

DOI: 10.11766/trxb202212010665

黄怡婷, 陈俊熹, 高钰淇, 李馨月, 邹自强, 陈家宙. 长期耕作对典型黑土水力性质的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(4): 998–1008.  
HUANG Yiting, CHEN Junxi, GAO Yuhao, LI Xinyue, ZOU Ziqiang, CHEN Jiazhou. Effects of Long-term Tillage on Hydraulic Properties of Typical Black Soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(4): 998–1008.

## 长期耕作对典型黑土水力性质的影响\*

黄怡婷, 陈俊熹, 高钰淇, 李馨月, 邹自强, 陈家宙<sup>†</sup>

(华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

**摘要:** 为揭示长期耕作对黑土耕地水文退化的作用, 以典型黑土区不同纬度带的未经机械耕作的林地与长期耕作的耕地土壤进行对比, 研究沟垄耕作对土壤垂直和水平方向物理性质和水力性质的影响。结果表明: 长期耕作使得总体物理与土壤水力性质严重退化, 与林地土壤相比, 耕地土壤质地未发生变化, 有机质含量显著降低, 容重从 1.03 (0.84~1.17)  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  显著提高至 1.31 (1.20~1.46)  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 穿透阻力显著增加, 持水供水与导水性显著降低, 有效含水量从 0.19 (0.14~0.23)  $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$  降至 0.15 (0.10~0.21)  $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 。物理质量指数 S 值从 0.061 (优) 降至 0.025 (差)。长期沟垄耕作使得犁底层的饱和导水率 (6.61  $\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$ ) 仅为耕作层的 1/10。耕作导致耕作层垂直方向导水率 (64.67  $\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$ ) 低于水平方向 (82.84  $\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$ )。犁底层的穿透阻力 (897.04 kPa) 为耕作层的 1.89 倍, 造成了耕作层与犁底层水力性质分层。长期耕作导致的耕地土壤水力性质分层和方向分异是促进耕地坡面径流“沟渠效应”而加速侵蚀退化的重要原因。

**关键词:** 土壤水分; 典型黑土; 土壤物理性质; 土壤侵蚀; 饱和导水率

**中图分类号:** S152.7 **文献标志码:** A

## Effects of Long-term Tillage on Hydraulic Properties of Typical Black Soils

HUANG Yiting, CHEN Junxi, GAO Yuhao, LI Xinyue, ZOU Ziqiang, CHEN Jiazhou<sup>†</sup>

(College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** **【Objective】** Undisturbed woodland and cultivated land soils from vertical and horizontal directions were collected across different latitudes in typical black soil regions in Northeast China for this research. The objective was to investigate the effects of long-term tillage in cultivated land on the black soil hydrological degradation. **【Method】** Nine typical cultivated land units were selected across three latitudes, including Jiusan Farm Management Area in Nenjiang (48°46'N), Hailun (47°30'N), and Bayan County in Harbin (46°23'N). Intact soil cores were collected from 0-15 and 15-30 cm depths in vertical and horizontal directions to determine soil penetration resistance (SPR), and hydraulic properties (water retention and saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ )). **【Result】** Results showed that soil SPR significantly increased in cultivated land compared to woodland, and the SPR in tillage pan layer (15-30 cm) (897.04 kPa) was 1.89 times higher

\* 国家重点研发计划项目 (2021YFD1500703) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2021YFD1500703)

<sup>†</sup> 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jzchen@mail.hzau.edu.cn

作者简介: 黄怡婷 (2000—), 女, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤水文与土壤侵蚀研究。E-mail: ythuang@webmail.hzau.edu.cn

