

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.04.024

刘若轩, 王志强, 谭玉萍. 东北典型黑土区小流域黑土层厚度及影响因素[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 346-353, 361.

LIU Ruoxuan, WANG Zhiqiang, TAN Yuping. The thickness of black soil layer and its influencing factors in a small watershed of typical black soil region in Northeast China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 346-353, 361.

## 东北典型黑土区小流域黑土层厚度及影响因素

刘若轩<sup>1,2</sup>, 王志强<sup>1,2</sup>, 谭玉萍<sup>1,2</sup>

(1. 北京师范大学地理科学学部地理学院, 北京 100875; 2. 北京师范大学地理科学学部地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** [目的] 为掌握典型黑土区小流域黑土层厚度现状及其空间变化格局, 实现小流域黑土层厚度动态监测。[方法] 研究选择典型黑土区黑龙江省嫩江市鹤山农场小流域, 以 100 m 间距均匀布设样点, 用土钻采集由地表到母质的原状土剖面土样, 判断黑土层厚度, 同时基于无人机航拍影像提取地形、土地利用等数据, 分析小流域黑土层厚度及其影响因素。[结果] 在小流域 295 个样点中, 黑土层厚度变化于 0—160 cm, 平均 44.1 cm, “破皮黄”(黑土层厚度 $\leq 20$  cm)占 17.63%, 薄层( $< 30$  cm)占 43.39%, 中层(30—60 cm)占 36.27%, 厚层( $> 60$  cm)占 20.34%; 厚层黑土主要分布在小流域的坡底、沟道附近和其他地形平缓部位, 薄层黑土主要分布在陡坡和砂砾质母质区域, 其他区域以中层黑土为主; 地形位置指数、曲率、坡度等地形参数与黑土层厚度存在显著的相关性; 耕地黑土层厚度显著低于草地和林地。[结论] 黑土层厚度在小流域内存在显著的空间异质性, 这主要受地形、土壤母质和土地利用的影响。研究结果可作为代表区域黑土层厚度动态监测的基础之一, 同时可为小流域水土保持措施制定提供数据支撑。

**关键词:** 东北黑土区; 小流域; 地形; 黑土; 黑土层厚度

**中图分类号:** S152.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242-(2024)04-0346-08

## The Thickness of Black Soil Layer and Its Influencing Factors in a Small Watershed of Typical Black Soil Region in Northeast China

LIU Ruoxuan<sup>1,2</sup>, WANG Zhiqiang<sup>1,2</sup>, TAN Yuping<sup>1,2</sup>

(1. School of Geography, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. State Key Laboratory of Earth Surface Process and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** [Objective] In order to grasp the current situation and spatial variability pattern of black soil layer thickness in the typical black soil region within a small watershed, and realize dynamic monitoring of black soil layer thickness in such areas. [Methods] This study selected a small watershed of Heshan Farm in Nenjiang City, Heilongjiang Province. Soil sampling points were uniformly distributed at intervals of 100 meters, and undisturbed soil samples were collected from surface to parent material using soil augers to determine the thickness of the black soil layer. Meanwhile, terrain and land use data were extracted based on UAV aerial photography data. The study analyzed the thickness of black soil layer in the small watershed and its influencing factors. [Results] Among the 295 sampling points in the small watershed, the thickness of black soil layer varied from 0 to 160 cm, with an average of 44.1 cm. “Popihuang” (black soil layer thickness  $\leq 20$  cm) accounted for 17.63%, thin black soil ( $< 30$  cm) comprised 43.39%, medium layer (30—60 cm) constituted 36.27%, and thick layer ( $> 60$  cm) accounted for 20.34%. Thick layer black soil was primarily distributed in the lower slopes, in the vicinity of gullies, and other gently sloping areas of the watershed, while thin layer black soil was predominantly found in steep slopes and areas with sandy gravel parent material, and medium layer black soil was predominant in other regions. Terrain indices such as topographic

收稿日期: 2024-02-25 修回日期: 2024-03-30 录用日期: 2024-04-08 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-05-16

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1500803, 2022YFE011530004)

第一作者: 刘若轩 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 202221051018@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 王志强 (1968—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与土地生产力研究。E-mail: wangzhiqiang@bnu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

position index, curvature, slope exhibited significant correlations with the black soil layer thickness. The thickness of black soil layers in cultivated land was significantly lower compared to grassland and forest land. [Conclusion] The thickness of black soil layer exhibits significant spatial heterogeneity within the small watershed, which is primarily influenced by terrain characteristic, parent material and landuse. The research findings can be used as one of the bases for dynamic monitoring of regional black soil layer thickness, and can provide data support for the formulation of soil and water conservation measures in small watershed.

**Keywords:** the black soil region of Northeast China; small watershed; topography; black soil; black soil layer thickness

Received: 2024-02-25

Revised: 2024-03-30

Accepted: 2024-04-08

Online(www.cnki.net): 2024-05-16

土壤厚度一般指土体厚度或有效土层厚度。土体厚度为土壤 A 层和 B 层厚度之和<sup>[1]</sup>,有效土层厚度为植物根系垂直延伸到可吸收养分或至根系生长障碍层的厚度<sup>[2]</sup>。土壤厚度是土壤发育与侵蚀之间动态平衡的结果<sup>[3]</sup>,直接影响土壤贮水及地表水文循环<sup>[4]</sup>,进而影响植物生长。东北地区是我国重要的粮食产地,这有赖于肥沃的黑土层,但由于不合理的管理与高强度的土地利用,土壤侵蚀严重<sup>[5-7]</sup>,已经导致黑土层厚度的下降<sup>[8]</sup>,严重威胁我国粮食安全,所以黑土层厚度的变化受到各方的重点关注。与黄土高原不同,黑土区土壤侵蚀具有隐蔽性,坡面侵蚀严重,但河流输沙显著偏低<sup>[7]</sup>,这造成黑土层厚度的差异集中于小流域内部。因此,需要明确流域尺度黑土层厚度现状,这对实现黑土层厚度动态监测,进行以小流域为单元的精准水土保持具有重要意义。

