写委员会. 东北区域气候变化评估报告: 2020[M]. 北京: 气象出版社, 2021.
- Editorial Committee for Regional Climate Change Assessment Report of Northeast China: 2020. Regional climate change assessment report of Northeast China: 2020[M]. Beijing: Meteorological Press, 2021. (in Chinese)
- [30]Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. *Nature*, 2006, 440(7081): 165–173.
- [31]Zhou Y, Hartemink A E, Shi Z, et al. Land use and climate change effects on soil organic carbon in north and northeast China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 647: 1230–1238.
- [32]范昊明, 蔡强国, 王红闪. 中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(2): 66–70.
- Fan H M, Cai Q G, Wang H S. Condition of soil erosion in phaeozem region of Northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(2): 66–70.
- [33]Liu J T, Han X L, Chen X, et al. Prediction of soil thicknesses in a headwater hillslope with constrained sampling data[J]. *Catena*, 2019, 177: 101–113.
- [34]Huang D H, Pei M Z, Zhou L L, et al. Identification of sediment sources and exploration of scale effects in the black soil region of Northeast China[J]. *Catena*, 2020, 195: 104848.
- [35]Wang H, Yang S L, Wang Y D, et al. Rates and causes of black soil erosion in Northeast China[J]. *Catena*, 2022, 214: 106250.
- [36]吴才武, 杨越, 夏建新. 基于 RGB 的黑土有机质快速测定方法研究[J]. *土壤通报*, 2016, 47(4): 853–859.
- Wu C W, Yang Y, Xia J X. Rapid method for estimating organic matter of black soil based on RGB [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(4): 853–859.
- [37]诸莉燕, 毕利东, 柳开楼. 基于图像处理的土壤颜色判别方法研究[J]. *广东农业科学*, 2018, 45(12): 125–130.
- Zhu L Y, Bi L D, Liu K L. Soil color discrimination method based on image processing[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2018, 45(12): 125–130.

- Dong X J, Xu Q, She J X, et al. Preliminary study on interpretation of geological hazards in Jiuzhaigou based on multi-source remote sensing data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3): 432–441.
- [83] Roering J J, Stimely L L, Mackey B H, et al. Using DInSAR, airborne LiDAR, and archival air photos to quantify landsliding and sediment transport [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(19): L19402.
- [84] 陆会燕, 李为乐, 许强, 等. 光学遥感与 InSAR 结合的金沙江白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(9): 1342–1354.
- Lu H Y, Li W L, Xu Q, et al. Early Detection of landslides in the upstream and downstream areas of the Baige landslide, the Jinsha River based on optical remote sensing and InSAR technologies [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(9): 1342–1354.
- [85] 何倩, 范洪冬, 段晓晔, 等. 三维激光扫描与 DInSAR 联合监测矿区地表动态沉降方法 [J]. *煤矿安全*, 2017, 48(12): 70–73, 77.
- He Q, Fan H D, Duan X Y, et al. A combining method of 3D laser scanning and DInSAR for monitoring surface dynamic subsidence in Mining Area [J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(12): 70–73, 77.
- [86] Wang R, Wu K, He Q M, et al. A novel method of monitoring surface subsidence law based on probability integral model combined with active and passive remote sensing data [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(2): 299.
- [87] Francis P, Rothery D. Remote sensing of active volcanoes [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28: 81–106.
- [88] Pavez A, Remy D, Bonvalot S, et al. Insight into ground deformations at Lascar volcano (Chile) from SAR interferometry, photogrammetry and GPS data: Implications on volcano dynamics and future space monitoring [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(3): 307–320.
- [89] Kääb A, Huggel C, Fischer L, et al. Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains: an overview [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2005, 5(4): 527–554.
- [90] 吴立新, 李佳, 苗则朗, 等. 冰川流域孕灾环境及灾害的天空地协同智能监测模式与方向 [J]. *测绘学报*, 2021, 50(8): 1109–1121.
- Wu L X, Li J, Miao Z L, et al. Pattern and directions of spaceborne-airborne-ground collaborated intelligent monitoring on the geo-hazards developing environment and disasters in glacial basin [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(8): 1109–1121.
-
- (上接第 442 页/Continued from Page 442)
- [38] 陈剑科, 袁大刚, 晏昭敏, 等. 测色仪与中国标准土壤色卡测定土壤颜色比较——以川中丘陵区为例 [J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 78–89.
- Chen J K, Yuan D G, Yan Z M, et al. Comparison between colorimeter and new standard soil colour chart of China in determining Munsell color of soils: A case study of central Sichuan hilly region [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 78–89.
- [39] Wang W, Zhao Y, Zhang T L, et al. Regional soil thickness mapping based on stratified sampling of optimally selected covariates [J]. *Geoderma*, 2021, 400: 115092.
- [40] Zhang S, Liu G, Chen S L, et al. Assessing soil thickness in a black soil watershed in northeast China using random forest and field observations [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, 9(1): 49–57.
- [41] Scarpone C, Schmidt M G, Bulmer C E, et al. Modelling soil thickness in the critical zone for Southern British Columbia [J]. *Geoderma*, 2016, 282: 59–69.