收稿日期: 2022-12-01; 收到修改稿日期: 2023-09-24; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-10-24

than that in woodland. Soil hydraulic properties also significantly decreased in cultivated land, whose soil available water decreased to  $0.15 (0.10-0.21) \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  compared to  $0.19(0.14-0.23) \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  in woodland. Using soil physical quality index S to assess the over black soil quality showed that S value decreased from excellent  $0.061 (0.041-0.094)$  in woodland to poor  $0.025 (0.009-0.040)$  in cultivated land. The degradation of cultivated land quality was attributed to the significant reduction in soil organic matter content and significant increase in soil bulk density ( $1.31 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  in cultivated land vs.  $1.03 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  in woodland). Long-term ridge tillage resulted in a 10 times reduction in  $K_s$  in tillage pan layer ( $6.61 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ), and this can be attributed to the disruption of balance between tillage and tillage pan layer and enlargement of magnitude difference for  $K_s$  and bulk density between two layers. Tillage resulted in a lower  $K_s$  in the vertical direction ( $64.67 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ) than in the horizontal direction ( $82.84 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ) in the tillage layer. The  $K_s$  decreased in a larger degree in the vertical direction and less degree in the horizontal direction. Thus, this heterogeneity of  $K_s$  in directions interfered the original water movement direction in tillage layer. The low hydraulic conductivity of the plough pan tends to accumulate precipitation and produce lateral interflow. 【Conclusion】 Generally, long-term tillage has severely degraded the physical and hydraulic properties of the soil. The huge difference of soil compactness and  $K_s$  between the tillage layer and plough pan produced an artificially stratified soil in cultivated land. The limitation of water infiltration is a dominant reason for the "furrow effect" in cultivated land.

**Key words:** Soil water; Typical black soil; Soil physical properties; Soil erosion; Saturated hydraulic conductivity

我国东北的黑土区是世界上四大仅有的黑土区之一,是中国重要的大粮仓<sup>[1]</sup>。黑土区耕地面积  $18.3 \text{ 万 km}^2$ ,占整个东北典型黑土区的  $1/3$ <sup>[2-3]</sup>,自然黑土较肥沃,但在开垦后,经历了轮耕休耕期、人畜低强度利用期和机械化高强度利用期,用养失调和土壤侵蚀使得黑土逐渐出现了物理、化学和生物等性质变化,黑土出现不同程度的退化<sup>[4]</sup>,外在表现为变瘦、变薄、变硬等多个方面,其中机械耕作直接导致土壤水力性质恶化,加剧了坡耕地土壤侵蚀。

为了减少土壤侵蚀和增加土壤温度,黑土区多采用沟垄耕作。沟垄耕作是通过机械作业在坡耕地上沿等高线开犁形成沟和垄台,进而将作物播种在垄台上的一种耕作模式,是改善表层土壤物理属性和水文属性,影响农田系统水文学的主要因子之一<sup>[5-7]</sup>。虽然沟垄耕作能提高产量<sup>[8]</sup>,但同时沟垄耕作改变了地表的微地形,潜在助力侵蚀沟发生<sup>[9]</sup>。东北黑土区主要使用大型机械进行沟垄耕作,长期耕作后对耕地土壤性质和作物生长的影响是人们普遍关注的一个重要问题。关于黑土的研究表明,使用机械进行耕作很容易破坏高黏土和高含水量的农田生态系统的土壤结构,对土壤产生的影响不仅直接降低了黑土的持蓄水能力,还大大降低了土壤耕性,限制作物根系的生长和发育,造成一系列土壤物理性质的退化,不同程度的压实会促使不同深度的土壤各径级孔隙之间体积的转化<sup>[10]</sup>,影响降雨的

入渗,更易产生地表径流,加剧土壤侵蚀。大型机械的犁耕深度可以超过  $25 \text{ cm}$  甚至  $45 \text{ cm}$ <sup>[11]</sup>,这就造成了长缓坡地形条件下由耕作方式所引起的土壤侵蚀更加剧烈,有研究指出等高垄作在坡耕地产生地表径流汇集而冲毁垄台的“沟渠效应”,促进了黑土耕地侵蚀沟的发育<sup>[12]</sup>。

