

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.015.

魏思雨, 张延玲, 刘滨辉, 等. 东北黑土区地埂坡耕地土壤物理性质的空间分布特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 135-144.

Wei Siyu, Zhang Yanling, Liu Binhui, et al. Spatial Distribution Characteristics of Soil Physical Properties of Sloping Cultivated Land with Ridges in the Black Soil Region of Northeast China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 135-144.

东北黑土区地埂坡耕地土壤物理性质的空间分布特征

魏思雨¹, 张延玲², 刘滨辉¹, 付玉¹

(1. 东北林业大学 林学院, 哈尔滨 150040; 2. 松辽水利委员会 松辽流域水土保持监测中心站, 长春 130021)

摘 要: [目的] 揭示东北黑土区有、无地埂措施土壤物理性质空间分布的差异, 为黑土区水土保持工程措施及坡耕地土壤恢复效果的评价提供科学依据。[方法] 以东北黑土区修筑水土保持工程措施(地埂)的坡耕地为研究对象, 以无措施坡耕地作为对照, 采用空间均匀布点取样法, 获取了表层(0—15 cm)土壤物理性质基本指标, 量化有、无地埂措施坡耕地土壤持水能力和土壤结构的分布特征。[结果] (1) 修筑地埂后, 土壤含水率、饱和持水量、田间持水量和毛管持水量分别提高 7.89%, 30.15%, 17.83%, 19.41%; (2) 在坡上、坡中及坡下位置修筑地埂样地的土壤持水能力均高于无措施对照样地, 且随坡位的下降, 土壤的持水能力也在逐渐增大; (3) 修筑地埂后, 土壤容重和分形维数分别降低 12.04%, 0.58%, 而土壤总孔隙度、毛管孔隙度、 $WR_{>0.25}$ 、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)分别增大 14.02%, 17.83%, 17.74%, 28.48%, 21.31%; (4) 在坡上、坡中及坡下位置修筑地埂样地的土壤结构较无措施对照样地更好, 尤其是坡上位置主要影响土壤总孔隙度、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和分形维数(D); 坡中和坡下位置主要影响 $WR_{>0.25}$, 较无措施对照样地增大 18.5%, 17.89%。[结论] 坡耕地修筑水土保持措施后, 能有效提高土壤持水能力, 改善土壤结构, 提高土壤水稳性团聚体含量, 尤其在坡下位置更为明显。

关键词: 黑土区; 地埂; 空间变化特征; 土壤持水能力; 土壤结构特征

中图分类号: S157.3⁺2; S151.9⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0135-10

Spatial Distribution Characteristics of Soil Physical Properties of Sloping Cultivated Land with Ridges in the Black Soil Region of Northeast China

Wei Siyu¹, Zhang Yanling², Liu Binhui¹, Fu Yu¹

(1. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Soil and Water Conservation Monitoring Center of Songliao Basin, Songliao Water Resources Commission, Changchun 130021, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to reveal the difference of spatial distribution of soil physical properties with and without earth ridge, and to provide scientific basis for the evaluation of soil and water conservation measures and soil restoration effects on sloping cultivated land in the black soil region. [Methods] This study focused on the sloping cultivated land with soil and water conservation measures (ridges) in the northeast black soil region, with untreated sloping cultivated land as control. A spatially uniform sampling method was used to obtain the basic indicators of soil physical properties in the surface layer (0—15 cm), and the spatial distribution characteristics of soil water holding capacity and soil structure with and without ridge measures on sloping cultivated land were quantified. [Results] (1) After the construction of ridges, the soil moisture content, saturated water holding capacity, field water holding capacity, and capillary water holding capacity increased by 7.89%, 30.15%, 17.83%, and 19.41%, respectively. (2) The soil water holding capacities of the ridge plots on the top, middle, and bottom of the

收稿日期: 2023-08-11

修回日期: 2023-08-22

资助项目: “十四五”国家重点研发计划项目“黑土农田侵蚀阻控原理及水土保持措施效应”(2021YFD1500705)

第一作者: 魏思雨(1998—), 女, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持、水土流失。E-mail: wsy102418@163.com

通信作者: 付玉(1991—), 女, 辽宁铁岭人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀机理、水土流失防控研究。E-mail: aily_fy@163.com

<http://stbcj.paperonce.org>

slope were higher than those of the untreated control plots, and the soil water holding capacity gradually increased with the decrease of slope position. (3) After the construction of ridges, the bulk density and fractal dimension (D) of the soil decreased by 12.04% and 0.58%, respectively, while the total porosity, capillary porosity, $WR_{>0.25}$, mean weight diameter (MWD), and geometric mean diameter (GMD) increased by 14.02%, 17.83%, 17.74%, 28.48%, and 21.31%, respectively. (4) The soil structures of the ridge plots on the top, middle, and bottom of the slope were better than those of the untreated control plots, especially on the top of the slope, which mainly affected the total porosity, MWD, GMD, and D ; the middle and bottom of the slope mainly affected $WR_{>0.25}$, which increased by 18.5% and 17.89% compared to the untreated control plots. [Conclusion] The construction of soil and water conservation measures on sloping cultivated land can effectively improve soil water holding capacity and soil structure, and increase the content of stable aggregates, especially in the bottom of the slope.

Keywords: black soil region; ridge; spatial variation characteristics; soil water holding capacity; soil structure characteristics

东北黑土区作为世界四大黑土区之一,是中国重要的商品粮基地,该区域严重的水土流失现象对我国耕地资源保护和粮食安全产生重大影响^[1]。其地形地貌大多为山前波状起伏及漫岗地,具有坡缓、坡长的特点。坡耕地是东北黑土区主要的耕地资源,占耕地总面积的60%,坡度多为 $3^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ^[2],但由于坡耕地不合理开垦、传统耕作顺垄进行农业生产及对水土保持不够重视,导致东北黑土区黑土资源严重流失,坡耕地成为产生水土流失的主要来源地,占黑土区水土流失面积的80.3%,黑土地区的农田正面临危机^[3]。近年来,东北黑土区的国家水土保持重点工程总体形成了较为完善的技术与管理体系^[4],2003—2005年东北黑土区累计治理水土流失面积约1 804 km²,其中坡面治理措施改垄15 834.6 hm²,地埂植物带实施面积仅次于改垄,约为14 979.3 hm²,在东北黑土区被广泛地应用,再次是梯田,治理面积8 900.8 hm²^[5]。