目前在东北黑土区已进行多次土壤调查,但这些调查大部分并不以黑土层厚度作为主要调查目的。早在 20 世纪 30 年代 PENDLETON 等<sup>[9]</sup>便对黑龙江省哈尔滨市附近的土壤进行调查,认为黑土层厚度 25—100 cm,一般 40—50 cm;50 年代朱显谟<sup>[10]</sup>调查了黑龙江省东部哈尔滨、铁力、德都、克山和兰西 5 地的黑土,认为黑土层厚度在 40—80 cm,同时期的调查结果,也有 60—80<sup>[11]</sup>,60—70<sup>[12]</sup>,80—120 cm<sup>[13]</sup>等说法。20 世纪 80 年代初,认为黑土层厚度“30—70 cm,个别岗坡下部可大于 70 cm,坡度大者不足 30 cm”<sup>[14-15]</sup>,也有“一般 70 cm,少数 100 cm”<sup>[16]</sup>等说法;1982 年中国科学院南京土壤研究所对黑龙江省和内蒙古东北部进行了黑土调查,认为黑土层厚度 30—60 cm<sup>[17]</sup>;第二次土壤普查中黑土区的 292 个剖面 and 27 个典型剖面的平均 A 层厚度(也称腐殖质层或黑土层)分别为 36.1, 36.5 cm。近期的有 ZHANG 等<sup>[18]</sup>对黑土区海伦市小流域的黑土层厚度进行测定,结果显示小流域黑土层厚度变化于 0—290 cm,平均厚度 80 cm。以上不同文献对黑土层厚度的说法相差较大,原因是多方面的,既有对黑土层定义的

差异造成的,也有调查的区域范围、调查样点的疏密程度或样点所在的地貌部位等差异造成的。除此之外,由于侵蚀和沉积,同一地点、不同年代也可能有所不同;另一方面,已有的黑土层厚度数据多为上世纪的调查结果,且大多尺度较大,较少关注小流域尺度的黑土层厚度问题。

鉴于以上原因,本研究在东北典型黑土区选择典型小流域,基于高密度采样,判断黑土层厚度。主要目的是调查小流域黑土层厚度现状,分析黑土层厚度空间变化及其影响因素,为之后进行长时间序列黑土层厚度动态监测提供基础数据,为小流域黑土退化防治提供理论依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省嫩江市鹤山农场,为北京师范大学九三水土保持试验站所在鹤北流域内的典型小流域(图 1)。地理位置 125° 18′ 51″—125° 21′ 40″ E, 49° 00′ 04″—49° 01′ 51″ N,面积 2.73 km<sup>2</sup>。小流域所属地貌类型为小兴安岭向松嫩平原过渡的漫川漫岗区,海拔 332~391 m,平均海拔 360 m。地面坡度 0~11.5°,平均坡度 2.9°,以 2°~4°坡度面积最大,占 42.4%,<2°面积占 26.8%,4°~6°占 26.4%,>6°占 4.4%。气候为中温带大陆性季风气候,多年平均气温 0.4 °C,多年平均降水量 534 mm<sup>[19]</sup>。土地利用以耕地为主,占流域面积的 68.6%,林地占 19.2%,草地占 12.1%,水域占 0.1%。土壤类型为典型黑土。第四纪地层为中更新统口门子组,为灰白色、灰绿色砾卵石层和砂砾石层<sup>[20]</sup>。

农地作物在 2010 年之前以大豆和小麦轮作为主,之后转换为大豆、玉米轮作。2020 年之前,防护林带以顺坡为主,相应耕作也以顺坡起垄种植为主,之后林带改造为等高林带,相应耕作也改为以横坡起垄。

### 1.2 样点布设与野外采样

以 100 m×100 m 网格覆盖整个小流域,采样点位于网格中心位置,在土地利用和地形突变处增加样

点,最终共计布设 295 个采样点(图 1),其中耕地样点 227 个、草地 23 个和林地 45 个,野外通过手持 GPS 确定采样点位置。采样时间为 2022 年 6—8 月和 2023 年 9—10 月。

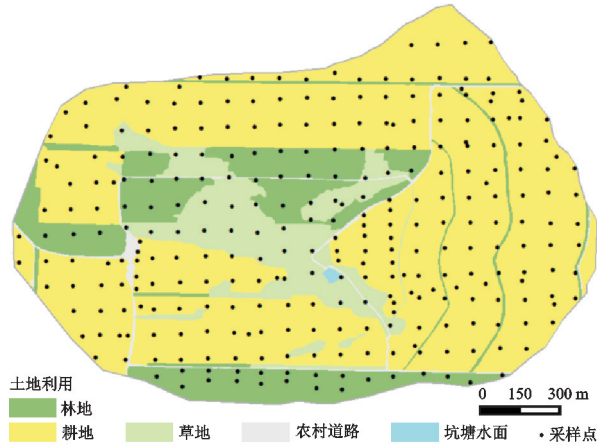


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

利用手动土钻(钻头直径 7 cm,可加延长杆),从表层到母质,以 10 cm 为间隔采集原状土,装于长 100 cm、宽 7 cm、高 4 cm 的有盖铁盒,铁盒内每 10 cm 为 1 格,共 10 个格子(图 2)。为了尽量减少压实,每次土钻取土深度 10 cm,依顺序放入铁盒的格子中,当 10 个格子装满土样后,即为 1 个 100 cm 的原状土土柱。当取土深度超过 100 cm,另取盒子。同时在野外记录样点立地条件,并对土柱进行拍照。



