

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.042.

张琛, 赫有有, 薛婷婷, 等. 松嫩平原北部未开垦黑土土壤物理性状垂直变化特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 231-240.

Zhang Chen, He Youyou, Xue Tingting, et al. Vertical Variation of Physical Properties of Uncultivated Black Soil in Northern Songnen Plain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 231-240.

松嫩平原北部未开垦黑土土壤物理性状垂直变化特征

张琛, 赫有有, 薛婷婷, 陈祥伟, 付玉

(东北林业大学 林学院, 哈尔滨 150040)

摘要: [目的]探究松嫩平原北部未开垦黑土土壤物理性状特征,为黑土区退化土地恢复以及土壤质量评价提供重要的本底值参考。[方法]以未开垦黑土(天然次生林、五花草塘)为研究对象,测定0—140 cm土层范围土壤物理指标,运用主成分分析和聚类分析的方法,对土壤物理性状进行综合评价。[结果]未开垦黑土土壤容重随土层深度的增加逐渐增大,总孔隙度、毛管孔隙度、饱和持水量和毛管持水量则随土层深度的增加逐渐降低,且在0—60 cm土层范围内,天然次生林拥有更小的土壤容重以及更大的孔隙度和持水量;土壤质地,在0—100 cm土层范围内为黏壤土,≥100 cm土层为粉质黏壤土;未开垦黑土水稳性团聚体含量、平均重量直径和几何平均直径均随土层深度增加呈先降低后增加趋势;整体上五花草塘0—10 cm土层土壤水稳性团聚体含量($WSA_{>0.25}$)、平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)分别比天然次生林高出37.14%、87.96%和110.52%,但在10—80 cm土层范围内天然次生林表现较高;天然次生林与五花草塘土壤团聚体分形维数(D)整体上差异不明显;通过主成分分析与聚类分析发现,未开垦黑土不同土层土壤物理性状综合表现存在明显差异,整体在0—10 cm土层内表现最优,且在0—40 cm土层范围内天然次生林土壤物理性状相对于五花草塘表现更优秀。[结论]松嫩平原北部未开垦黑土表层土壤物理性状明显优于深层土壤,且天然次生林与五花草塘土壤物理性状差异较大,天然次生林对于浅土层土壤物理性状拥有更好的改善效果。

关键词: 未开垦黑土; 本底特征; 垂直变化; 土壤物理性状

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0231-10

Vertical Variation of Physical Properties of Uncultivated Black Soil in Northern Songnen Plain

Zhang Chen, He Youyou, Xue Tingting, Chen Xiangwei, Fu Yu

(College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the physical properties of uncultivated black soil in the northern Songnen Plain, provide important background values for the restoration of degraded land and soil quality assessment in the black soil area. [Methods] The uncultivated black soil in the north of Songnen Plain, including natural secondary forest and tessellated meadow, was selected as the research object. Soil physical indexes were measured in the 0—140 cm soil layer, and the soil physical properties were comprehensively evaluated by using principal component analysis and cluster analysis. [Results] The soil bulk density of the uncultivated black soil increased gradually with the increase of soil depth, while the total porosity, capillary porosity, saturated water capacity, and capillary water capacity decreased gradually with the increase of soil depth. In the 0—60 cm soil layer, the natural secondary forest had smaller soil bulk density and larger soil porosity and water capacity. The soil texture was clay loam in the 0—100 cm soil layer, and silty clay loam in the ≥100 cm soil layer. The water-stable aggregate content, mean weight diameter, and geometric mean diameter of uncultivated black soil all decreased first and then increased with the increase of

收稿日期: 2022-10-21

修回日期: 2022-11-02

资助项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2021YFD1500705); 黑龙江省自然科学基金资助项目优秀青年项目(JJ2022YX0058)

第一作者: 张琛(1996—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持研究、退化生态系统恢复。E-mail: zhangchen10102022@163.com

通信作者: 付玉(1991—), 女, 辽宁铁岭人, 副教授, 硕士生导师, 主要研究土壤侵蚀机理、水土流失防控等领域。E-mail: aily_fy@163.com

<http://stbcyj.paperonice.org>

soil depth. Overall, the soil water-stable aggregate content ($WSA_{>0.25}$), mean weight diameter (MWD), and geometric mean diameter (GMD) in the 0—10 cm soil layer of the tessellated meadow were 37.14%, 87.96%, and 110.52% higher than those of natural secondary forest, respectively, but the natural secondary forest showed better performance in the 10—80 cm soil layer. The fractal dimension (D) of soil aggregates was not significantly different between natural secondary forest and tessellated meadow. The results of principal component analysis and cluster analysis showed that there were significant differences in the comprehensive performance of soil physical properties in different soil layers of uncultivated black soil, with the overall performance being the best in the 0—10 cm soil layer, and the soil physical properties of natural secondary forest in the 0—40 cm soil layer being better than those of tessellated meadow. [Conclusion] The surface soil physical properties of uncultivated black soil in the northern Songnen Plain were better than the deep soil, and the natural secondary forest and tessellated meadow soil physical properties were significantly different. The natural secondary forest showed a better improvement effect on soil physical properties in the shallow soil layer.

Keywords: uncultivated black soil; background characteristics; vertical variation; soil physical properties

土壤作为一种有限的资源,是以人类健康为中心的整体健康系统中的一个重要组成部分,同时也是农业生产的基石^[1],因此拥有良好的土壤质量是人类社会发展的关键^[2]。土壤质量被定义为土壤在生态系统中维持环境质量、促进动植物生产和健康、保持或提高水和空气质量的能力^[3-4],通常包括土壤物理质量、化学质量及生物质量^[5]。土壤物理性状是土壤质量的重要基础,同时影响着化学质量和生物质量^[6],其不仅可以作为土壤结构以及水分特征等物理性状的定量化表征,而且是影响土壤侵蚀和土壤管理的重要因素^[5,7]。

松嫩平原位于世界三大黑土区之一的中国东北地区,农业土壤资源特色鲜明,土壤有机质含量高,结构良好,具有独特的自然属性^[8],一直以来都是国内外学者关注和研究的热点。但由于严重的土壤侵蚀导致黑土层厚度逐渐下降^[9],不合理的开垦以及长期强烈的机械化耕作导致黑土区土壤有效储水量减少,同时引起土壤容重增大、孔隙度降低以及团聚体稳定性下降等物理性状的恶化^[10]。研究指出,开垦初期到现在,黑土土壤容重增加 59.49%,总孔隙度下降 22.68%,水稳性团聚体降低 38.28%^[11],土壤物理性状退化严重。因此为遏制黑土退化以及保证黑土区农业的可持续发展,围绕黑土区如何改善土壤物理性状展开了大量研究。有学者以农田为对照,对比分析了人工落叶松林地、自然恢复草地和裸地对剖面土壤容重、孔隙度、持水量、土壤颗粒组成、 >0.25 mm 团聚体含量等物理指标的改善作用^[12];研究发现免耕与翻耕对不同坡位土壤水稳性团聚体粒径分布、团聚体稳定性、土壤容重、土壤孔隙度和土壤贯入阻力存在不同的改善效果^[13];也有研究指出保护性耕作是改良典型黑土区旱作平地的土壤容重、孔隙度、水分状况以及水稳性团聚体含量的重要措施^[14];此外,邱琛^[15]发现不同有机物料还