目前关于工程措施的水土保持效益研究有很多,张瑜等^[6]研究发现黑土区坡式条田能够有效地改善土壤水热和土壤呼吸状况,并且有减水减沙的作用,坡式条田年均减少输沙率为78.3%,减少地表径流率为68.5%,且修筑坡式条田能够显著提高土壤质量含水量。冯洋等^[7]采取了水保林、地埂植物带和水平梯田3种典型水土保持措施的土壤样品,其中的总氮和总磷含量均显著高于未采取任何水土保持措施坡耕地土壤中总氮和总磷含量。金万鹏^[8]研究了黑土区坡耕地植物篱、地埂植物带对土壤理化性质和团聚体稳定性的改善效果,3种措施在上坡位的平均重量直径(MWD)呈植物篱>顺垄>地埂植物带的结果;且上述措施在低坡度,间距为18 m的植物篱组合效果最好,坡度增大后以地埂植物带为主的措施配置效果最为明显,尤其在 8° 坡耕地上保土能力高于其他措施。王禹宸^[9]研

究发现黑土区埂带植物使地埂在土壤含水量、土壤容重等土壤理化状况改善,既增加地埂土壤保水能力,又提高相邻田间蓄水能力,合理改善土壤结构,增加土壤肥力。Casa等^[10]通过检测大豆的水利用率,对比布设水土保持措施后的大豆产量,结果表明布设水土保持措施后的耕地大豆产量与质量均高于传统耕地,合理的水土保持措施布设有利于维持土壤的理化性质和生态环境。Sudhishri等^[11]也表明坡耕地水土保持措施合理地实施,能够起到增产,改善土壤环境等作用。Salvador-Blanes^[12]与Cullum^[13]等在研究植物篱时发现,植物篱能有效地减少地表径流、进而减缓土壤侵蚀,对保土保水具有显著的效果。

坡面水土保持工程措施的作用在于用改变微小地形的方法防止坡面水土流失,将雨水及融雪就地拦蓄,使其渗入农田、草地或林地,减小或防止形成坡面径流^[14]。因此在不同坡位下,水土保持工程措施对土壤物理性质也会产生一定差异,而目前大部分研究是对水土保持工程措施整体的理化性质进行相关研究,对于水土保持工程措施空间分布特征的相关研究结果较少,且并未对水土保持工程措施对坡面径流的作用进行分析,而明确水土保持工程措施土壤物理性质及土壤团聚体稳定性的空间分布特征对于合理布设措施极为重要,是优化措施标准断面的基础。因此,本研究以东北黑土区修筑水土保持工程措施(地埂)的坡耕地为研究对象,以无措施坡耕地作为对照,采用空间均匀布点取样法,获取表层(0—15 cm)土壤物理性质基本指标,明确有、无地埂措施坡耕地土壤持水能力和土壤结构的分布特征,量化分析有、无地埂措施坡耕地空间分布的差异。研究成果可为黑土区水土保持工程措施及坡耕地土壤物理性质的空间分布特征及水土保持措施配置的优化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于吉林省中南部的辽源市东辽县安石镇杏木村,地处长白山余脉与松辽平原的过渡带,地理坐标为125°22′40″—125°26′10″E,42°58′05″—43°01′40″N。该区域为典型东北低山丘陵地貌,土地利用类型主要为坡耕地和林地,土壤类型以棕壤土为主,地面坡度多为5°~15°,90%以上耕地坡度为>5°,地处寒温带半湿润大陆性季风气候,年日照时间2 504.2 h,年平均气温一般在5.2℃,年降雨量658.1 mm;农作物主要是玉米(*Zea mays* L.);水土流失类型主要为水蚀,

表 1 坡面基本特征

Table 1 Basic characteristics of slope

坡面类型	土壤类型	坡度/(°)	坡长/m	面积/m ²	种植作物	地埂类型	地埂高度/m	地埂条数/条	地埂间距/m
地埂样地	暗棕壤土	3~5	120	9579.0	玉米	土质地埂	1.0~1.2	3	30
对照样地	暗棕壤土	3~5	120	9546.6	玉米				

1.2.2 样品采集 试验于2022年7月13日—29日进行野外采样,修筑地埂样地及其对照样地均采用空间均匀布点法设置40个采样点,每个样点采集环刀(体积100 cm³)一个、铝盒一个、原状土样品2 kg;其中环刀用于测定土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、饱和持水量、渗透速率、田间持水量以及毛管持水量;铝盒用于测定土壤含水率;原状土样品用于土壤水稳性团聚体含量测定。

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、田间持水量与毛管持水量;采用湿筛法测定土壤水稳性团聚体含量,按照土壤团聚体粒径(*d*)分为>5,5~2,2~1,1~0.5,0.5~0.25,<0.25 mm。

土壤渗透性能是土壤重要的水分物理性质之一,与土壤质地、结构、孔隙度等有关。其中渗透速率(*v*)计算公式如下:

$$v = \frac{10Q_n}{t_n \times S} \tag{1}$$

式中:*Q_n*为每次渗出水量(cm³);*S*为渗透筒的横断面积(cm²);10为由cm换算成mm所乘的倍数;*t_n*为每次渗滤所间隔的时间(min)。

渗透系数(*K*)与土壤孔隙数量、土壤质地、结构、盐分含量、含水量以及温度有关。渗透系数(*K*)计算公式如下:

$$K = \frac{10 \times Q_n \times l}{t_n \times S \times (h + l)} = v \times \frac{l}{h + l} \tag{2}$$

式中:*Q_n*为每次渗出水量(cm³);*S*为渗透筒的横断面

多年平均侵蚀模数约为2 085 t/(km²·a)。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择 本研究在吉林省辽源市东辽县杏木村采集样品,选取土质地埂样地作为研究对象,与研究对象坡向、坡度、面积等条件相似的无措施坡耕地作为对照样地(表1)。其中土质埂带的地埂坡耕地种植玉米,埂带植被为黄花菜(*Heimerocallis citrina* Baroni)、地麦(*Fructus kochiae* Scopariae)、千屈菜(*Lythrum salicaria* L.)、细叶芒(*Miscanthus sinensis*)、黑麦草(*Lolium perenne*)、野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia* DC)、榆树(*Ulmus pumila* L.)、车前草(*Plantago asiatica* L.)等杂草。

积(cm²);10为由cm换算成mm的所乘的倍数;*t_n*为每次渗滤所间隔的时间(min);*l*为土层厚度(cm);*h*为水层厚度(cm);*v*为渗透速率(mm/min)。

水稳性团聚体含量:粒径>0.25 mm的土壤团聚体含量为水稳性团聚体含量(WR_{>0.25}),计算公式如下:

$$WR_{>0.25} = \frac{M_i}{M_{0.25}} \times 100 \tag{3}$$

式中:WR_{>0.25}为>0.25 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 mm水稳性团聚体总质量(g)。

平均重量直径(MWD)用来表征土壤水稳性团聚体的结构特征与稳定性,计算公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n W_i X_i \tag{4}$$

几何平均直径(GMD)用来表征土壤水稳性团聚体的结构特征与稳定性,计算公式如下:

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n (W_i \ln X_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \tag{5}$$