图 2 原状土土柱像片

Fig. 2 Photograph of undisturbed soil column

### 1.3 黑土层厚度判断

在我国大多数文献中,黑土层厚度是以 A 层进行判定的,然而 A 层定义本身即缺少定量指标,这造成黑土层厚度的判定更依赖于野外经验且不同工作者划分的厚度也难免存在差异,因此有必要探索能为实际生产服务的黑土层厚度划分方法。在国际上大家公认的美国土壤系统分类中,黑土为软土(对应我国土壤系统分类的均腐土),而软土最主要的特征是其有暗沃表层,可以说没有暗沃表层,就没有软土。由此,本研究借助暗沃表层的主要判定指标来判定黑土层厚度。这种判定标准存在理论依据,能客观反映黑土资源的质量特征。本次判定黑土层的主要标准为<sup>[21]</sup>:颜色,润态明度 $\leq 3.5$ ,干态明度 $\leq 5.5$ ,彩度 $\leq 3.5$ ;结构,主要呈粒状结构、小角块状和小亚角块状结构,干时不呈大块状或整块状结构,也不硬;砾石含量(包括 2~5 mm 的砾石)的体积小于土壤基质的 50%。当然,作为软土诊断表层的暗沃表层,还有其

他限定条件,比如厚度要求、盐基饱和度和有机质含量等。但本次判定黑土层厚度时没有考虑暗沃表层的厚度要求,因为判断黑土层厚度是本研究的核心内容,无论薄厚,只要所考虑的颜色、结构和砾石含量达到暗沃表层的要求,就算是黑土层;对于暗沃表层有机质含量的要求,本应考虑,然而对每个样点进行剖面有机质含量的测定工作量极大,受限于时间与成本难以进行。但土壤基质的颜色特征,特别是土壤基质的亮度值,能够反映土壤有机质含量的大小。因此,在判断黑土层厚度时,考虑土壤基质的亮度即间接考虑土壤有机质含量。

《中国土种志》<sup>[22]</sup>中黑土(黑土和黑钙土)样点有 70 个,其中在干态条件下判读 A 层颜色的样点有 39 个。该 39 个样点 A 层色调皆为 10YR,干态亮度值 $< 3$ 的样点占 10.3%, $< 4$ 占 41.1%, $< 5$ 占 82.1%, $< 6$ 的占 100%,这说明绝大多数样点 A 层亮度值在 5 以下;39 个样点 A 层彩度值为 0~4,其中 $< 3$ 的样点比例为 94.9%,3~4 样点比例只占 5.1%,这说明绝大多数样点 A 层彩度值在 3 以下。这些结果与本次用于判定黑土层颜色的明度阈值 5.5、彩度阈值 3.5 接近,进一步说明人工判读黑土层厚度时,将暗沃表层颜色阈值作为黑土层判定阈值,不仅有合理的理论依据,在实践上也是可行的。

由于野外土壤水分和光照条件存在差异,对土壤颜色的判读有较大影响,最终黑土层厚度的判定是基于室内风干的原状土土柱进行的,而野外判读的厚度仅作为验证参考。

### 1.4 地形参数与土地利用获取

利用大疆精灵 4 多光谱无人机拍摄了小流域的影像,以此解译出了 5 种土地利用(耕地、林地、草地、坑塘水面和农村道路)。由 Pix4D 提取 DEM(空间分辨率 0.25 m,投影方式 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_51N),影像中耕地处尚未出苗,对于林地等地表植被遮挡区域,将原始点云分为“地形”和“非地形”,去除“非地形”点云后进行后续处理。利用 SAGA 9.0.1、ArcGis Pro 由 DEM 计算出高程(E)、坡度(S)、坡向(A)、平均曲率(Cur)、平面曲率(CPla)、剖面曲率(CPro)、水流强度指数(SPI)和地形湿度指数(TWI)、距沟道水平距离(HDTS)、距岗脊水平距离(HDTR)、地形位置指数(TPI)和地形糙度指数(TRI)共 12 个地形参数。其中曲率(Cur)表征地表弯曲程度,正值说明该像元的表面向上凸出,负值说明该像元的表面朝下凹入;平面曲率(CPla)为垂直于流向方向的曲率,可表征水流汇聚或分散的倾向;剖面曲率(CPro)为沿水流方向的曲率,可表征水流加

速或减缓的倾向;水流强度指数(SPI)和地形湿度指数(TWI)可表征径流集中与蓄积情况,与单位面积汇水量成正比,与坡度分别呈正、反比;地形位置指数(TPI)用于描述某一位置相对于周围地形的相对高低状况,为该点高程值与邻域平均高程之差;地形糙度指数(TRI)用于描述地形起伏状况,为表面积与投影面积的比值,具体计算公式见表 1。

表 1 部分地形参数及其计算公式

地形参数	计算公式
水流强度指数(SPI)	$SCA \times \tan(\text{Slope})$
地形湿度指数(TWI)	$SCA \div \tan(\text{Slope})$
地形位置指数(TPI)	$X_0 - \bar{X}_{ij}$
地形糙度指数(TRI)	$[\sum_0^{ij} (X_{ij} - X_0)^2]^{1/2}$

注:SCA 为单位面积汇水量; $x_0$ 为栅格单元高程; $x_{ij}$ 为 $x_0$ 周围栅格单元高程。

### 1.5 数据处理

研究以样条函数插值绘制黑土层厚度的空间分布,以方差分析、相关分析评估黑土层厚度的影响因素。样条函数插值是通过拟合采样点之间的多项式函数,模拟出采样点之间的最优光滑曲面,可用公式表示为:

$$S(x, y) = T(x, y) + \sum_{i=1}^n \lambda_i R(d_i)$$

式中: $S(x, y)$ 为位置 $x, y$ 处的土壤属性; $T(x, y)$ 为趋势函数,是以 $x, y$ 为自变量的二元线性方程组; $\lambda_i$ 为通过求解线性方程组而获得的系数; $d_i$ 为预测点到 $i$ 点的距离; $R(d_i)$ 为以 $d_i$ 为自变量的方程。由 ArcGis 10.8 完成操作,计算过程中,选择规则样条函数法,权重参数与点数参数为默认值。相关分析能够衡量变量间的相关特征,用于评估地形参数与黑土层厚度的相关性;方差分析能够完成多个样本均值间两两比较,用于评估土地利用、土壤母质对黑土层厚度的影响,由 SPSS 27.0 软件完成操作,相关系数选择 pearson 相关系数。