田措施对土壤容重、饱和导水率、田间持水量以及土壤孔隙度存在不同的改善效果。由此可知,目前研究主要集中在探讨不同土地利用方式、耕作措施以及施肥管理对土壤物理性质的影响,很少涉及未开垦黑土土壤物理性状的表现特征,并且多以自然恢复地或受不同程度干扰的休闲地作为对照^[12,16],不能客观准确地反映原始黑土的土壤物理特征,因此无法准确量化土壤质量改良可达到的水平和程度。

综上所述,本研究选取松嫩平原北部未开垦黑土(天然次生林、五花草塘)为研究对象,通过测定 0—140 cm 土层范围土壤物理性状(土壤容重、孔隙度、持水量、土壤机械组成、水稳性团聚体含量及其稳定性),明确未开垦黑土土壤物理性状的垂直变化特征,以为黑土区退化土地恢复效果评价及土壤质量研究提供本底值的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于松嫩平原北部,小兴安岭西麓,北安市西部($47^{\circ}54'—48^{\circ}12'N$, $126^{\circ}26'—127^{\circ}6'E$),属典型黑土区,该区现存面积较大的未开垦黑土^[17-18],土壤类型以黏化湿润均腐土(Luvic Phaeozems)为主,松嫩平原过渡波状平原区,地势是西南高,东北低,海拔 240~330 m,地处中高纬度,属寒温带季风气候,年平均气温一般 $0.5^{\circ}C$,无霜期 120 d 左右,年降雨量 570 mm,年平均日照 2 700 h 以上;本研究在松嫩平原北部选取未破坏的天然次生林与保持黑土原始自然景观的草原化草甸(五花草塘)^[18]为研究对象,经实地考察后采样点远离城镇、农田、工厂等人类活动影响强烈的地区。其中天然次生林主要树种为山杨(*Populus davidiana*),林下植被主要为毛榛子

(*Corylus mandshurica*)、山丁子(*Malus baccata*)、蚊子草(*Filipendula palmata*)、毛蕊老鹳草(*Geranium platyanthum* Duthie)、突节老鹳草(*Geranium krameri*)、三棱草(*Bolboschoenus maritimus*)、凤毛菊(*Saussurea japonica*)等,黑土层厚度为40~50 cm;五花草塘为杂类草草甸,种类多而无明显优势种,主要包括小叶樟(*Deyeuxia langsdorffii*)、落豆秧(*Vicia cracca*)、地榆(*Sanguisorba officinalis*)等,黑土层厚度为50~60 cm。

1.2 样品采集

试验于2021年6月进行野外采样,在选定的天然次生林和五花草塘内各设置3块临时样地(长20 m×宽20 m),每块标准地内分别按照“S”型5点取样法采集0—10, 10—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100, 100—120, 120—140 cm分为8个土层,每个土层用环刀(体积100 cm³)分别采集原状土样品,用于测定土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、饱和持水量以及毛管持水量;用自制取样器(长10 cm×宽10 cm×高10 cm),分层取原状土用于土壤水稳性团聚体含量测定;另取散土1 kg,将3个采样点同一土层的土样进行混合,带回室内用于土壤有机质含量的测试。

1.3 指标测定及方法

采用环刀法测定土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、饱和持水量与毛管持水量;采用吸管法测定土壤机械组成,参照美国制标准,按照粒径(d)将土壤颗粒分成3类:砂粒($0.05\text{ mm} \leq d < 2\text{ mm}$)、粉粒($0.002\text{ mm} \leq d < 0.05\text{ mm}$)和黏粒($d < 0.002\text{ mm}$);采用浓硫酸重铬酸钾氧化外加加热法测定土壤有机质。

粒径 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体含量为水稳性团聚体含量($\text{WSA}_{>0.25}$),计算公式如下:

$$\text{WSA}_{>0.25} = \frac{M_{0.25}}{M_i}$$

式中: $\text{WSA}_{>0.25}$ 为 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量(%); M_i 为 i 粒级水稳性团聚体质量(g); $M_{0.25}$ 为 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体总质量(g)。

平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)用来表征土壤团聚体稳定性,计算公式如下:

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n W_i X_i$$

$$\text{GMD} = \exp\left[\frac{\sum_{i=1}^n (W_i \ln X_i)}{\sum_{i=1}^n W_i}\right]$$

式中: W_i 为第 i 粒级团聚体质量百分数(%); X_i 表示相邻两级团聚体的平均粒径(mm); $\ln X_i$ 为土壤粒级平均直径的自然对数。

土壤团聚体分形维数(D)用杨培岭等^[19]提出的土壤分形模型计算:

$$(3-D)\lg((\bar{x}_l/x_{\max}) = \lg[M(r<\bar{x}_l)M_T]$$

式中: $M(r<\bar{x}_l)$ 为小于某一粒径的土壤团聚体质量(g); M_T 为团聚体总质量(g); \bar{x}_l 为土壤团聚体各粒径的平均直径(mm); x_{\max} 为最大团聚体粒径的平均直径(mm)。可根据拟合线性回归方程得到分形维数 D 。

1.4 数据处理

用SPSS 25.0软件对数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)进行显著性分析($p < 0.05$)。运用主成分分析对土壤物理性状进行得分排序,采用聚类分析法对不同土层土壤物理性状综合特征进行聚类,并用Origin 2022b进行绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤容重和孔隙度的垂直变化特征