式中:*W_i*为第*i*粒级的土壤团聚体质量百分数(%);*X_i*为相邻两级土壤团聚体的平均粒径(mm);ln*X_i*为第*i*粒级的土壤粒级平均直径的自然对数。

土壤团聚体分形维数(*D*)采用杨培岭等^[15]提出的土壤分形模型计算:

$$(3 - D) \lg(\bar{x}_i / x_{\max}) = \lg[M(r < \bar{x}_i) / M_T] \tag{6}$$

式中:*M(r < \bar{x}_i)*为小于某一个粒径的土壤团聚体质量(g);*M_T*为土壤团聚体总质量(g); \bar{x}_i 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)^[15]。可根据拟合线性回归方程得到分形维数。

1.4 数据处理

用 Excel 对数据进行基本计算,利用 SPSS 进行显著性分析和主成分分析,Origin 绘制柱状图,再用 ArcMap 10.7 软件绘制空间分布图。

2 结果与分析

2.1 土壤容重及孔隙度的空间分布变化特征

土质地埂及其对照的土壤容重空间分布变化特征如图 1 所示。土质地埂及其对照的土壤容重均随坡位的下降无显著差异($p>0.05$),范围分别是 1.07~

1.35, 1.20~1.54 g/cm³,整体上土质地埂的土壤容重变化范围较其对照减小 17.65%。坡上、坡中和坡下位置土质地埂的土壤容重较对照样地分别降低 10.52%, 13.54%, 11.99%。

土质地埂与其对照样地的土壤总孔隙度空间分布变化特征如图 2 所示。土质地埂的土壤总孔隙度随坡位的下降呈上升趋势,范围是 44.18%~54.10%;土质地埂对照的土壤总孔隙度的范围是 36.88%~49.05%,对照样地的变化范围比土质地埂样地大 22.68%。坡上、坡中及坡下位置土质地埂的土壤总孔隙度与其对照样地相比分别增大 14.49%, 9.75%, 17.94%。

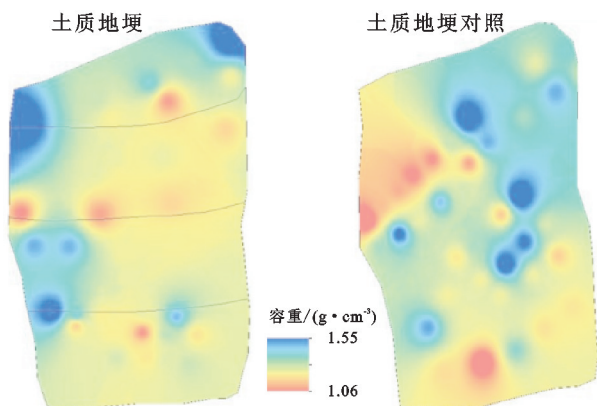


图 1 土质地埂样地及对照样地土壤容重空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of soil bulk density of terraced plots and control plots

土质地埂与其对照样地的毛管孔隙度空间分布变化特征如图 3 所示。土质地埂及其对照样地的土壤毛管孔隙度均随坡位的下降差异不显著($p>0.05$),范围分别是 33.59%~45.14%和 29.96%~44.65%,对照样地的变化范围较土质地埂样地增大 27.19%。坡上、坡中及坡下位置土质地埂的土壤毛管孔隙度较其对照样地分别增大 4.54%, 2.62%, 5.99%。

2.2 土壤持水量的空间变化特征

土质地埂样地及其对照样地的土壤含水率空间

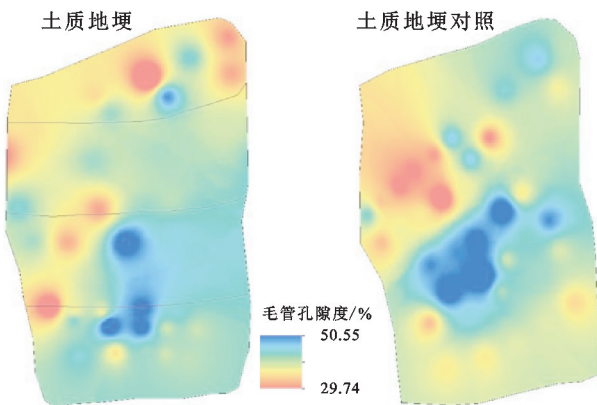


图 3 土质地埂样地及对照样地土壤毛管孔隙度空间分布

Fig. 3 Spatial distribution map of soil capillary porosity in soil ridge plots and control plots

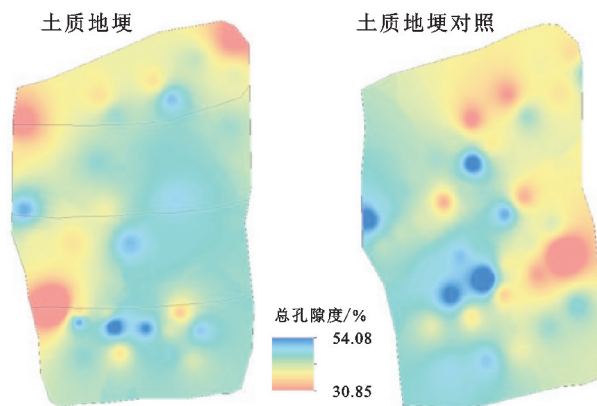


图 2 土质地埂样地及对照样地土壤总孔隙度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution map of total porosity of soil in ridge plots and control plots

分布变化特征如图 4 所示。土质地埂的土壤含水率随坡位的下降呈显著增大的趋势($p\leq 0.05$),其范围是 17.38%~26.79%,坡下含水率较坡上增大 14.95%;土质地埂对照样地的含水率变化范围是 14.59%~25.48%,对照样地含水率的变化范围较土质地埂样地增大 15.73%。坡上、坡中及坡下位置土质地埂的土壤含水率较其对照样地分别增大 9.83%, 0.8%, 13.39%,坡下差异较为显著($p\leq 0.05$)。土质地埂坡下位置的土壤含水率较坡上提高 14.95%。

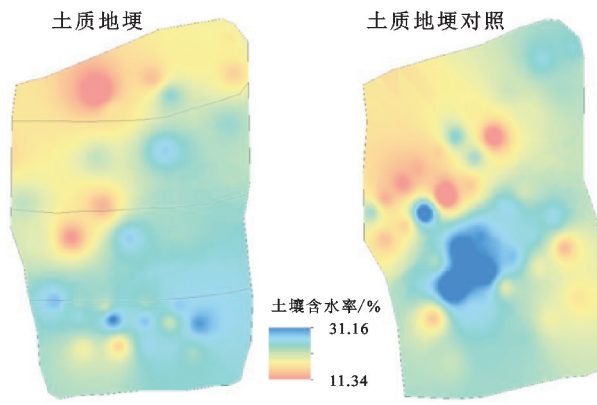


图 4 土质地埂及对照样地土壤含水率空间分布

Fig. 4 Spatial distribution map of soil moisture content in soil ridge and control plot