有关黑土耕作的研究主要集中于探究不同耕作方式的相对优缺。相较于传统耕作,深松降低土壤紧实度<sup>[13]</sup>;秸秆覆盖免耕能改善并稳定土壤结构,提高土壤持水蓄水能力<sup>[14]</sup>;垄作措施有助于改善土壤结构,尤其是能显著增强黑土团聚体的稳定性<sup>[15]</sup>。已有的研究很少关注长期机械沟垄耕作整体行为对黑土耕地水力性质的影响,无法评估耕作对黑土耕地水力性质退化(从而加剧土壤侵蚀)的定量作用。土壤水力性质是决定土壤水分状况和土壤水分运动过程的关键因子<sup>[16]</sup>,例如,土壤垂直方向的导水率影响降水入渗和土体储水深度,水平方向的导水率影响沟垄产流和坡下位壤中流<sup>[17]</sup>,它们综合起来决定了坡耕地的土壤水文过程,最终影响作物水分利用和侵蚀动力,但目前还没有专门研究长期沟垄耕作对黑土水力性质影响的文献。因此,本研究通过将典型黑土区长期耕作的耕地与未经耕作的林地的土壤进行对比,研究沟垄耕作后对土壤垂直和水平方向造成的穿透阻力、导水性能以及持水性能等变化,揭示长期耕作对黑土水力性质的影响,以期为

黑土地保护提供科学参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验区属于典型黑土区,从北往南选择嫩江市九三农场管理区(48°46'N)、海伦市(47°30'N)、哈尔滨市巴彦县(46°23'N)等三个纬度的典型农田单元为研究对象。三个纬度带南北跨度 300 km,分别代表了典型黑土区的北部、中部和南部,平均海拔分别为 320 m、230 m 和 170 m,是典型的漫岗地形,土地大多被开垦为农田,长期进行机械沟垄耕作,种植作物以玉米和大豆轮作为主,一年一熟。每个纬度带内分别选取地形坡度平均为 1%、2%和 3%的三个代表性农田单元,总共 9 个农田单元,以其中的村庄命名,按坡度顺序为所在嫩江市九三农场管理区的荣军农场、鹤山农场与尖山农场(48°45'52"~48°49'98"N, 125°10'69"~125°24'51"E),海伦市的南阳村、东兴村与大成村(47°17'51"~47°31'27"N, 126°54'75"~127°7'66"E),哈尔滨市巴彦县的望山村、洪广村与前冯炉屯(46°22'10"~46°23'89"N, 126°57'47"~127°11'31"E)。三个纬度区域的开垦时间:巴彦县 1862 年招垦,1954 年开始使用拖拉机(巴彦县志);海伦县 1898 年开垦,1955 年建农场大规模开垦(海伦农场志,海伦县志);嫩江 1931 年日本开拓团开垦,1955 年建立农场大规模开垦(嫩江农场史)。

### 1.2 土壤样品采集与现场测量

在上述三个纬度区域的哈尔滨市望山村、嫩江市鹤山农场与海伦市大成村的代表性农田单元,采集垂直和水平两个方向的原状环刀土样,分别在林地和耕地两种不同的土地利用方式的农田进行,样品采集时间为 2022 年 4 月中旬到 6 月中旬。一为流域内未进行长期耕作的林地,将林地土壤划分为 0~15 cm 和 15~30 cm 两层;二为流域内长期耕作的耕地,将垄台土壤划分为 0~15 cm 耕作层和 15~30 cm 犁底层两层。取样坡位为坡中,其中林地和耕地两块地相连,地形一致,取样点在相同的坡位仅相距数十米,分别在上述土层的垂直、水平两个方向取三个环刀原状土样品。三个纬度区域分别取 12 个林地环刀原状土样品和 12 个耕地环刀原状土

样品,并取 1 kg 农化分析土样。三个纬度区域的其余 6 个代表性农田单元旁均无与耕地相连林地,只采集了耕地土壤样品。分别取坡中耕地 0~15 cm、15~30 cm 两个层次的垂直方向的三个环刀原状土样,每地共取 6 个,并在同一深度下取 1 kg 农化分析土样。

上述 9 个代表性农田单元均进行原位土壤穿透阻力测量。测定时间为 2022 年 5 月中旬到 6 月中旬,该时段为融雪春耕后,各地土壤含水量较高,田间现场测量的穿透阻力可以相互比较。在各个测量点使用 SC900 土壤紧实度仪,在深 30 cm 土壤中每增加 2.5 cm 得到一个穿透阻力数据,将得到的数据分为 0~15 cm 土层和 15~30 cm 土层两组分别统计,并以农田单元所处区域合并统计。