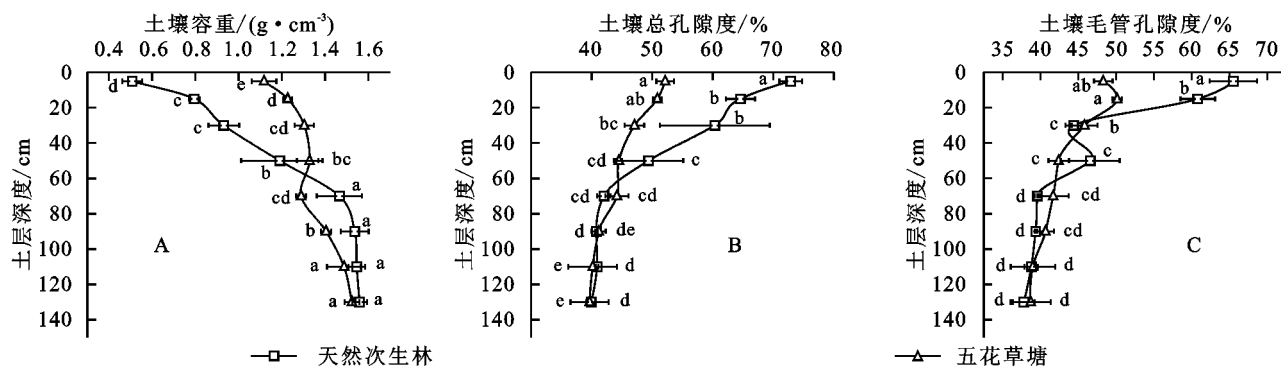
未开垦黑土土壤容重垂直变化特征见图1A。整体上,天然次生林与五花草塘的土壤容重均随土层深度的加深逐渐增大。天然次生林土壤容重变化范围为0.51~1.56 g/cm³;0—80 cm土层范围内,土壤容重随土层深度的增加显著增大188.23%($p < 0.05$);而80—140 cm土层范围内,土壤容重随土层深度的增加差异不显著($p > 0.05$)。五花草塘土壤容重变化范围为1.12~1.52 g/cm³,其中土壤容重在0—40 cm土层范围内随土层深度的增加显著增大16.07%($p < 0.05$),而40—80 cm土层范围内土壤容重没有显著差异($p > 0.05$),但土壤容重在80—140 cm土层范围内显著增大17.83%($p < 0.05$)。

未开垦黑土土壤总孔隙度垂直变化特征见图1B。天然次生林与五花草塘土壤总孔隙度随土层深度的增加逐渐减小。天然次生林土壤总孔隙度变化范围为39.87%~72.86%;0—80 cm土层范围内,土壤总孔隙度随土层深度的增加显著降低($p < 0.05$),降低幅度高达42.36%;而80 cm土层以下总孔隙度没有显著变化($p > 0.05$)。五花草塘土壤的总孔隙度变化范围为39.65%~52.12%,其中总孔隙度在0—80 cm土层范围内随土层深度的增加显著降低15.29%($p < 0.05$);而100 cm土层以下总孔隙度差异不显著($p > 0.05$)。

未开垦黑土土壤毛管孔隙度垂直变化特征见图1C。天然次生林与五花草塘土壤毛管孔隙度随土层深度的增加逐渐减小。天然次生林土壤毛管孔隙度变化范围为37.80%~65.49%;其中土壤毛管孔隙度在0—80 cm土层范围内随土层深度的增加显著降低39.53%($p < 0.05$);而80 cm土层以下的天然次生林土壤毛管孔隙度差异不显著($p > 0.05$)。五花草塘土

壤毛管孔隙度变化范围为 38.72%~50.14%，其中 0—20 cm 土层范围内土壤毛管孔隙度差异不显著 ($p>0.05$)；而 20—80 cm 土层范围内土壤毛管孔隙度随土层深度的增加显著降低 16.89% ($p<0.05$)；80 cm 土层以下土壤毛管孔隙度变化不显著 ($p>0.05$)。

整体上看，与五花草塘相比，天然次生林在 0—60 cm 土层范围内土壤容重较小，土壤总孔隙度和毛管孔隙度较高；而 60 cm 土层以下，天然次生林与五花草塘的土壤容重、土壤总孔隙度和毛管孔隙度不存在明显差异。



注：小写字母不同表示不同土层间差异显著 ($p<0.05$)，下同。

图1 土壤容重与孔隙度垂直变化特征

Fig. 1 Vertical variation characteristics of soil bulk density and porosity

2.2 土壤持水量的垂直变化特征

通过研究饱和持水量和毛管持水量，分析未开垦黑土土壤水分贮量及有效性的垂直变化特征。未开垦黑土土壤持水量垂直变化特征见图2。研究发现天然次生林与五花草塘土壤饱和持水量与毛管持水量随土层深度的增加呈幂函数关系下降。其中天然次生林饱和持水量垂直变化范围为 25.91%~139.90%，在 0—60 cm 土层范围内随土层深度的增加显著降低 72.57% ($p<0.05$)；而 60—140 cm 土层范围内差异不显著 ($p>0.05$)。五花草塘土壤饱和持水量变化范围为 26.01%~47.45%，且在 0—40 cm 土层范围内随土层深度的增加显著降低 23.79% ($p<0.05$)；而 40—80 cm 土层范围内无显著变化，但饱和持水量在

80—100 cm 土层范围内显著下降 15.78% ($p<0.05$)，100 cm 土层以下无显著变化 ($p>0.05$)。

天然次生林土壤的毛管持水量变化范围为 24.58%~124.55%，其中在 0—80 cm 土层范围内随土层深度的增加显著下降 78.51% ($p<0.05$)，80—140 cm 土层范围内毛管持水量差异不显著 ($p>0.05$)。五花草塘土壤的毛管持水量变化范围为 25.40%~43.92%，其中毛管持水量在 0—60 cm 土层范围内随土层深度的增加显著下降 27.25% ($p<0.05$)；而 60—80 cm 土层的毛管持水量相对于 40—60 cm 土层无显著差异，但比 80—100 cm 土层显著高出 11.60% ($p<0.05$)；毛管持水量在 100 cm 土层以下无显著差异 ($p>0.05$)。

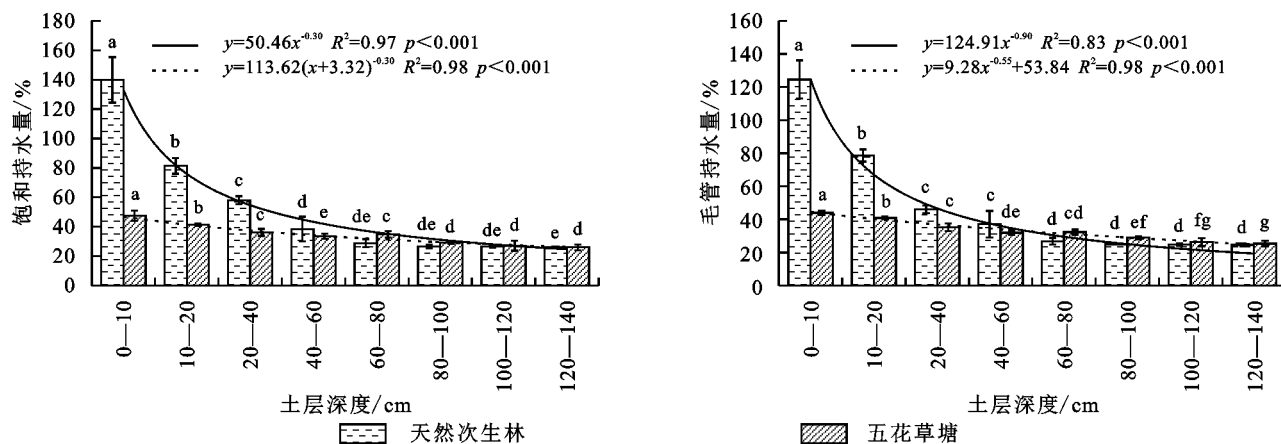


图2 土壤持水量垂直变化特征

Fig. 2 Vertical variation characteristics of soil water holding capacity

2.3 土壤机械组成垂直变化特征

未开垦黑土土壤机械组成垂直变化特征见图3。天然次生林砂粒含量范围为 3.86%~42.22%，整体

表现为随土层深度的增加先增加后降低的趋势，其中 40—60 cm 土层的砂粒含量是 0—10 cm 土层的 2.34 倍；但 60—140 cm 土层范围内砂粒含量明显下降，降低