## 2 结果与分析

### 2.1 黑土层厚度现状

研究小流域 295 个样点的黑土层厚度在 0—160 cm,平均 44.1 cm,中值 37.0 cm。以 10 cm 为间隔进行分级统计,不同厚度级别样点所占比例差别较大,20—30 cm 的样点所占比例最大,为 25.8%,其次为 30—40 cm 的样点,占 20.7%,40—50 cm 的样点占 10.9%(图 3)。0—10,10—20,90—100 cm 厚度区间的样点比例接近,分别为 9.2%,8.5%,7.5%。以黑土层厚度划分标准进行统计,<20 cm 的“破皮黄”样

点占到 17.6%,<30 cm 的薄层黑土样点占 43.4%,中层黑土样点(30—60 cm)占 35.9%,厚层黑土样点(>60 cm)占 20.7%。

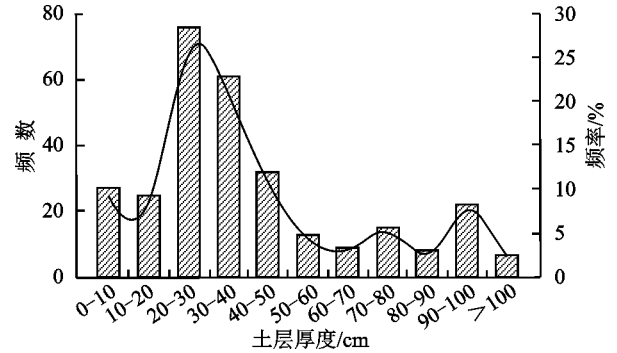


图 3 样点黑土层厚度

Fig. 3 Histogram of black soil thickness of sample points

### 2.2 黑土层厚度空间分布

由图 4 可知,在 295 个样点中,厚层黑土主要分布在小流域的坡底、沟道周围,流域上游分水岭平缓地段也有分布;薄层黑土、破皮黄主要有 3 部分,第 1 部分位于 2 条支流交汇处的上部,此区域坡度较大、地形相对两侧沟道明显凸起,黑土不断向底部迁移,是小流域中黑土最为浅薄的位置,破皮黄广泛出露;第 2 部分位于流域下游切沟的出口附近,原有黑土层已被切沟冲出的砂砾完全掩埋,呈现为表层数十厘米的砂砾;第 3 部分位于流域下游的分水岭,与上游分水岭为平缓的坡顶不同,此区域为较陡峭的山脊,土壤侵蚀强烈,黑土层厚度较浅薄,受翻耕影响,表层呈现为黑土、黄黏土的混杂状态。为进一步说明空间分布情况,进行空间插值(图 5),结果显示小流域以中层黑土为主,占 45.9%,厚层黑土最少,占 25.0%,薄层黑土为 29.1%,其中有将近 1/2 为“破皮黄”。

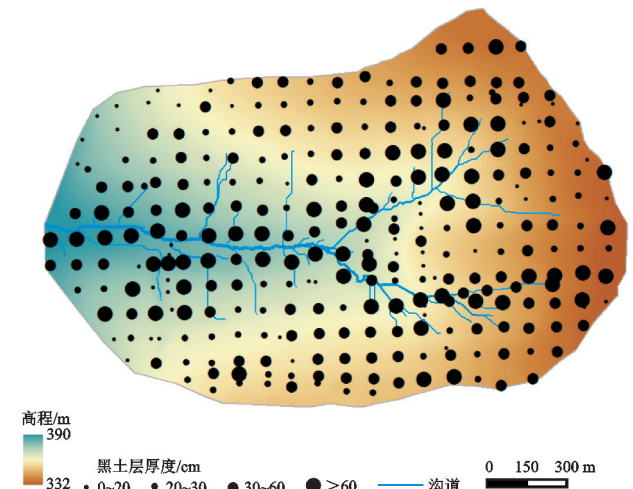


图 4 样点黑土层厚度

Fig. 4 Black soil thickness of sampling points

### 2.3 黑土层厚度影响因素

2.3.1 土地利用 研究小流域土地利用类型主要有耕地、草地和林地,3 种土地利用类型样点的平均黑

土层厚度草地>林地>耕地。其中草地平均黑土层厚度为 60 cm,比耕地厚 19 cm,林地平均黑土层厚度为 51 cm,比耕地厚 10 cm,在方差分析中存在显著的差异( $p<0.05$ )(表 2)。

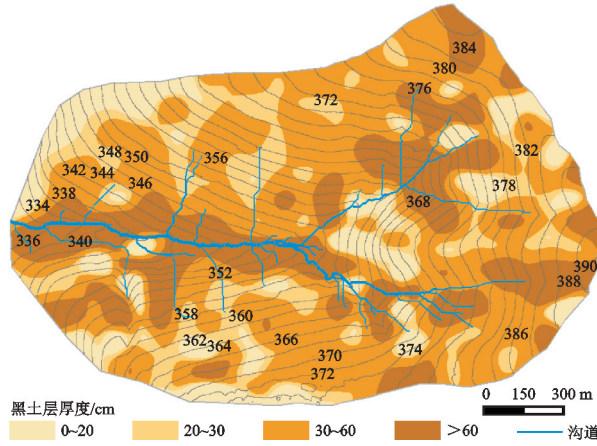


图 5 黑土层厚度空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of black soil thickness