### 1.3 土壤基本理化性质测定

农化分析土样风干过 2 mm 筛后,采用沉降法测定土壤颗粒组成,外加热法测定土壤有机质含量,环刀烘干称重法测定土壤容重。饱和后的原状环刀土样,通过离心机在不同吸力下(0、10、30、50、100、300、500 和 1 500 kPa)得到不同含水量,在对应的不同含水量下,使用 WG-I 型微型贯入仪在环刀样品表面用探针贯入 10 mm,停止贯入时即得到实测值,重复两次,得到的贯入阻力值经换算得出土壤穿透阻力。

探针贯入对样品表面破坏较小,可以忽略不计其造成的局部压实。将穿透阻力与土壤性质(土壤含水量、容重)之间的数据进行拟合<sup>[18]</sup>,公式如下:

$$PR = a\rho^b\theta^c \quad (1)$$

式中,PR 为穿透阻力, kPa;  $\rho$  为土壤容重,  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;  $\theta$  为含水量,  $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ ; a、b、c 分别为三个模型参数<sup>[19]</sup>。

### 1.4 土壤水分特征曲线测定

将土壤原状样品饱和后,用离心机法<sup>[20]</sup>测定土壤水分特征曲线。在 RETC 软件中采用 van Genuchten 模型<sup>[21]</sup>对水分特征曲线测定值进行拟合,得到最优拟合参数。将土壤水分特征曲线中 33 kPa 吸力下的土壤含水量作为土壤田间持水量,1 500 kPa 吸力下的土壤含水量作为萎蔫含水量,最大有效含水量是二者的差值。土壤物理质量参数 S 为土壤水分特征曲线在拐点的斜率<sup>[22]</sup>,反映了土壤综合物理

性状,  $S \geq 0.050$  为优,  $0.050 \geq S \geq 0.035$  为良,  $0.035 \geq S \geq 0.020$  为差,  $S < 0.020$  为极差。计算公式如下:

$$S = -n(\theta_s - \theta_r) \left[ \frac{2n-1}{n-1} \right]^{\left[ \frac{1}{n} - 2 \right]} \quad (2)$$

式中,  $n$ 、 $\theta_s$ 、 $\theta_r$  为土壤水分特征曲线拟合参数。 $n$  为形状参数, 无量纲;  $\theta_s$  为饱和含水量,  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $\theta_r$  为残余含水量,  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

### 1.5 土壤饱和导水率测定与非饱和导水率计算

环刀原状样品采用定水头法<sup>[23]</sup>测定土壤饱和导水率 ( $K_s$ ); 结合土壤水分特征曲线, 使用 RETC 软件中 VG-Mualem 模型计算非饱和导水率, 公式如下:

$$K(\theta) = K_s S_e^l \left[ 1 - (1 - S_e^{n/(n-1)})^{1-1/n} \right]^2 \quad (3)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

式中,  $K(\theta)$  为非饱和导水率,  $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $S_e$  为有效饱和度;  $K_s$  为饱和导水率,  $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $l$  为形状因子, 取 0.5, 无量纲。

### 1.6 数据处理

采用 SPSS 25.0 对土壤容重、有机质、颗粒组成、穿透阻力、饱和导水率、饱和含水量、田间持水量、有效含水量、萎蔫含水量等数据进行单因素方差分析, 显著性水平为 0.05, 并进行数据统计, 计算平均值、标准差、标准误差等。图中曲线数据为平均值±标准差 (一个标准差, 以阴影部分表示), 表中数据为平均值±标准误差。使用 Origin Pro 2021 软件作图。

## 2 结果

### 2.1 土壤基本理化性质

由表 1 所示, 耕地 0~30 cm 的土壤容重在 1.20~1.46  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$  之间, 嫩江市耕地各层次容重最大

表 1 林地和耕地不同层次土壤剖面基本理化性质

Table 1 Characterization of soil profile at different layer of woodland and cultivated land