幅度高达 87.56%。粉粒含量范围为 26.37%~70.66%，整体上随土层深度的增加先降低后增加，粉粒含量在 0—40 cm 土层范围内下降 53.16%，但 40—140 cm 土层范围内粉粒含量明显增加，其中 120—140 cm 土层的粉粒含量是 40—60 cm 土层的 2.47 倍。黏粒含量变化范围为 25.47%~39.92%。

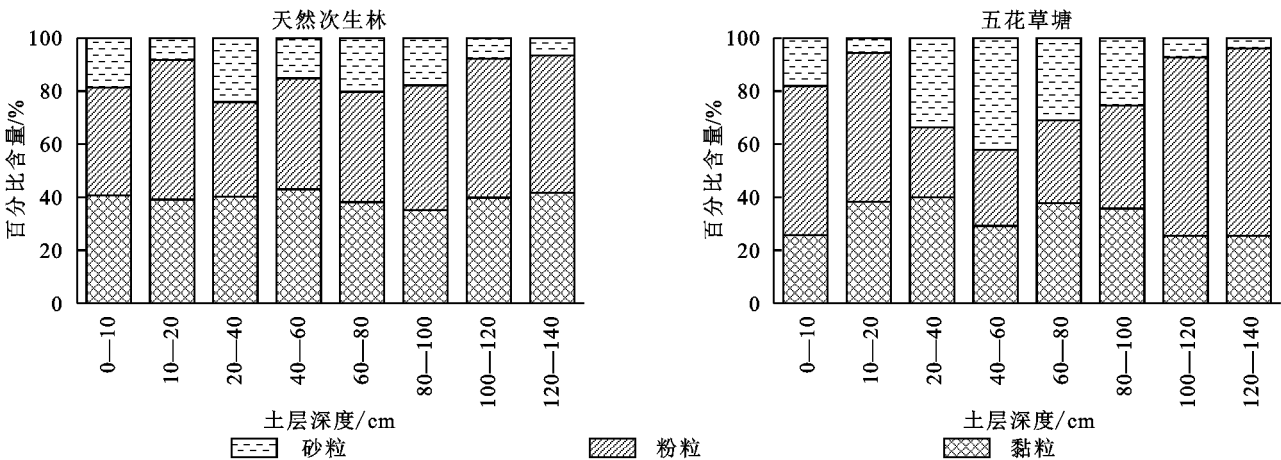


图 3 土壤机械组成垂直变化特征

Fig. 3 Vertical variation of soil mechanical composition

2.4 土壤结构及稳定性垂直变化特征

土壤中水稳性团聚体含量($WSA_{>0.25}$)、团聚体平均重量直径(MWD)和平均几何直径(GMD)是表征土壤结构的常用指标。 $WSA_{>0.25}$ 含量越高,土壤稳定性越好,土壤结构和质量越佳。未开垦黑土土壤 $WSA_{>0.25}$ 垂直变化特征见图 4A,天然次生林与五花草塘的 $WSA_{>0.25}$ 随土层深度的增加均表现为先降低后增加的趋势,其中天然次生林 0—60 cm 土层范围内 $WSA_{>0.25}$ 随土层深度的增加显著降低 86.86% ($p < 0.05$),在 60 cm 以下 $WSA_{>0.25}$ 随土层深度加深逐渐增大。五花草塘的 $WSA_{>0.25}$ 在 0—40 cm 土层范围内随土层深度的增加显著降低 91.13% ($p < 0.05$),但 40—80 cm 土层范围内 $WSA_{>0.25}$ 并没有显著变化 ($p > 0.05$),而 80—140 cm 土层范围内 $WSA_{>0.25}$ 随土层深度的增加显著增加 218.41% ($p < 0.05$)。

MWD 与 GMD 值越大,说明团聚度越高,土壤团聚体稳定性越强。天然次生林与五花草塘 MWD 随土层深度的增加均呈先降低后增加的趋势(图 4B)。天然次生林 MWD 在 0—60 cm 土层范围内显著降低,并在 40—60 cm 土层达到最小值;60—140 cm 土层范围内随土层深度的增加显著升高 90.48% ($p < 0.05$)。五花草塘 MWD 在 0—40 cm 土层范围内随土层深度的增加显著降低 91.63% ($p < 0.05$),但在 40—80 cm 土层范围内不存在显著差异,而 80—140 cm 土层范围内随土层深度的增加显著增加 58.82% ($p < 0.05$)。天然次生林与五花草塘 GMD 随土层深度的增

五花草塘的砂粒含量范围为 6.59%~24.12%,整体表现为随土层深度的增加先增加后降低的趋势,其中 100—140 cm 土层范围内砂粒含量均小于 10%;粉粒含量范围为 35.70%~52.68%,在 20—140 cm 土层范围内随土层深度的增加逐渐增大,增加幅度为 46.86%;黏粒含量变化范围为 35.12%~43.00%,整体变化不明显。

加均表现为先降低后增加的趋势(图 4C)。天然次生林与五花草塘 GMD 分别在 0—60,0—40 cm 土层范围内随土层深度的增加显著降低 71.05%和 86.88% ($p < 0.05$)。但天然次生林与五花草塘 GMD 分别在 60—140,40—140 cm 土层范围内随土层深度的增加显著增大 28.60%和 39.57% ($p > 0.05$)。

分形维数(D)表征土粒直径的大小和质地组成的均匀程度,其中 D 值越小,代表土壤具有越良好的结构。未开垦黑土 D 值随土层深度的增加呈先增大后降低趋势(图 4D)。天然次生林 D 值在 0—20 cm 土层范围内差异不显著 ($p > 0.05$), D 值在 20—40 cm 土层显著增大 4.96% ($p < 0.05$),而 40—140 cm 土层范围内 D 值差异不显著 ($p > 0.05$)。五花草塘 D 值在 0—40 cm 土层范围内随土层深度的增加显著增大 23.14% ($p < 0.05$),而 40—80 cm 土层范围内 D 值差异不显著,但 80—100 cm 土层的 D 值较 60—80 cm 土层显著降低 1.61% ($p < 0.05$),100 cm 土层以下 D 值差异不显著 ($p > 0.05$)。