表 2 黑土层厚度与环境参数方差分析

Table 2 The variance analysis of black soil thickness and environmental parameter

方差分析	因素类别	黑土层厚度/cm	F	显著性( $p$ )
土地利用	草地	59.6	5.551	0.004
	耕地	41.2		
	林地	50.6		
土壤母质	黄黏土	42.4	1.364	0.257
	黄土性土	49.6		
	砂砾质土	35.9		

研究小流域已经开垦近 70 年,而且耕地在 2020 年之前以顺坡起垄种植为主,侵蚀速率大于草地和林地,这是耕地黑土层厚度显著小于草地和林地的主要原因。但是,由于本研究小流域林地和草地的分布位置,尤其

是草地主要处于坡底较为平缓部位,不同土地利用黑土层厚度的差异可能也有地貌部位造成的影响。

2.3.2 土壤母质 研究小流域土壤母质主要有黄黏土、黄土性土和砂砾质土 3 种类型。其中砂砾质土母质样点平均黑土层厚度只有 35.9 cm,低于其他母质类型样点黑土层厚度,较黄土性土母质上发育的黑土层平均薄 13.7 cm(表 2)。这可能是由于砂砾质母质上发育的土壤本来就薄,也可能是侵蚀导致砂砾质母质出露,或二者皆有,具体原因需要进一步探索。

黑土层厚度与表土(0—20 cm)砂砾含量呈显著负相关,与粉粒和黏粒含量呈显著正相关,相关系数分别为-0.492,0.525,0.345,这可能是由于土壤侵蚀导致的土壤质地粗化造成的。从侧面说明本研究小流域砂砾质母质黑土层厚度最小,可能与砂砾质母质样点所在部位的土壤侵蚀有关。虽然没有直接证据,但表土砾石比与坡度显示出显著的负相关关系(-0.420),而一般在相同土地利用条件下,坡度与侵蚀速率成正比,这能够间接说明更多的砂砾质母质浅薄样点是受其他如地形因素等的影响,侵蚀速率大,从而引起黑土层厚度下降伴随细颗粒的流失与土壤质地的变化而出现的。

2.3.3 地形特征 相关分析结果(表 3)表明,平均曲率(Cur)、平面曲率(Cpla)、剖面曲率(Cpro)、距沟道距离(HDTS)、距岗脊距离(HDTR)、地形位置指数(TPI)与黑土层厚度(ST)存在极显著相关关系( $p<0.01$ ),其中地形位置指数(TPI)与黑土层厚度(ST)的相关系数最高为 0.35,其他相关系数 $>0.3$ 的参数还有 HDTS、HDTR、Cur,仅水流强度指数(SPI)与 ST 无显著性相关关系( $p>0.05$ )。

表 3 黑土层厚度与地形参数相关系数矩阵

Table 3 The correlation coefficient matrix of black soil thickness and topographic parameters

参数	ST	E	S	Cur	Cpla	Cpro	SPI	TWI	HDTS	HDTR	TPI	TRI
ST	1.00	-0.13*	-0.15*	-0.32**	-0.22**	-0.21**	0.07	0.13*	-0.33**	0.33**	-0.35**	-0.13*
E	-0.13*	1.00	-0.37**	0.11	0.13*	0.25**	-0.08	0.10	0.28**	-0.36**	0.46**	-0.38**
S	-0.15*	-0.37**	1.00	-0.04	-0.34**	0.01	0.50**	0.09	-0.38**	0.32**	-0.34**	0.97**
Cur	-0.32**	0.11	-0.04	1.00	0.56**	0.79**	-0.31**	-0.31**	0.46**	-0.35**	0.62**	-0.11
Cpla	-0.22**	0.13*	-0.34**	0.56**	1.00	0.19**	-0.46**	-0.26**	0.41**	-0.31**	0.39**	-0.34**
Cpro	-0.21**	0.25**	0.01	0.79**	0.19**	1.00	-0.05	-0.05	0.32**	-0.25**	0.56**	-0.06
SPI	0.07	-0.08	0.50**	-0.31**	-0.46**	-0.05	1.00	0.90**	-0.35**	0.28**	-0.25**	0.48**
TWI	0.13*	0.10	0.09	-0.31**	-0.26**	-0.05	0.90**	1.00	-0.21**	0.16**	-0.12*	0.10
HDTS	-0.33**	0.28**	-0.38**	0.46**	0.41**	0.32**	-0.35**	-0.21**	1.00	-0.53**	0.72**	-0.41**
HDTR	0.33**	-0.36**	0.32**	-0.35**	-0.31**	-0.25**	0.28**	0.16**	-0.53**	1.00	-0.69**	0.32**
TPI	-0.35**	0.46**	-0.34**	0.62**	0.39**	0.56**	-0.25**	-0.12*	0.72**	-0.69**	1.00	-0.38**
TRI	-0.13*	-0.38**	0.97**	-0.11	-0.34**	-0.06	0.48**	0.10	-0.41**	0.32**	-0.38**	1.00

注: \* 表示 0.05 显著性水平下相关, \*\* 表示 0.01 显著性水平下相关;ST 为黑土层厚度;E 为高程;S 为坡度;Cur 为平均曲率;Cpla 为平面曲率;Cpro 为剖面曲率;SPI 为水流功率指数;TWI 为地形湿度指数;HDTS 为距沟道距离;HDTR 为距岗脊距离;TPI 为地形位置指数;TRI 为地形粗糙度指数。