区域 Region	土地利用方式 Land use	土壤层次 Soil layer /cm	土壤容重 Bulk density / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	有机质 Organic matter / ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	颗粒组成 Particle composition/%			土壤质地 Soil texture
					<0.002 mm	0.002~0.02 mm	>0.02 mm	
嫩江	林地 (n=12)	0~15	1.16±0.034c	55.79±4.38a	30.37±1.28a	46.99±2.12a	22.64±1.10c	黏壤土
Nenjiang	Woodland	15~30	1.17±0.024c	52.88±5.73b	27.71±1.47c	44.97±2.94b	27.32±2.55b	黏壤土
	耕地 (n=24)	0~15	1.38±0.011b	47.24±2.61c	29.90±2.40b	43.55±3.11b	26.55±4.07b	黏壤土
Hailun	Cultivated land	15~30	1.46±0.020a	48.03±2.18c	27.15±2.56c	42.94±4.87b	29.91±3.93a	黏壤土
	林地 (n=12)	0~15	0.84±0.017c	45.77±2.67a	30.66±2.34c	48.47±1.97a	20.87±1.28b	黏壤土
Hailun	Woodland	15~30	0.87±0.006c	47.13±1.69a	33.78±1.85a	45.29±2.45b	20.93±1.66b	黏壤土
	耕地 (n=24)	0~15	1.20±0.026b	39.51±2.03b	32.55±1.86b	46.75±1.87ab	20.70±1.49b	黏壤土
Hailun	Cultivated land	15~30	1.28±0.024a	40.86±2.38b	32.91±2.34b	45.11±1.57b	21.98±1.27a	黏壤土
	林地 (n=12)	0~15	1.05±0.012c	41.34±2.88a	30.02±1.54b	48.88±1.03a	22.10±2.09ab	黏壤土
Harbin	Woodland	15~30	1.08±0.021b	43.22±1.56a	31.47±1.34a	47.65±1.96a	20.88±1.57c	黏壤土
	耕地 (n=24)	0~15	1.21±0.036a	32.36±2.53b	31.20±2.07ab	46.32±2.06b	22.48±2.49a	黏壤土
Harbin	Cultivated land	15~30	1.31±0.082a	33.90±2.01b	30.81±1.54c	48.05±1.58a	21.14±2.18bc	黏壤土

注: 同列不同字母表示不同地区间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。Note: Different letters in the same column indicate significant differences between different regions ( $P < 0.05$ ). The same as below.

( $1.38 \sim 1.46 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ), 其次是哈尔滨与海伦, 三地平均值为  $1.31 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 显著高于林地  $0 \sim 30 \text{ cm}$  平均土壤容重  $1.03 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  ( $0.84 \sim 1.17 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )。耕地土壤容重远大于林地对应土层,  $0 \sim 15 \text{ cm}$  耕作层 ( $1.26 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) 较林地增大了  $0.25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;  $15 \sim 30 \text{ cm}$  犁底层增加幅度为  $0.27 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。从质地上来看, 耕作没有使质地整体发生变化。但耕地土壤有机质含量显著低于林地。

各地的实地含水量均很高, 接近田间持水量, 因此实地测量的土壤穿透阻力可以直接进行比较。虽然各地土壤穿透阻力有很大差异 (图 1), 但均呈现耕层土壤的穿透阻力低于同地区犁底层,  $0 \sim 15 \text{ cm}$  层的穿透阻力普遍在  $0 \sim 500 \text{ kPa}$ , 其中哈尔滨 > 海伦 > 嫩江;  $15 \sim 30 \text{ cm}$  层则在  $500 \sim 1500 \text{ kPa}$ 。各地犁底层的平均穿透阻力 ( $897.04 \text{ kPa}$ ) 为耕作层的 1.89 倍, 海伦平均穿透阻力要略大于哈尔滨。根据 (1) 拟合得到穿透阻力与含水量的关系曲线, 以及不同容重下的曲线分布 (图 2)。含水量较高时, 耕地与林地土壤穿透阻力相当 (甚至低于林地土壤), 但随着含水量降低, 耕地土壤的穿透阻力增加速度大于林地土壤, 说明干旱时耕地土壤穿透阻力大于林地。在相同的  $1.1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  容重下, 含水量为  $0.30 \text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$  附近为耕地土壤穿透阻力超过林地土壤的转折点, 容重为 1.3 与  $1.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  时则分别约为  $0.31$  和  $0.33 \text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 。当含水量为  $0.50 \text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$  时,