2.5 未开垦黑土土壤物理性状综合评价

通过方差分析及显著性检验的土壤物理性状指标进行主成分分析,并计算出相应的综合得分。依据特征值 ≥ 1 的原则提取出 2 个主成分,通过 KMO (> 0.6)和 Bartlett 球形检验(< 0.05),并对逆指标进行正向化处理。由表 1 主成分分析结果可知,第 1 主成分对总方差贡献率为 74.842%,以土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、饱和持水量以及毛管持水量贡

献最大;第 2 主成分对总方差贡献率为 20.482%,以大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量、平均重量直径、几何平均直径以及团聚体分形维数贡献最大;前 2 个主成分累计贡献率为 95.324%,说明提取的 2 个主成分可代表所有土壤物理特性 95.324%的信息。天然次生林与五花草塘土壤物理性状综合得分排序在土层上的区分很明显(表 2)。天然次生林中,表层(0—10 cm)综合得分最高,说明天然次生林内表层土壤物理性状明显优于下层;而综合得分在 10—60 cm 土

层范围内逐渐降低,40—60 cm 土层达到最小值-0.03,说明在垂直方向上 40—60 cm 土层土壤物理性状表现最差;但综合得分在 60—140 cm 土层范围内逐渐增高。五花草塘中,土壤物理性状综合得分最大值同样出现在表层,且在垂直方向上,0—120 cm 土层内综合得分整体随土层深度的增加逐渐降低,即随土层深度越深土壤物理性状表现越差;而 120—140 cm 土层与 100—120 cm 土层得分相近,说明这 2 个土层土壤物理性状差异不明显。

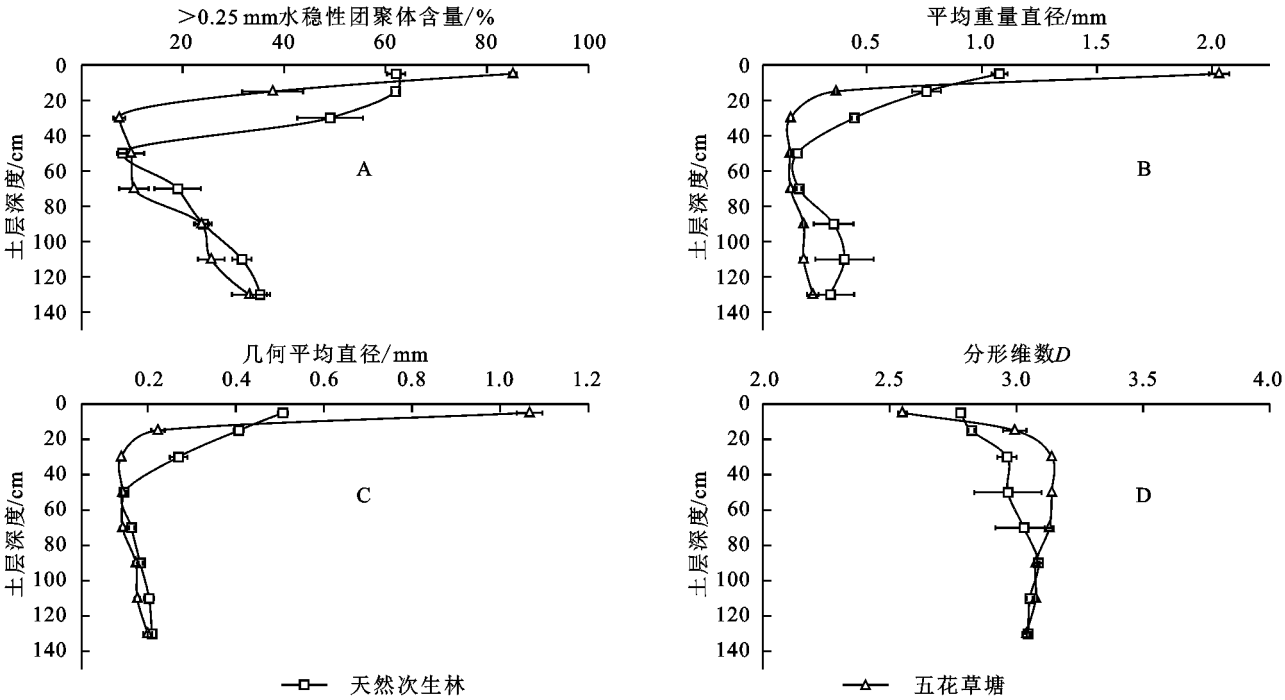


图 4 土壤结构与稳定性垂直变化特征

Fig. 4 Vertical variation of soil structure and stability

表 1 主成分分析的特征根及其贡献率

Table 1 Characteristic root of principal component analysis and its contribution rate

主成分	特征根值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	6.736	74.842	74.842
2	1.843	20.482	95.324

为使评价结果更加清晰,对原始数据进行标准化后,采用组平均距离方法,以欧氏距离作为衡量土壤物理性状相似程度进行系统聚类,得到系统聚类法的谱系图,可以看出各处理土壤物理性状的大致分类,同一类的土层内土壤物理性状具有相似的特征(图 5)。为展现不同类间的特征差异,将距离阈值定为 2,此时类间距较大,将未开垦黑土 0—140 cm 土层范围内各土层土壤物理性状分为 5 类,5 类中第 1 类、第 2 类与第 3 类距离较小,其余类间距较大,说明不同土层间土壤物理性状有明显不同。聚类分析结果表明:天然次生林 0—10 cm 土层为第 1 类,在各土层中综合得分最高;五花草塘 0—10 cm 土层为第 2 类,土壤物理性状综合得分较

高;天然次生林 10—20 cm 土层为第 3 类;天然次生林 20—40 cm 土层和五花草塘 10—20 cm 土层为第 4 类;其余土层为第 5 类,说明这些土层拥有较为相似的他土壤物理性状,且综合得分相对较低。

表 2 未开垦黑土不同土层土壤物理性状综合得分

Table 2 Comprehensive scores of soil physical properties in different layers of unreclaimed black soil

天然次生林		五花草塘	
土层	得分	土层	得分
A	1.22	A	1.19
B	0.84	B	0.65
C	0.45	C	0.34
D	-0.03	D	0.20
E	0.04	E	0.17
F	0.19	F	0.12
G	0.23	G	0.08
H	0.22	H	0.08