土质地埂样地及其对照样地的土壤饱和持水量空间分布变化特征如图 5 所示。土质地埂样地及其对照的土壤饱和持水量随坡位的下降均无显著差异 ($p>0.05$), 变化范围分别是和 32.00%~46.89%, 24.41%~38.15%。坡上、坡中和坡下位置土质地埂土壤饱和持水量较其对照样地有显著差异, 分别增大 29.57%, 28.16%, 32.64%。

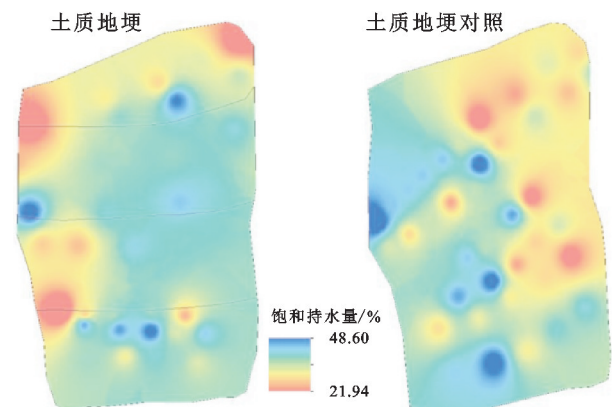


图 5 土质地埂及对照样地土壤饱和持水量空间分布
Fig. 5 Spatial distribution map of soil saturated water-holding capacity on soil ridge and control plot

土质地埂样地及其对照样地的土壤毛管持水量空间分布变化特征如图 7 所示。土质地埂样地及其对照样地的土壤毛管持水量随坡位的下降均无显著变化 ($p>0.05$), 变化范围是 23.31%~40.49% 和 20.87%~36.6%。坡上、坡中和坡下位置土质地埂样地的土壤毛管持水量较其对照样地分别增大 12.24%, 20.59%, 20.52%。

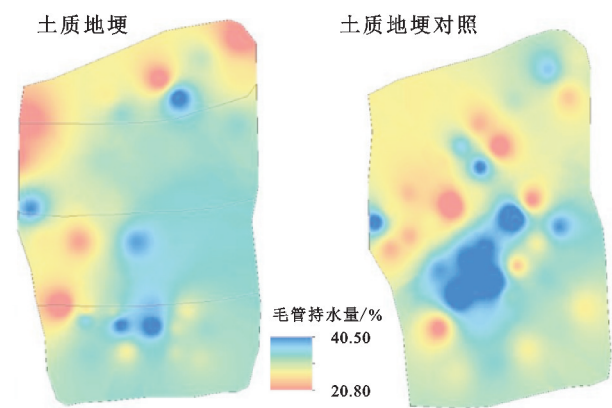


图 7 土质地埂及对照样地土壤毛管持水量空间分布
Fig. 7 Spatial distribution map of soil capillary water-holding capacity of soil terraces and control plots

土质地埂样地及其对照样地的土壤初渗率空间分布变化特征如图 9 所示。土质地埂样地及其对照样地的土壤初渗率随坡位的下降均无显著变化 ($p>0.05$), 变化范围是 0.19~15.37, 0.08~4.55 mm/min。坡上、坡中和坡下位置土质地埂样地的土壤渗透速率较其对照样地分别增大 127.27%, 96.65%, 46.99%。

土质地埂样地及其对照样地的土壤田间持水量空间分布变化特征如图 6 所示。土质地埂样地及其对照样地的土壤田间持水量随坡位的下降均无显著差异 ($p>0.05$), 变化范围分别是 23.57%~40.23%, 20.34%~36.24%。坡上、坡中和坡下位置土质地埂的土壤田间持水量较其对照样地显著增大 16.14%, 22.99%, 19.11%。

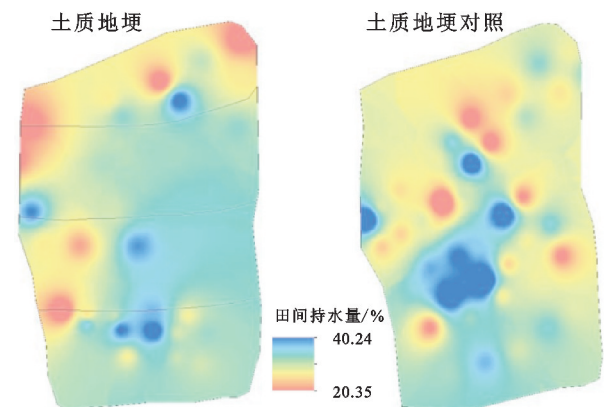


图 6 土质地埂及对照样地土壤田间持水量空间分布
Fig. 6 Spatial distribution map of soil water-holding capacity on soil ridge and control plot

2.3 土壤渗透性能的空间分布变化特征

土质地埂样地及其对照样地的土壤渗透速率空间分布变化特征如图 8 所示。土质地埂样地及其对照样地的土壤渗透速率随坡位的下降均无显著变化 ($p>0.05$), 变化范围是 0.08~7.00, 0.03~2.2 mm/min。坡上、坡中和坡下位置土质地埂样地的土壤渗透速率较其对照样地分别增大 129.38%, 104.46%, 24.74%。

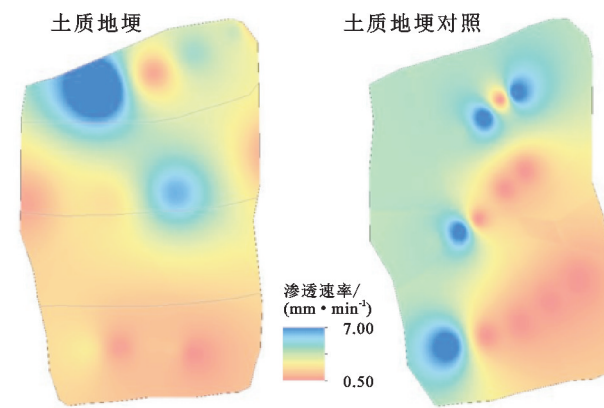


图 8 土质地埂及对照样地土壤渗透速率空间分布
Fig. 8 Spatial distribution map of soil permeability rate on soil ridge and control plot

土质地埂样地及其对照样地的水分渗透总量空间分布变化特征如图 10 所示。土质地埂样地及其对照样地的水分渗透总量随坡位的下降均无显著变化 ($p>0.05$), 变化范围是 1.85~288.1, 1.85~88.6 mm。坡上、坡中和坡下位置土质地埂样地的水分渗透总量较其对照样地分别增大 128.69%, 101.18%, 31.27%。