进一步对地形参数与黑土层厚度进行分级处理,结果显示随着坡度的增大,破皮黄样点占比逐渐增多,厚层黑土样点占比逐渐减少(图6),在 $0\sim 2^\circ$ 坡度区域破皮黄样点15%,厚层黑土样点26%,而在 $>4^\circ$ 坡度区域破皮黄样点超过70%,无厚层黑土样点;在最高曲率值区域,破皮黄样点35%,厚层黑土样点8%,而在最小曲率值区域,破皮黄样点不足15%,厚层黑土样点超过40%;随着距离沟道距离的变远,破皮黄样点占比逐渐增多,厚层黑土样点占比逐渐减少,在距离沟道 $0\sim 60$  m区域,破皮黄样点14%,厚层黑土样点39%,而在距离沟道 $>230$  m区域,破皮黄样点超过30%,厚层黑土样点仅5%;在地形位置指数为负区域,厚层黑土样点40%,薄层黑土样点29%,而在地形位置指数正区域,厚层黑土样点不足10%,薄层黑土样点超过50%。

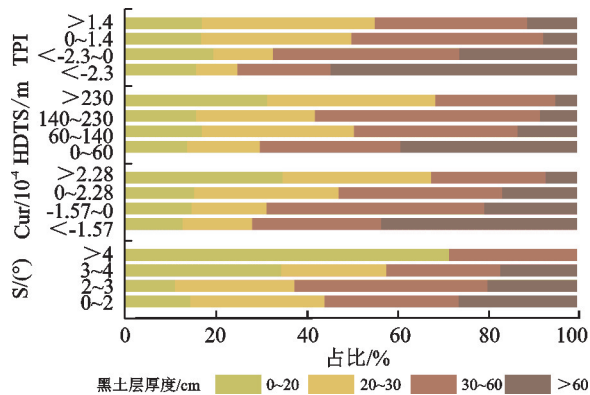


图6 样点黑土层厚度与地形参数累计分布

Fig. 6 Accumulative distribution of black soil thickness and topographic variables

### 3 讨论

由于土壤侵蚀,开垦之后坡面黑土层厚度逐渐变薄,基本是大家公认的事实<sup>[23]</sup>。但是,由于不同时间、不同研究之间样点所在地貌部位、布点密度、黑土层厚度判定标准等的不同,目前很难定量地进行黑土层厚度的时空变化对比。因此,采用可比的布点、采样和黑土层厚度判定方法,对实现黑土层厚度动态监测十分必要。本研究以暗沃表层为判定黑土层厚度的依据,是定量评价黑土层厚度的一种有意义尝试。

李骞等<sup>[24]</sup>于10年前对本研究小流域所在28 km<sup>2</sup>鹤北流域的122个样点进行了测定,结果显示平均黑土层厚度37 cm。相较本次调查44 cm的结果,浅薄了7 cm,原因应当是李骞等<sup>[24]</sup>的调查集中于耕地地块,并未涉及黑土层厚度更为深厚的林、草地。刘凯等<sup>[8]</sup>测定了东北黑土区61个样点,黑土层厚度5—105 cm,平均31.3 cm,其中黑龙江省29个样点平均黑土层厚度33.38 cm,也明显低于本研究小流域

平均黑土层厚度,但以10 cm为间隔进行的统计十分类似,也是以20—30 cm样点比例最大,30—40 cm样点比例次之。ZHANG等<sup>[18]</sup>对海伦市面积为1.39 km<sup>2</sup>的小流域中144个样点的测定结果显示,平均黑土层厚度为80 cm,其中耕地77 cm,林地109 cm,黑土层厚度显著大于本研究小流域平均黑土层厚度。原因可能是海伦处于典型黑土区的核心区域,地形较为平缓。刘畅等<sup>[25]</sup>在哈尔滨市宾县的3个坡面测得的平均黑土层厚度为28.03 cm。这些研究都表明,不同研究的黑土层厚度受各种因素影响,在空间上有较大变异性。因此,为了便于黑土层厚度的动态监测,有必要在同一地点进行长时间序列的黑土层厚度调查。

在小流域内部,黑土层厚度差异明显,这一方面是自然成土过程的结果,另一方面也受到土壤侵蚀—沉积的影响<sup>[26]</sup>。调查小流域总体呈现出上游浅薄、下游深厚,高峻陡峭处浅薄、低洼和缓处深厚的格局。ZHANG等<sup>[18]</sup>对海伦市黑土层厚度空间分布的研究也得到类似的结果,这种格局与杨维鸽等<sup>[27]</sup>发现的小流域土壤侵蚀—沉积的分布模式基本一致,间接说明土壤侵蚀作用对黑土层厚度的影响。从土壤侵蚀角度也能够合理地阐明前文各因素与黑土层厚度的相关关系,如随着坡度(S)的增大,土壤侵蚀的动力增强,土壤流失加剧,黑土层变薄。在调查小流域各坡面中,坡底基本为深厚的黑土区,而坡中、坡上由于坡度的差异有不同的空间分布格局,如上游坡度平缓坡上黑土层较深厚,下游坡度陡峭坡上则呈现为大片的“破皮黄”。许文旭等<sup>[28]</sup>调查发现,在坡度 $6^\circ$ (相接近于本次调查小流域下游陡坡坡度)时,坡上为整个坡面黑土层厚度最浅薄的位置,这一分布格局与本研究中坡面黑土层厚度变化规律是一致的;另一方面,黑土层厚度在坡面的空间分布也受到坡型的影响;刘畅等<sup>[25]</sup>研究发现,相较凸型坡,凹型坡在坡底有着更深厚的黑土层。在主要趋势之外,坡面上黑土层厚度存在厚、薄交替出现的现象,这可能与坡面不同侵蚀强度相互交替分布有关,是土壤侵蚀速率沿坡面存在周期性变化规律的体现。

一般情况下,黑土层厚度越薄,土壤理化性质就越差<sup>[28]</sup>,土壤生产力就越弱<sup>[24]</sup>。王志强等<sup>[29]</sup>、刘慧等<sup>[30]</sup>的研究已证明,随着侵蚀深度的增加,土地生产力不断下降,虽然浅薄的黑土层有可能是成土过程带来的,但就黑土区广泛存在的坡耕地而言,土壤侵蚀是黑土层厚度变化的重要因素<sup>[23]</sup>。李骞等<sup>[24]</sup>关于黑土层厚度与作物产量的研究发现,黑土厚度存在40—50 cm的阈值,低于此阈值,作物产量迅速下降。