注:土层中 A 为 0—10 cm 土层;B 为 10—20 cm 土层;C 为 20—40 cm 土层;D 为 40—60 cm 土层;E 为 60—80 cm 土层;F 为 80—100 cm 土层;G 为 100—120 cm 土层;H 为 120—140 cm 土层,下同。

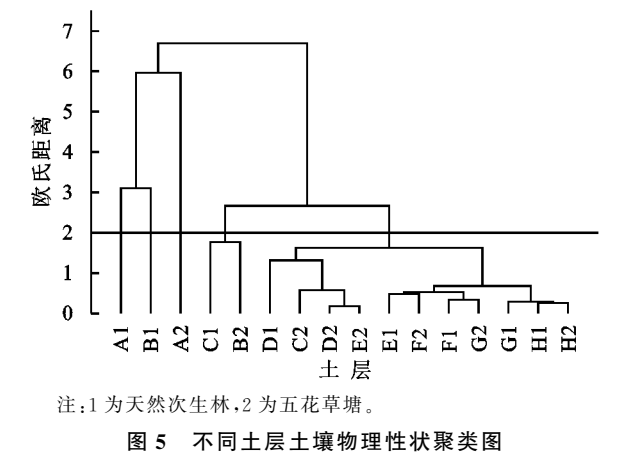


Fig. 5 Cluster map of soil physical properties in different soil layers

3 讨论

土壤容重与孔隙度是表征土壤透气性、强度、存储和传输土壤水能力的基本指标^[6],一般来说土壤有机质含量越高、土壤容重越小、孔隙度越大^[20]。本研究结果表明,未开垦黑土土壤容重整体上随土层深度的增加逐渐增大,土壤孔隙度随土层深度的增加逐渐降低,与以往的研究结果一致^[21]。从土壤容重与孔

隙度的垂直变化特征来看,未开垦黑土 0—20 cm 土层土壤的容重显著低于下层土壤,孔隙度明显高于下层土壤。这可能是由于以下两个原因,其一,未开垦黑土植被覆盖度较大,表层土壤中植物根系分布密集,土壤的水气状况良好,有机质含量较高(表 3),利于土壤团粒结构的形成;其二,表层土壤中穴居动物的存在,会形成较多的动物孔洞,同时受植物根系活动的影响,孔隙之间连通性增加^[22],从而使土壤保持了容重小、孔隙度大的良好物理性状。此外,本研究中,0—60 cm 土层范围内天然次生林土壤容重低于五花草塘,孔隙度明显高于五花草塘,且天然次生林内土壤容重与孔隙度变化幅度更剧烈。这是由于表土层内草地的枯落物分解较慢,土壤改善较为缓慢,因此五花草塘相对于天然次生林有较大的土壤容重以及较低的孔隙度^[23]。但随土层深度的增加,表层以下土壤有机质含量逐渐减少,土壤团聚性降低,提高了土壤的紧实度,而且不同植被地下根系的生长发育状况也存在差异,因此土壤容重与孔隙度受土壤发育状况的影响,导致天然次生林与五花草塘不同土层的土壤容重与孔隙度产生明显差异。

表 3 未开垦黑土土壤有机质含量垂直变化特征

Table 3 Characteristics of soil organic matter content in the study area

类型	土壤有机质/(g·kg ⁻¹)							
	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm	100—120 cm	120—140 cm
天然次生林	216.33±2.45a	97.95±5.22b	39.04±0.19c	20.46±0.03d	14.30±0.08e	10.91±0.23ef	8.39±0.16f	8.19±0.09f
五花草塘	70.08±0.44a	65.22±0.10b	34.90±0.29c	25.98±0.26d	19.61±0.11e	13.18±0.05f	10.61±0.09g	8.23±0.09h

注:小写字母不同表示不同土层间差异显著($p<0.05$)。

土壤持水能力主要受土壤容重、孔隙度、有机质等因素的影响^[24]。本研究发现,未开垦黑土土壤饱和持水量与毛管持水量整体随土层深度的增加逐渐降低,其中天然次生林在 0—60 cm 土层范围内土壤饱和持水量与毛管持水量要高于五花草塘,尤其在 0—20 cm 土层,天然次生林土壤饱和持水量和毛管持水量分别是五花草塘的 2.49, 2.40 倍。一方面是因为天然林表层土壤容重较小,孔隙度和有机质含量较高;另一方面可能是由于天然次生林林下植被丰富,表层土壤中含有大量腐殖质,形成了较多的有机水胶体,能够吸持大量水分^[25]。天然次生林 20—60 cm 土层内相比五花草塘具有较高的土壤持水量,这是由于不同植被类型的入渗能力存在一定的差异^[26],且典型黑土区天然次生林的水分入渗能力要高于五花草塘^[27]。但 60—140 cm 土层范围内五花草塘土壤饱和持水量与毛管持水量均高于天然次生林,这可能是乔木植物比草本植物需要消耗更多的土

壤水分,且乔木植物的根系更密集,需要水分更多,导致中下部土壤水分补充缓慢^[28]。

土壤机械组成是土壤基本物理性质之一,对土壤水力特性、肥力和抗侵蚀性有重要作用^[29],同时也是土壤质地划分的重要依据。本研究中,未开垦土壤砂粒含量在 0—140 cm 土层范围内呈先增加后降低的趋势,而粉粒含量则表现相反,黏粒含量整体变化相对不明显。研究结果表明,0—20 cm 土层范围内,土壤粉粒与黏粒总含量占比平均在 85% 以上,这可能是由于黑土表层胡敏酸类腐殖质含量较多,有机质能够促进土壤颗粒黏化,且植物根系发达,使土壤形成了良好的团粒状结构^[30]。但随着土层深度的增加,土壤砂粒含量在 20—60 cm 土层明显增加,这是由于随着土层深度的增加,土壤有机质含量显著降低,导致土壤黏化作用减弱^[31];而在 60—140 cm 土层范围内,土壤砂粒含量迅速降低,这主要由于土壤孔隙度随土层深度加深逐渐减小,且砂粒粒径较大,向下层

土层运移的能力降低,而粉粒与黏粒粒径较小,可以较容易地向下层土层运移,导致60 cm以下土层粉粒与黏粒总量逐渐增加,土壤质地黏重,这也与黑土表层至100 cm范围内存在黏化层的描述大致相同^[32]。