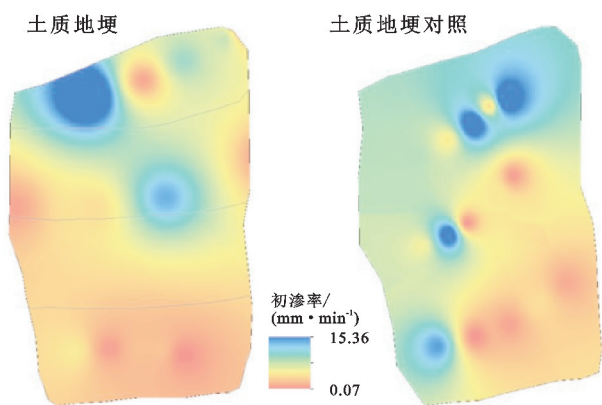
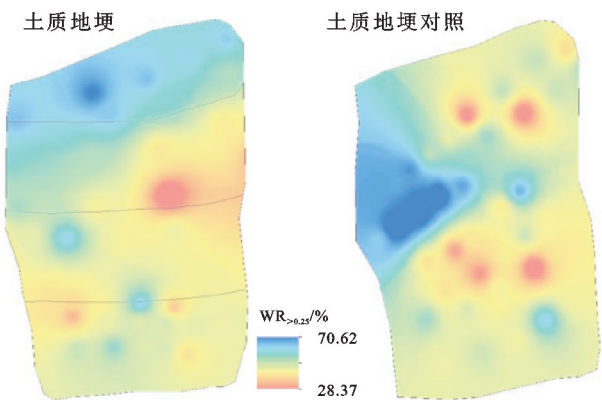


图 9 土质地埂及对照样地土壤初渗率空间分布

Fig. 9 Spatial distribution map of soil initial infiltration rate on soil ridge and control plot

2.4 土壤团聚体稳定性空间变化特征

土质地埂样地及其对照样地的 $WR_{>0.25}$ 空间分布变化特征如图 11 所示。土质地埂样地及其对照样地的 $WR_{>0.25}$ 均随坡位的下降显著减小 ($p \leq 0.05$), 变化范围是 40.56~70.63, 28.40~67.37 g, 对照样地 $WR_{>0.25}$ 的变化范围较土质地埂样地增大 29.6%。坡上、坡中和坡下位置土质地埂样地的 $WR_{>0.25}$ 较其对照样地显著增大

图 11 土质地埂及对照样地土壤 $WR_{>0.25}$ 空间分布Fig. 11 Spatial distribution map of soil ridge and control plot $WR_{>0.25}$

土质地埂样地及其对照样地的 GMD 空间分布变化特征如图 13 所示。土质地埂样地及其对照样地的 GMD 均随坡位的下降显著减小 ($p \leq 0.05$), 变化范围是 0.23~0.56, 0.19~0.42 mm。坡上、坡中和坡下位置土质地埂样地的 GMD 较其对照样地显著增大 29.68%, 17.34%, 14.51%。

土质地埂样地及其对照样地的 D 空间分布变化特征如图 14 所示。土质地埂样地及其对照样地的 D 均随坡位的下降显著增大 ($p \leq 0.05$), 变化范围是 2.7~2.87, 2.73~2.92, 对照样地 D 的变化范围较土质地埂样地增大 11.76%。坡上、坡中和坡下位置土质地埂样地的 D 较其对照样地减小 1.52%, 1.25%, 1.28%。

2.5 土质地埂对土壤物理性质的综合评价

土质地埂样地及其对照样地的土壤持水能力和土

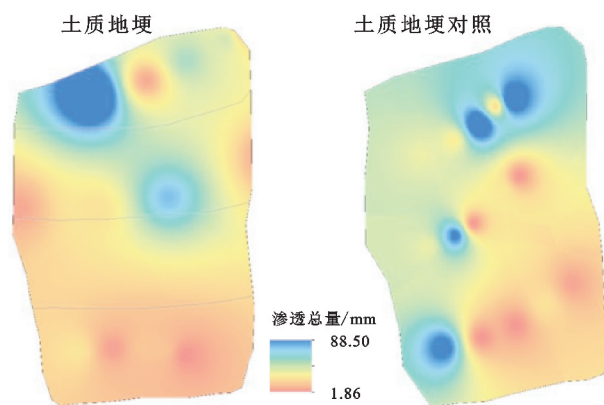


图 10 土质地埂及对照样地土壤水分渗透总量空间分布

Fig. 10 Spatial distribution map of soil water infiltration total amount on soil ridge and control plot

17.04%, 18.50%, 17.89%。

土质地埂样地及其对照样地的 MWD 空间分布变化特征如图 12 所示。土质地埂样地及其对照样地的 MWD 均随坡位的下降显著减小 ($p \leq 0.05$), 变化范围是 0.36~1.32, 0.27~0.86 mm。坡上、坡中和坡下位置土质地埂样地的 MWD 较其对照样地显著增大 39.99%, 26.79%, 14.42%。

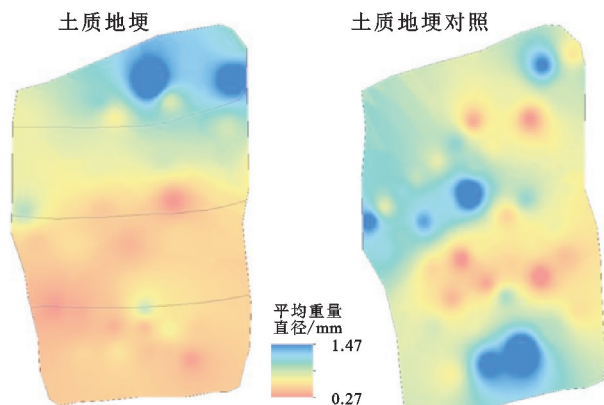


图 12 土质地埂及对照样地土壤 MWD 空间分布

Fig. 12 MWD spatial distribution map of soil ridge and control plot

壤结构综合得分如图 15 所示。土质地埂样地的容重、饱和持水量、MWD 与 D 的得分均高于土质地埂样地对照, 分别较对照样地高 105.27%, 95.23%, 84.34%, 106.69%, 而毛管孔隙度、含水率、毛管持水量、田间持水量、 $WR_{>0.25}$ 和 GMD 均低于土质地埂样地对照。修筑土质地埂后, 有效改善农田土壤物理性质, 且在土壤持水能力和土壤结构都有较高得分。

土质地埂样地及其对照样地不同坡位土壤物理性质和土壤结构综合得分如图 16 所示。土质地埂坡上位置饱和持水量、田间持水量、分形维数都有较高得分, 而坡中则在土壤孔隙度、MWD、GMD、 D 及饱和持水量有较高得分, 坡下位置在田间持水量、毛管持水量及土壤容重的得分较高; 土质地埂对照样地在坡上、坡中坡下位置的土壤持水能力指标有较高得分, 土壤结构得分较