冯志珍<sup>[31]</sup>研究发现,玉米产量随着黑土层厚度的减少而减少,认为 20 cm 厚的黑土表土层是维持玉米产量的最低厚度。在本研究中,小流域黑土层厚度 < 10 cm 的面积超过 10%(表 4),依据冯志珍<sup>[31]</sup>的研究结论,这些区域的黑土层已无法维持粮食的正常生产,直接经济损失已无法避免。低于 50 cm 的面积已达到 3/2,可以预想若未来黑土层厚度继续下降,这些区域的作物产量将迅速降低,说明对研究小流域而言,黑土保护正处于一个关键时刻,相应的水土保持措施已势在必行。

表 4 小流域黑土层厚度分级面积比例

Table 4 Proportion of black soil layer thickness at all levels

黑土层厚度/cm	占比/%	黑土层厚度/cm	占比/%
0—10	6.4	60—70	5.7
10—20	5.6	70—80	4.9
20—30	17.1	80—90	5.1
30—40	23.2	90—100	3.9
40—50	13.9	>100	5.5
50—60	8.7		

## 4 结论

(1)研究小流域黑土层厚度 0—160 cm,平均黑土层厚度 44.1 cm,其中 20—30 cm 的样点最多,占 25.8%,<20 cm 的“破皮黄”样点占 17.6%,<30 cm 的薄层黑土样点占 43.4%,中层黑土样点(30—60 cm)占 35.93%,厚层黑土样点(>60 cm)占 20.68%。

(2)小流域黑土层总体呈现出上游浅薄、下游深厚,高峻陡峭处浅薄、低洼和缓处深厚,坡底深厚、坡中浅薄的格局。

(3)影响黑土层厚度的因素主要有土地利用、土壤母质和地形特征。耕地黑土层厚度显著小于草地和林地,砂砾质母质上发育的黑土层厚度小于黄土性母质和黏土母质上发育的。在地形因子中,地形位置指数、距离沟道距离、曲率、坡度对黑土层厚度的影响较大。

### 参考文献:

[1] 易晨,李德成,张甘霖,等.土壤厚度的划分标准与案例研究[J].土壤学报,2015,52(1):220-227.  
YI C, LI D C, ZHANG G L, et al. Criteria for partition of soil thickness and case studies[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(1): 220-227.

[2] 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.  
Chinese Soil Taxonomy Research Group, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Cooperative Research Group on Chinese Soil Taxonomy. Keys to

Chinese soil taxonomy[M]. 3rd Edition. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001.

- [3] HEIMSATH A M, DIETRICH W E, NISHIIZUMI K, et al. The soil production function and landscape equilibrium[J]. Nature, 1997, 388: 358-361.
- [4] 陈佳,史志华,李璐,等.小流域土层厚度对土壤水分时空格局的影响[J].应用生态学报,2009,20(7):1565-1570.  
CHEN J, SHI Z H, LI L, et al. Effects of soil thickness on spatiotemporal pattern of soil moisture in catchment level [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(7): 1565-1570.
- [5] 刘宝元,阎百兴,沈波,等.东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1):1-8.  
LIU B Y, YAN B X, SHEN B, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for cultivated land in the Northeastern black soil area of China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(1): 1-8.
- [6] 张兴义,刘晓冰.东北黑土区沟道侵蚀现状及其防治对策[J].农业工程学报,2021,37(3):320-326.  
ZHANG X Y, LIU X B. Current scenario of gully erosion and its control strategy in Mollisols areas of Northeast China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(3): 320-326.
- [7] 张晓平,梁爱珍,申艳,等.东北黑土水土流失特点[J].地理科学,2006,26(6):687-692.  
ZHANG X P, LIANG A Z, SHEN Y, et al. Erosion characteristics of black soils in Northeast China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(6): 687-692.
- [8] 刘凯,魏明辉,戴慧敏,等.东北黑土区黑土层厚度的时空变化[J].地质与资源,2022,31(3):434-442,394.  
LIU K, WEI M H, DAI H M, et al. Spatiotemporal variation of black soil layer thickness in black soil region of Northeast China [J]. Geology and Resources, 2022, 31(3): 434-442, 394.
- [9] PENDLETON R L, CHANG L C, CHEN W et al. A reconnaissance soil survey of the Harbin region [J]. Soils Bulletin, 1935, 11: 42-106.
- [10] 朱显谟.黑龙江东部主要土壤的性质及其分布[J].土壤学报,1952(1):1-6.  
ZHU X M. Properties and distribution of main soils in eastern Heilongjiang Province [J]. Acta Pedologica Sinica, 1952(1): 1-6.
- [11] 中华地理志编辑部.东北区自然地理资料[M].北京:科学出版社,1957.  
Editorial Department of Chinese Geography. Natural geographical data of Northeast China [M]. Beijing: Science Press, 1957.