土壤结构是大小形状各异的矿物颗粒、团聚体和有机质堆叠排列形成的有序空间,而良好的土壤结构主要是团粒结构,并在一定程度上可以体现土壤的肥力水平^[33-34]。本研究中,未开垦黑土天然次生林与五花草塘0—140 cm土层范围内土壤 $WSA_{>0.25}$, MWD和GMD随土层深度的增加均呈先降低后增加的变化趋势,而 D 值则表现相反,这可能是由于重力因素导致下层土壤受到上层土壤的挤压,土层越深所受压力越大;另一方面是因为植物凋落物和根系大量存在于浅层土壤中,更有利于土壤团粒结构的形成,导致土壤水稳性团聚体随着土层深度增加而降低^[35-36]。而下层较为紧实的土壤是导致土壤水稳性团聚体含量及稳定性提高的主要原因,且土壤有机质随土层深度的增加显著降低,导致土壤团聚度降低,土壤团聚体稳定性逐渐下降^[33]。天然次生林与五花草塘的土壤结构在不同土层也存在一定的差异。0—10 cm土层五花草塘的土壤 $WSA_{>0.25}$, MWD和GMD分别高出天然次生林37.14%, 87.96%和109.80%, D 值低于天然次生林8.27%。这是由于五花草塘植被根系主要分布在表层土壤中,加之盘根现象的存在,根系密度较大,有助于连接土壤颗粒,使得土壤团聚体稳定性强^[37],且植物根系分泌的高分子黏质可以胶结土壤颗粒,从而促进土壤水稳性团聚体含量的增加,从而形成良好的土壤结构^[38]。而10—60 cm土层范围内天然次生林土壤 $WSA_{>0.25}$, MWD和GMD高于五花草塘, D 值小于五花草塘,因为天然次生林相对于五花草塘下层土壤中的根系密度和面积较大,同时林地枯枝落叶的腐殖化作用也明显改善了土壤结构^[29],导致天然次生林10—60 cm土层范围内具有更良好的土壤结构。

4 结论

本研究以未开垦黑土(天然次生林、五花草塘)为研究对象,通过测定0—140 cm土层范围土壤物理质量基本指标,探究未开垦黑土土壤物理质量垂直变化特征。主要结论如下:

(1) 未开垦黑土土壤容重随土层深度的加深而逐渐增大,土壤孔隙度与持水量则表现相反。且0—60 cm土层范围内五花草塘比天然次生林具有更小

的土壤容重,以及更高的孔隙度与持水量。

(2) 未开垦黑土土壤机械组成均以粉粒与黏粒为主,天然次生林砂粒含量高于五花草塘,且在40—60 cm土层砂粒含量明显增加。0—100 cm土层范围内,天然次生林和五花草塘土壤质地类型表现为黏壤土;而100—140 cm土层内粉粒与黏粒总量均在90%以上,土壤质地类型表现为粉质黏壤土。

(3) 未开垦黑土水稳性团聚体含量($WAS_{>0.25}$)、平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)均随土层深度增加先降低后增加,团聚体分形维数(D)呈相反趋势。五花草塘0—10 cm土层土壤结构优于天然次生林,表现为水稳性大团聚体含量较多,且MWD与GMD较大,但 D 差异不明显;而在10—80 cm土层范围内天然次生林土壤结构表现较好。

(4) 天然次生林土壤物理性状在0—10 cm土层表现最优,在40—60 cm土层表现最差;五花草塘土壤物理性状整体上随土层的加深,表现越差;天然次生林0—40 cm土层土壤物理性状要优于五花草塘,说明天然次生林对0—40 cm土层土壤物理性状有更好的改善效果,但在40—80 cm土层五花草塘表现更优。

参考文献:

- [1] 张俊伶, 张江周, 张锁福, 等. 土壤健康与农业绿色发展: 机遇与对策[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 783-796.
Zhang J L, Zhang J Z, Zhang F S, et al. Soil health and agriculture green development: Opportunities and Challenges[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(4): 783-796.
- [2] 彭新华, 王云强, 贾小旭, 等. 新时代中国土壤物理学主要领域进展与展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1071-1087.
Peng X H, Wang Y Q, Jia X X, et al. Some key research fields of chinese soil physics in the new era: Progresses and perspectives [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1071-1087.
- [3] Adhikari K, Hartemink A E. Linking soils to ecosystem services: A global review[J]. Geoderma, 2016, 262: 101-111.
- [4] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality: Defining soil Quality for a Sustainable Environment [J]. Madison: Soil Science Society of America Publication Inc, 1994: 3-21.
- [5] Dexter A R. Soil physical quality. Part I, II, III [J]. Geoderma, 2004, 120: 201-239.
- [6] 张仁陟, 罗珠珠, 黄高宝, 等. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤物理质量的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(4): 1-10.
Zhang R Z, Luo Z Z, Huang G B, et al. Effects of long-

- term conservation tillage on soil physical quality of rain-fed areas of the Loess Plateau[J]. *Acta Prata Agriculturae Sinica*, 2011, 20(4):1-10.
- [7] 杨德军, 雷少刚, 卞正富, 等. 土壤物理质量指标研究进展及在矿区环境中的应用展望[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(11):1961-1968.
- Yang D J, Lei S G, Ban Z F, et al. A Review of the progress in the research on soil physical quality indicator and its application in the mining area environment[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(11):1961-1968.
- [8] 赵玉明, 程立平, 梁亚红, 等. 东北黑土区演化历程及范围界定研究[J]. *土壤通报*, 2019, 50(4):765-775.
- Zhao Y M, Cheng L P, Liang Y H, et al. Developing History and defining boundary definition of the black soil regions in northeast China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(4):765-775.
- [9] 张光辉, 杨扬, 刘瑛娜, 等. 东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2):1-12.
- Zhang G H, Yang Y, Liu Y N, et al. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2):1-12.
- [10] 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.
- [11] 邹文秀, 陆欣春, 韩晓增, 等. 耕作深度及秸秆还田对农田黑土土壤供水能力及作物产量的影响[J]. *土壤与作物*, 2016, 5(3):141-149.
- Zou W X, Lu X C, Han X Z, et al. The impact of tillage depth and straw incorporation on crop yield and soil water supply in arable black soil[J]. *Soils and Crops*, 2016, 5(3):141-149.
- [12] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 等. 不同土地利用方式对黑土剖面土壤物理性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5):187-193, 199.
- Zou W X, Han X Z, Lu X C, et al. Effect of land use types on physical properties of black soil profiles[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(5):187-193, 199.
- [13] 闫雷, 喇乐鹏, 董天浩, 等. 耕作方式对东北黑土坡耕地土壤物理性状及根系垂直分布的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 40(1):125-132.
- Yan L, La Y P, Dong T H, et al. Soil physical properties and vertical distribution of root systems affected by tillage methods in black soil slope farmlands in Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the Csa)*, 2021, 37(1):125-132.
- [14] 郭孟洁, 李建业, 李健宇, 等. 实施 16 年保护性耕作下黑土土壤结构功能变化特征[J]. *农业工程学报*, 2021, 42(22):108-118.
- Guo M J, Li J Y, Li J Y, et al. Changes of soil structure and function after 16-year conservation tillage in black soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the Csa)*, 2021, 37(22):108-118.
- [15] 邱琛, 韩晓增, 陈旭, 等. CT 扫描技术研究有机物料还田深度对黑土孔隙结构影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(14):98-107.
- Qiu C, Han X Z, Chen X, et al. Effects of organic amendment depths on black soil pore structure using CT scanning technology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the Csa)*, 2021, 37(14):98-107.
- [16] 汪景宽, 王铁宇, 赵永存, 等. 黑土土壤质量演变初探 I: 不同开垦年限黑土主要质量指标演变规律[J]. *沈阳农业大学学报*, 2002, 33(1):43-47.
- Wang J K, Wang T Y, Zhao Y C, et al. An approach to the changes of black soil quality(I): Changes of the indices of black soil with the year(s) of reclamation[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2002, 33(1):43-47.
- [17] 韩晓增, 邹文秀. 东北黑土地保护利用研究足迹与科技研发展望[J]. *土壤学报*, 2021, 58(6):1341-1358.
- Han X Z, Zou W X. Research perspectives and footprint of utilization and protection of black soil in Northeast China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(6):1341-1358.
- [18] 刘宝元, 张甘霖, 谢云, 等. 东北黑土区和东北典型黑土区的范围与划界[J]. *科学通报*, 2021, 66(1):96-106.
- Liu B Y, Zhang G L, Xie Y, et al. Delineating the black soil region and typical black soil region of northeastern China(in Chinese)[J]. *Chin Sci Bull*, 2021, 66(1):96-106.
- [19] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993, 38(20):1896-1899.
- Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Soil fractal characteristics characterized by weight distribution of particle size[J]. *Chin. Sci. Bull*, 1993, 38(20):1896-1899.
- [20] 王凯博, 时伟宇, 上官周平. 黄土丘陵区天然和人工植被类型对土壤理化性质的影响[J]. *农业工程学报*,