低。土质地埂样地的坡上及坡中位置在土壤结构方面 有较高得分,而坡下位置在持水能力方面有较高得分。

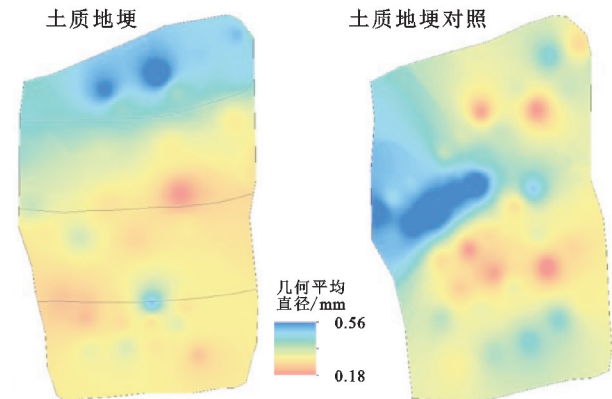


图 13 土质地埂及对照样地土壤 GMD 空间分布
Fig. 13 Spatial distribution map of soil GMD on soil ridge and control plot

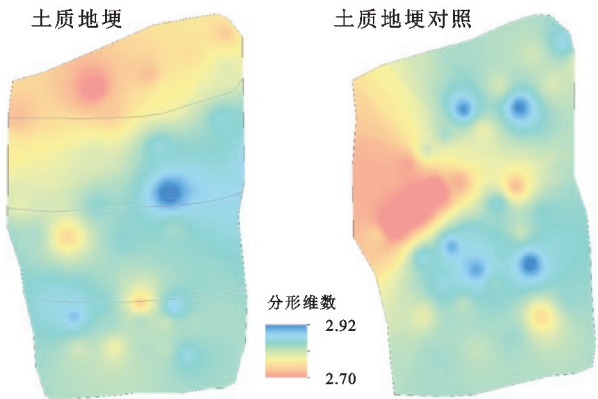


图 14 土质地埂及对照样地土壤 D 空间分布
Fig. 14 Spatial distribution map of soil D on soil ridge and control plot

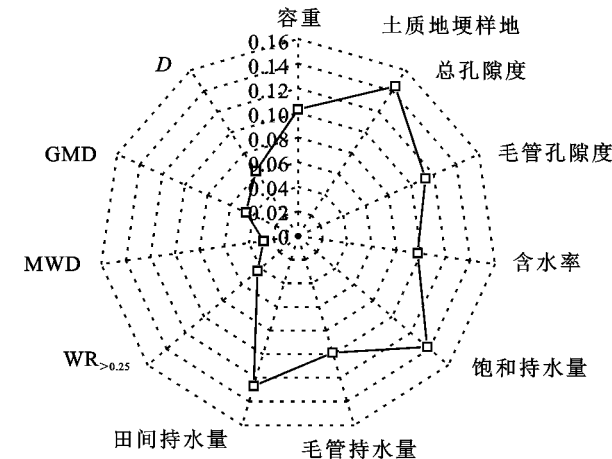


图 15 土质地埂样地及其对照样地综合评价
Fig. 15 Comprehensive evaluation of the sample plot and its control plot

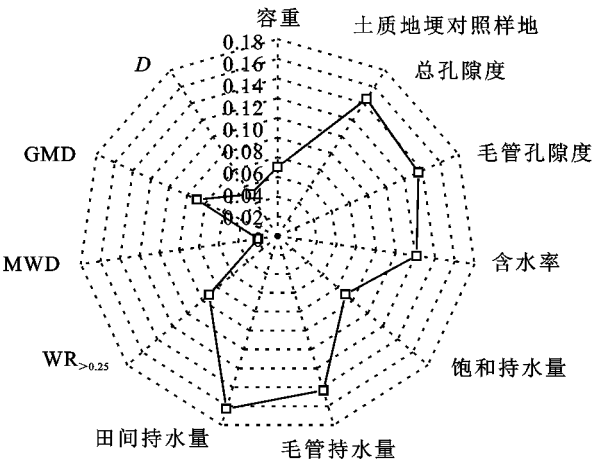


图 16 土质地埂样地及其对照样地不同坡位综合评价

Fig. 16 Comprehensive evaluation of different slope positions of soil ridge plot and its control plot

3 讨论

3.1 地埂对土壤持水能力的影响

本研究采用含水率、饱和持水量、田间持水量及毛管持水量来表征土壤持水能力。土壤持水能力即

土壤贮水及吸水情况,土壤贮水能力决定于毛管孔隙度,而田间持水量被认为是土壤所能稳定保持的最高土壤含水率,是对作物有效水的上限,常作为灌溉上限^[16]。本研究发现,修筑地埂的农田样地较无地埂的对照样地相比能有效改善土壤持水能力,修筑土质

地埂的样地主要影响了含水率、饱和持水量和田间持水量,较无地埂对照样地分别增加 7.89%,30.15%,19.41%。这与张杰^[17]、陈新军^[18]等的研究结果较为相似,其中张杰等^[17]的研究发现在坡面修筑水土保持措施能够有效改善土壤的持水能力,尤其修筑工程措施后土壤含水率显著提高了 1.74%,但其工程措施对土壤含水率提升幅度小于本研究的结果,原因有二,其一可能由于选取样地的土壤质地不同导致的,土壤质地在很大程度上决定了土壤的吸水特性^[19],影响土壤水分在土体内的运移和贮存量^[19];其二,张杰等^[17]的试验选取标准小区进行试验,而本研究是野外取样进行试验。

本研究中,修筑地埂的样地在不同坡位均有效影响其土壤持水能力,其中修筑土质地埂的样地在坡上位置主要影响了土壤饱和持水量及田间持水量,分别增大 29.57%,16.14%;坡中位置主要影响田间持水量和毛管持水量,较对照样地分别增大 22.99%,20.59%;而坡下位置对含水率、饱和持水量、毛管持水量及田间持水量都有较高的影响,分别增大 13.39%,32.64%,19.11%,20.52%。其可能原因是,修筑地埂后,可以改变地形坡度,拦蓄雨水,增加土壤水分,防止水土流失,达到保水、保土目的^[20]。且通过截短地面流线、分段拦蓄径流泥沙,引导降雨过程中产生的坡面径流在满足灌溉条件下排出坡面的过程^[21]。修筑地埂样地的土壤含水率在整个坡面的变化范围较无地埂对照样地减小 13.59%,且修筑地埂样地的土壤饱和持水量、毛管持水量及田间持水量较无地埂对照样地更均匀,其可能原因是修筑地埂后,改变了微地形地貌,也改变了地表覆盖情况,进而改变了坡面土壤水分物理性质,同时使得坡面径流过程及坡面水分循环、水量平衡状况发生了变化^[22]。