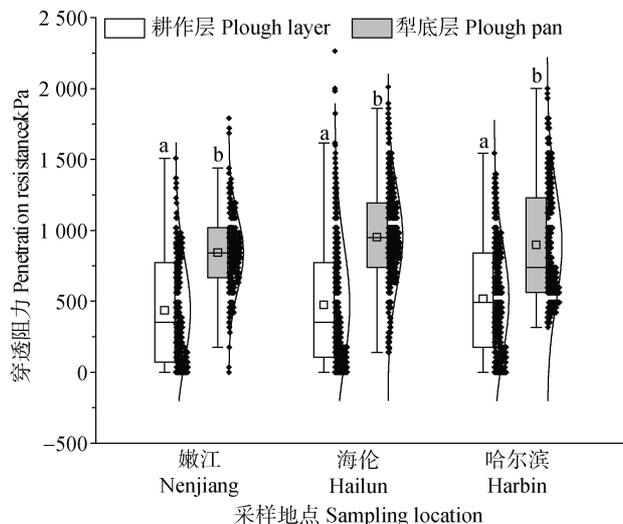


图 1 耕地土壤  $0 \sim 15 \text{ cm}$  耕作层和  $15 \sim 30 \text{ cm}$  犁底层的穿透阻力

Fig. 1 Penetration resistance of  $0 \sim 15 \text{ cm}$  plough layer and  $15 \sim 30 \text{ cm}$  plough pan in cultivated land

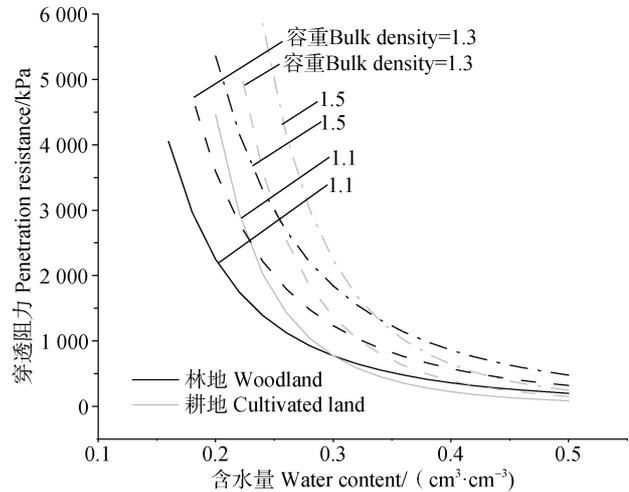


图 2 不同容重与含水量下林地和耕地的穿透阻力曲线

Fig. 2 Penetration resistance curves of woodland and cultivated land under different bulk density and water content

容重从  $1.1$  增至  $1.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 耕地与林地的穿透阻力增幅分别为  $160$  和  $280 \text{ kPa}$ 。当含水量降至  $0.3 \text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$  时, 耕地的穿透阻力增幅 ( $1460 \text{ kPa}$ ) 为林地土壤的 1.4 倍。这些数据表明耕地土壤的力学性质退化明显。