- 2012,28(15):80-86.
- Wang K B, Shi W Y, Shangguan Z P. Effects of natural and artificial vegetation types on soil properties in Loess Hilly region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the Csa), 2012,28(15):80-86.
- [21] 邹文秀,杨春葆,韩晓增,等.平坦黑土区田间尺度剖面土壤物理性质空间变异性的研究[J].土壤与作物, 2013,2(3):127-131.
- Zou W X, Yang C B, Han X Z, et al. The spatial variability of soil profile physical properties in a flat black soil[J]. Soils and Crops, 2013,2(3):127-131.
- [22] 冯璐,丁康,徐学选,等.黄土塬边坡植被类型对土壤孔隙的影响[J].草业科学,2020,37(4):625-634.
- Feng L, Ding K, Xu X X, et al. The influence of Loess Tableland slope vegetation type on soil pore characteristics[J]. Pratacultural Science, 2020,37(4):625-634.
- [23] 吴江琪,马维伟,陈国鹏,等.黄土高原4种植被类型对土壤物理特征及渗透性的影响[J].水土保持学报, 2018,32(4):133-138.
- Wu J Q, Ma W W, Chen G P, et al. Effects of four vegetation types on soil physical characteristics and permeability in loess plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(4):133-138.
- [24] Nottingham A C, Thompson J A, Turk P J, et al. Seasonal dynamics of surface soil bulk density in a forested catchment[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015,79(4):1163-1168.
- [25] 刘忠玲,姚颖,刘建明,等.抚育间伐对白桦天然次生林枯落物与土壤持水特性的影响[J].森林工程,2020,36(4):29-37,44.
- Liu Z L, Yao Ying, Liu J M, et al. Effects of thinning on water-holding characteristics of litter and soil in *Betula platyphylla* natural secondary forest stand[J]. Forest Engineering, 2020,6(4):29-37,44.
- [26] Neris J, Fuentes J, Morillas G, et al. Vegetation and land-use effects on soil properties and water infiltration of Andisols in Tenerife (Canary Islands, Spain) [J]. Catena, 2012,98:55-62.
- [27] 柴亚凡,王恩姮,陈祥伟.未经干扰黑土的土壤贮水能力及水分入渗特征[J].水土保持学报,2007,21(3):158-161,192.
- Chai Y F, Wang E H, Chen Xiangwei. Water storage capacity and permeability of undisturbed typical black soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(3):158-161,192.
- [28] Yang Lei, Chen Liding, Wei Wei. Effects of vegetation restoration on the spatial distribution of soil moisture at the hillslope scale in semi-arid regions[J]. Catena, 2015,124:138-146.
- [29] 张泽凡,张学珍.黄土高原植被恢复对土壤物理参数的影响:基于已发表数据的荟萃分析[J].地理科学进展, 2021,40(6):1012-1025.
- Zhang Z F, Zhang X Z. Effects of vegetation restoration on soil physical parameters on the Loess Plateau: A meta-analysis based on published data[J]. Progress in Geography, 2021,40(6):1012-1025.
- [30] 刘驰,刘希瑶,刘澎.松辽平原典型黑土区有机质的变化及影响因素分析[J].地质与资源,2020,29(6):550-555.
- Liu C, Liu X Y, Liu P. Analysis on the changes of organic matters and their influencing factors of typical black soil areas in Songliao plain[J]. Geology and Resources, 2020,29(6):550-555.
- [31] Galantini J A, Senesi N, Brunetti G, et al. Influence of texture on organic matter distribution and quality and nitrogen and sulphur status in semiarid Pampean grassland soils of Argentina[J]. Geoderma, 2004,123:143-152.
- [32] 龚子同.中国土壤系统分类:理论·方法·实践[M].北京:科学出版社,1999.
- [33] Fu Y, Li G L, Zheng T H, et al. Fragmentation of soil aggregates induced by secondary raindrop splash erosion[J]. Catena, 2020,185:104342.
- [34] Sessitsch A, Weilharter A, Gerzabek M H, et al. Microbial population structures in soil particle size fractions of a long-term fertilizer field experiment[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2001,67(9):4215-4224.
- [35] Guan Fengying, Tang Xiaolu, Fan Shaohui, et al. Changes in soil carbon and nitrogen stocks followed the conversion from secondary forest to Chinese fir and Moso bamboo plantations[J]. Catena, 133:455-460.
- [36] Fu Y, Zhang Y J, Chen X W, et al. Influence of slaking on the size distributions of water-stable aggregates [J]. Soil Science Society of America Journal, 2022,86(5):1241-1248.
- [37] Dou Y X, Yang Y, An S S, et al. Effects of different vegetation restoration measures on soil aggregate stability and erodibility on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2019,185:104294.
- [38] Zeng Q C, Man C, Zhu Z L, et al. Soil aggregate stability under different rain conditions for three vegetation types on the Loess Plateau(China)[J]. Catena, 2018, 167:276-283.