3.2 地埂对土壤结构特征的影响

本研究用土壤容重、土壤总孔隙度、 $>0.25\text{ mm}$ 土壤团聚体含量、平均重量直径、几何平均直径以及分形维数等指标来表征土壤结构特征。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^[23]。本研究发现,修筑土质地埂的样地较无地埂对照样地相比能有效改善土壤结构,且修筑土质地埂的样地在土壤容重、土壤孔隙度、平均重量直径、几何平均直径和分形维数等方面有较大影响,土质地埂样地的土壤容重和分形维数较无地埂对照样地分别减小 12.04%,0.58%,这表明修筑水土保持措施样地的土壤容重较无水土保持措施的对照样地偏小,这与王佳楠^[24]的研究结果一致。而土壤孔隙度、 $\text{WR}_{>0.25}$ 、平均重量直径、几何平均直径则分别

增大 14.02%,17.74%,28.48%,21.31%。这与包耀贤^[25]的研究结果较为相似,该研究发现修筑工程措施后土壤团聚体含量较对照坡耕地增大 39.14%。但包耀贤^[25]的研究中,修筑梯田后土壤团聚体含量的增幅均高于本研究,这可能是由于选取工程措施、地形以及土壤条件不同导致的,且包耀贤^[25]的研究中工程措施修筑年限为 30 a,本研究中土质地埂修筑年限为 11 a。此外,在张诗琦^[26]的研究中,修筑水土保持措施的水保林和梯田的分形维数分别较无措施的坡耕地减小 1.37%,0.52%,这与本研究结果较为相似,修筑水土保持措施后,分形维数均有所减小。

本研究中,随坡位的下降土壤容重、平均重量直径、几何平均直径和分形维数均逐渐降低,而土壤总孔隙度、 $\text{WR}_{>0.25}$,则均有所增大。其中土壤总孔隙度随坡位下降而逐渐增大,且在坡上、坡中及坡下位置,土质地埂样地的土壤总孔隙度较无措施对照样地分别增大 14.49%,9.75%,17.94%。这表明坡面修筑工程措施后,坡下土壤透气性更好,土壤更疏松,有利于降水的入渗,并且能有效改善土壤蓄水能力,有效控制水土流失^[27]。本研究中,土壤水稳性团聚体平均重量直径随坡位下降而减小,但修筑地埂措施的样地不同坡位土壤水稳性团聚体平均重量直径均高于无措施对照样地,分别增大 39.99%,26.79%,14.42%。这与张孝存等^[27]的研究结果一致,其原因可能是在一定范围内,随坡长增大,坡面径流量和土壤流失量增大^[27],所以无水土保持措施的坡耕地坡顶位置侵蚀不强烈团聚体稳定性相对较高,随着坡长增加,侵蚀作用加强^[28];而修筑水土保持措施后,改变微小地形,坡长减小,从而侵蚀作用减小。此外,本研究发现坡中位置的分形维数最大,为 2.83,均高于坡上和坡下位置,而坡上和坡下分形维数差异不显著。这与周萍等^[29]的研究有所不同,该研究发现修建地埂后不同坡位土壤的分形维数变化为坡上 $>$ 坡中 $>$ 坡下,这主要是由于周萍等^[29]的研究中修建地埂的坡耕地坡度为 15° ,高于本研究的地埂坡耕地($3^\circ\sim 4^\circ$)。但以上研究也表明,地埂措施能大程度上降低水土流失,通过对地表径流的滞缓、过滤和分散作用,进而减轻土壤侵蚀,阻止土壤颗粒的流失,防止地表径流冲刷性侵蚀作用^[30]。

4 结论

(1) 修筑地埂后,能显著提高土壤持水能力,其中土壤含水率、饱和持水量、田间持水量和毛管持水量分别提高 7.89%,30.15%,17.83%,19.41%;在坡上、坡中及坡下位置修筑地埂样地的土壤持水能力均

高于无措施对照样地,且随坡位的下降,土壤的持水能力也在逐渐增大。

(2) 修筑地埂后,土壤容重和分形维数分别降低12.04%、0.58%,而土壤总孔隙度、毛管孔隙度、 $WR_{>0.25}$ 、MWD、GMD分别增大14.02%、17.83%、17.74%、28.48%、21.31%。在坡上、坡中及坡下位置修筑地埂措施样地的土壤结构较无措施对照样地更好,尤其是坡上位置主要影响土壤总孔隙度、MWD、GMD和分形维数,坡中和坡下位置主要影响 $WR_{>0.25}$,较无措施对照样地增大18.5%、17.89%。这表明修筑地埂措施能有效改善土壤结构,增大土壤团聚体的稳定性,提高土壤抗侵蚀能力。

综上,坡耕地修筑水土保持措施后,能有效提高土壤持水能力,改善土壤结构,提高土壤水稳性团聚体含量,尤其在坡下位置更为明显。且修筑水土保持措施后,坡面土壤的物理性质更均匀,水土保持措施能有效拦蓄径流的冲刷,实现保水保土,使得坡面土壤更稳定。

参考文献(References):