- [12] 中国科学院黑龙江流域综合考察队.黑龙江流域及其毗邻地区自然条件[M].北京:科学出版社,1961.  
Heilongjiang River Basin Comprehensive Expedition Team, Chinese Academy of Sciences. Study on the natural conditions of Heilongjiang River Basin and its adjacent areas[M].Beijing: Science Press,1961.
- [13] 宋达泉,程伯容,曾昭顺.东北及内蒙东部土壤区划[J].土壤通报,1958(4):1-9.  
SONG D Q, CHENG B R, ZENG Z S. Soil regionalization in Northeast China and east inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1958(4):1-9.
- [14] 中国科学院林业土壤研究所.中国东北土壤[M].北京:科学出版社,1980.  
Institute of Forestry Soil, Chinese Academy of Sciences. Soil of Northeast China[M].Beijing: Science Press,1980.
- [15] 熊毅,李庆逵.中国土壤[M].2版.北京:科学出版社,1987.  
XIONG Y, LI Q K. Soil of China[M].2nd Edition. Beijing: Science Press,1987.
- [16] 田永圻.黑龙江省土壤地理[M].哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1990.  
TIAN Y Q. Soil geography of Heilongjiang Province [M]. Haerbin: Heilongjiang Science and Technology Press,1990.
- [17] 中国科学院南京土壤研究所黑龙江队.黑龙江省与内蒙古自治区东北部土壤资源[M].北京:科学出版社,1982.  
Heilongjiang Team, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil resources in Heilongjiang Province and the Northeast of Inner Mongolia Autonomous Region[M].Beijing: Science Press,1982.
- [18] 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.
- [19] 杨鑫,刘刚,谢云,等.东北黑土区北部典型小流域融雪径流及发生条件分析[J].中国水土保持科学,2019,17 (4):34-40.  
YANG X, LIU G, XIE Y, et al. Analysis of snowmelt runoff and its formation condition in typical small watersheds in the northern black soil region of Northeast China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17 (4):34-40.
- [20] 黑龙江省地矿局第一水文地质工程地质大队.黑龙江省第四纪地质及环境[M].北京:海洋出版社,1988.  
The First Hydrogeological Engineering Geology Brigade of Heilongjiang Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. Quaternary geology and environment of Heilongjiang province[M].Beijing:China Ocean Press,1988.
- [21] Soil Science Division Staff. United States Department of Agriculture Handbook No. 18; Soil Survey Manual[Z].2017.
- [22] 全国土壤普查办公室.中国土种志(第6卷)[M].北京:中国农业出版社,1994.  
National Soil Survey Office. Chinese Soil Genus Records (Vol.6) [M].Beijing: Chinese Agricultural Press,1994.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 刘畅,刘勤,张琼,等.利用探地雷达测定东北黑土层厚度在坡面的空间变化[J].土壤学报,2024,3(28):1-15.  
LIU C, LIU Q, ZHANG Q, et al. Spatial variation of black soil thickness on slope measured by using ground penetrating radar in Northeast China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 3(28):1-15.
- [26] FENG Z Z, ZHENG F L, HU W, et al. Impacts of mollic epipedon thickness and overloaded sediment deposition on corn yield in the Chinese Mollisol region[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2018, 257: 175-182.
- [27] 杨维鸽,张红侠.典型黑土区小流域土壤侵蚀的地貌分布特征[J].江西农业学报,2017,29(12):32-37.  
YANG W G, ZHANG H X. Landform distribution features of soil erosion in a small watershed of typical black soil region[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2017, 29(12): 32-37.
- [28] 许文旭,杨献坤,崔斌,等.东北黑土区典型坡耕地土层厚度及退化程度分析[J].中国水土保持科学(中英文), 2021,19(3):28-36.  
XU W X, YANG X K, CUI B, et al. Analysis of the soil thickness and the degradation degree of the typical slope farmland in the black soil region of Northeast China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19 (3):28-36.

(下转第361页)



- WANG J D, QI B J, ZHANG Y C, et al. Effects of long-term fertilization on pH buffer system of sandy loam calcareous fluvior-aquic soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(4): 1031-1036.
- [26] LI R C, GAO Y X, CHEN Q, et al. Blended controlled-release nitrogen fertilizer with straw returning improved soil nitrogen availability, soil microbial community, and root morphology of wheat[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 212: e105045.
- [27] GAO Y X, SONG X, ZHENG W K, et al. The controlled-release nitrogen fertilizer driving the symbiosis of microbial communities to improve wheat productivity and soil fertility[J]. Field Crops Research, 2022, 289: e108712.
- [28] ZHENG W K, LIU Z G, ZHANG M, et al. Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system[J]. Field Crops Research, 2017, 205: 106-115.
- [29] QI D L, ZHU J Q, WANG X G. Nitrogen loss via runoff and leaching from paddy fields with the proportion of controlled-release urea and conventional urea rates under alternate wetting and drying irrigation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(22): 61741-61752.
- [30] ZHAO C H, TIAN H Y, ZHANG Q, et al. Preparation of urea-containing starch-castor oil superabsorbent polyurethane coated urea and investigation of controlled nitrogen release[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 253: e117240.
- [31] 高永祥, 李若尘, 张民, 等. 秸秆还田配施控释掺混尿素对玉米产量和土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1507-1519.
- GAO Y X, LI R C, ZHANG M, et al. Effects of straw returning combined with application of mixture of controlled-release urea and common urea on maize yield and soil fertility[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6): 1507-1519.
- [32] RAZA S, MIAO N, WANG P Z, et al. Dramatic loss of inorganic carbon by nitrogen-induced soil acidification in Chinese croplands[J]. Global Change Biology, 2020, 26(6): 3738-3751.
- [33] GAO F, LI Z L, GAO Y X, et al. The effect of long-term controlled-release urea application on the relative abundances of plant growth-promoting microorganisms[J]. European Journal of Agronomy, 2023, 151: e126971.
- (上接第 353 页)
- [29] 王志强, 刘宝元, 王旭艳, 等. 东北黑土区土壤侵蚀对土地生产力影响试验研究[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2009, 39(10): 1397-1412.
- WANG Z Q, LIU B Y, WANG X Y, et al. Erosion effect on the productivity of black soil in Northeast China[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2009, 39(10): 1397-1412.
- [30] 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.
- [31] 冯志珍. 东北薄层黑土区土壤侵蚀—沉积对土壤性质和玉米产量的影响研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- FENG Z Z. Impacts of soil erosion and deposition on soil properties and corn yield in the thin layer black soil region[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2018.