- [1] 王岩松,姜艳艳,常诚,等.2018年度松辽流域水土流失动态监测结果分析[J].中国水土保持,2019(12):7-10,93.
Wang Y S, Jiang Y Y, Chang C, et al. Dynamic monitoring results of soil and water loss of Song-Liao River basin in 2018[J]. Soil and Water Conservation in China, 2019(12):7-10,93.
- [2] 齐智娟,张忠学,杨爱峥.黑土坡耕地几种水土保持措施的蓄水保土效应研究[J].水土保持研究,2011,18(5):72-75.
Qi Z J, Zhang Z X, Yang A Z. Benefit of soil and water conservation measures on sloping land of black soils[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011,18(5):72-75.
- [3] Li X Y, Shi Z Y, Xing Z H, et al. Dynamic evaluation of cropland degradation risk by combining multi-temporal remote sensing and geographical data in the Black Soil Region of Jilin Province, China[J]. Applied Geography, 2023,154:102920.
- [4] 张兴义,刘晓冰.中国黑土研究的热点问题及水土流失防治对策[J].水土保持通报,2020,40(4):340-344.
Zhang X Y, Liu X B. Key issues of mollisols research and soil erosion control strategies in China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(4):340-344.
- [5] 佚名.分区三:东北黑土区[J].中国水利,2009(7):25-29.
Anonymity.Division III: Black soil region in Northeast China[J]. China Water Resources, 2009(7):25-29.
- [6] 张瑜,徐子棋,杨献坤,等.东北黑土区山地丘陵区坡面水土保持措施效益研究[J].中国水土保持,2022(12):36-40.
- Zhang Y, Xu Z Q, Yang X K, et al. Study on benefit of soil and water conservation measures on slope in hilly region of black soil region in Northeast China[J]. Soil and Water Conservation in China, 2022(12):36-40.
- [7] 冯洋,郭成久,李勇,等.不同水土保持措施对黑土区坡耕地氮、磷流失的影响[J].水土保持研究,2014,21(3):47-50,56.
Feng Y, Guo C J, Li Y, et al. Effects of different soil and water conservation measures on soil nitrogen and phosphorus losses from sloping farmland in black soil region of Northeast China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014,21(3):47-50,56.
- [8] 金万鹏.典型黑土区坡耕地土壤性状及水土保持措施优化配置研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2020.
Jin W P. Study on Soil Character and Soil and Water Conservation Measures of Sloping Farmland in Typical Black Soil Area[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.
- [9] 王禹宸.黑土区埂带植物筛选及其效益评价[D].哈尔滨:东北农业大学,2015.
Wang Y C. The Selections of Earth Bund Plants and Their Benefit Evaluations in the Black Soil Region of Northeast China[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015.
- [10] Casa R, Lo Cascio B. Soil conservation tillage effects on yield and water use efficiency on irrigated crops in central Italy[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2008,194(4):310-319.
- [11] Sudhishri S, Dass A, Lenka N. Efficacy of vegetative barriers for rehabilitation of degraded hill slopes in eastern India[J]. Soil and Tillage Research, 2008,99(1):98-107.
- [12] Salvador-Blanes S, Cornu S, Couturier A, et al. Morphological and geochemical properties of soil accumulated in hedge-induced terraces in the Massif Central, France[J]. Soil and Tillage Research, 2006,85(1/2):62-77.
- [13] Cullum R F, Wilson G V, McGregor K C, et al. Runoff and soil loss from ultra-narrow row cotton plots with and without stiff-grass hedges[J]. Soil and Tillage Research, 2007,93(1):56-63.
- [14] 刘海翔,王浩宁,梁世兴,等.京西水源保护林不同坡位华北落叶松林土壤理化性质比较[J].林业勘查设计,2023,52(1):69-73,78.
Liu H X, Wang H N, Liang S X, et al. Comparison of soil physical and chemical properties of *Larix principis-rupprechtii* forests on different slopes of Jingxi water source protection forests[J]. Forest Investigation Design, 2023,52(1):69-73,78.
- [15] 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. Fractal characteristics of

- soil characterized by weight distribution of particle size[J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [16] 齐建波, 荣新民, 陈虎, 等. 不同水分胁迫水平对葡萄叶水势及生理指标的影响[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2011, 29(4): 437-441.
- Qi J B, Rong X M, Chen H, et al. Effect of different water stress quantity on leaf water potential and the physiological indexes of grape[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2011, 29(4): 437-441.
- [17] 张杰, 陈晓安, 汤崇军, 等. 典型水土保持措施对红壤坡地柑橘园水土保持效益的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 165-173.
- Zhang J, Chen X A, Tang C J, et al. Benefit evaluation on typical soil and water conservation measures in citrus orchard on red soil slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(24): 165-173.
- [18] 陈新军, 阮芬, 廉士增, 等. 沂蒙山区不同水土保持措施下土壤物理性状分析[J]. 中国水土保持, 2014(8): 30-32.
- Chen X J, Ruan F, Lian S Z, et al. Analysis of soil physical properties under different soil and water conservation measures in Yimeng Mountain area[J]. Soil and Water Conservation in China, 2014(8): 30-32.
- [19] 尹笑笑, 王东. 两种土壤质地麦田贮水量与表层土壤水分的关系[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(7): 841-853.
- Yin X X, Wang D. Relation of the soil water storage in a certain soil depth to the soil water content in the surface layer in two different soil texture wheat fields[J]. Journal of Triticeae Crops, 2018, 38(7): 841-853.
- [20] 徐晓莉. 黄坡小流域水土保持项目梯田设计研究[J]. 水利技术监督, 2023, 31(4): 135-137, 150.
- Xu X L. Study on terrace design of soil and water conservation project in Huangpo small watershed [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2023, 31(4): 135-137, 150.
- [21] 黄欢. 不同控制截排水布置方式下坡面产流-产沙过程的模拟研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- Huang H. Study on the Effects of Different Surface Water Drainage Patterns on the Characteristic of Run-off and Soil Loss under Simulated Rainfall Condition [D]. Chongqing: Southwest University, 2015.
- [22] 李亚龙, 张平仓, 程冬兵, 等. 坡改梯对水源区坡面产汇流过程的影响研究综述[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(4): 111-114.
- Li Y L, Zhang P C, Cheng D B, et al. A review study on the effect of slope fields into terrace on the runoff process in the water source area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(4): 111-114.
- [23] 黄修桥. 灌溉用水需求分析与节水灌溉发展研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2005.
- Huang X Q. Analysis on Water Use Demand for Irrigation and the Development of Water-Saving Irrigation [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2005.
- [24] 王佳楠. 东北复合侵蚀及理化性质对坡面水土保持措施配置的响应[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- Wang J N. Response of Complex Erosion and Physical and Chemical Properties in Northeast China to Soil and Water Conservation Measures on Slope[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.
- [25] 包耀贤. 黄土丘陵沟壑区坝地和梯田土壤理化性质研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2005.
- Bao Y X. Study on Soil Physical and Chemical Properties of Dam Land and Terrace in the Loess Hilly Region [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2005.
- [26] 张诗琦. 辽西地区不同水土保持措施对土壤理化性质影响分析[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- Zhang S Q. Soil and Water Conservation Measures on Soil Physical and Chemical Properties [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018.
- [27] 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.
- Zhang X C, Zheng F L, Wang B, et al. The relationships between aggregate water stability and soil organic matter of slope land with different reclamation years in black soil region[J]. Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition, 2011, 39(5): 90-95.
- [28] 魏天兴, 朱金兆. 黄土残源沟壑区坡度和坡长对土壤侵蚀的影响分析[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(1): 59-62.
- Wei T X, Zhu J Z. Effects of slope length and grade on soil erosion in the Gully Regions in Loess Plateau[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(1): 59-62.
- [29] 周萍, 文安邦, 严冬春, 等. 紫色土坡耕地不同坡位不同高度地埂土壤颗粒组成及分形特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 84-88, 93.
- Zhou P, Wen A B, Yan D C, et al. Particle distribution and fractal features of hedge soils with different hedge heights along the slope position of the purple sloping cultivated lands[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(2): 84-88, 93.
- [30] 王识然, 张琪, 崔佳慧, 等. 自然降雨条件下不同水土保持措施对坡耕地土壤侵蚀的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2023, 45(3): 359-364.
- Wang S R, Zhang Q, Cui J H, et al. Effects of different soil and water conservation measures on soil erosion of farmland under natural rainfall condition[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2023, 45(3): 359-364.