### 2.2 土壤持水和供水性能

从嫩江土壤水分特征曲线形状看 (图 3), 林地土壤的曲线较陡, 含水量范围更大, 显示其是具有良好结构 (孔隙分布) 的土壤, 而耕地的曲线较平, 含水量范围更小, 显示其是结构退化的土壤。其余两地均表现与嫩江同一差异 (表 2)。林地土壤的持水和供水性能较好, 具体还表现在 van Genuchten 模型的参数和土壤水分常数上 (表 2~表 3): 整体上林地  $n$  值略大于耕地; 两种土壤差异主要表现在林地的参数  $\alpha$  远大于耕地。 $\alpha$  为土壤进气值的倒数, 反映大孔隙状况, 耕地  $\alpha$  较小, 土壤大孔隙较少。林地垂直方向的  $\alpha$  平均为  $0.58 \text{ cm}^{-1}$ , 高于水平方向 ( $0.4 \text{ cm}^{-1}$ ), 耕地垂直方向 ( $0.27 \text{ cm}^{-1}$ ) 较水平方向高  $0.23 \text{ cm}^{-1}$ 。各地林地土壤最大有效含水量平均为  $0.19 \text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$  ( $0.14 \sim 0.23 \text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ ), 耕地为  $0.15 \text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$  ( $0.10 \sim 0.21 \text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ )。耕地垂直与水平方向的最大有效含水量没有显著差异, 但其均显著低于林地垂直 ( $0.18 \sim 0.20 \text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ ) 与水平 ( $0.16 \text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ ) 方向上的最大有效含水量。上述土壤水分性质最终在土壤物理质量 S 指标上得到体现, 嫩江的耕地 S 均值 ( $0.029 \pm 0.002$ ) 为差, 而林地 S 均值

( $0.050 \pm 0.006$ ) 为优；海伦的耕地 S 均值 ( $0.77 \sim 0.94$ ) 为优，而林地 S 均值 ( $0.33 \sim 0.34$ ) 为良；哈尔滨耕地 S 均值 ( $0.012 \pm 0.003$ ) 为极差，而林

地均值 ( $0.046 \pm 0.005$ ) 为良。三地耕地 S 均值为差 ( $0.025$ )，而林地 S 均值为优 ( $0.061$ )，反映了耕地土壤物理性质总体退化严重。

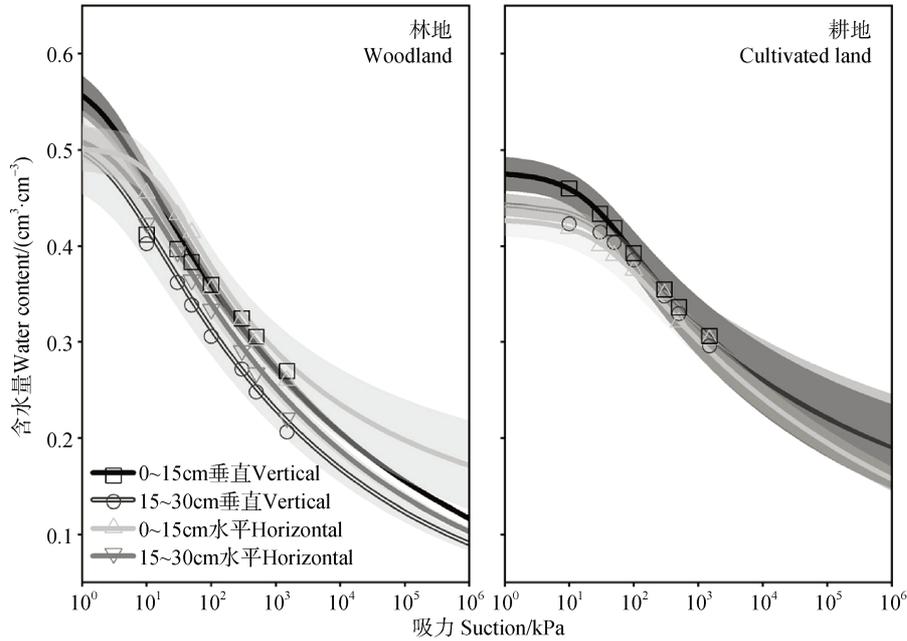


图 3 林地与耕地的土壤水分特征曲线

Fig. 3 Soil water characteristic curve of woodland and cultivated land

表 2 林地、耕地土壤水力学特性参数

Table 2 Soil hydraulic characteristic parameters of woodland and cultivated land

区域 Region	土地利用方式 Land use	土壤层次 Soil layer /cm	$\alpha$ /cm <sup>-1</sup>	$n$	$\theta_r$ /(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	$\theta_s$ /(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	FC /(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	WP /(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	AWHC /(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )
嫩江 Nenjiang	林地 Woodland	0~15	0.55±0.199	1.13±0.009	0.00±0.000	0.56±0.006a	0.41±0.011a	0.24±0.005b	0.17±0.011a
		15~30	0.58±0.298	1.14±0.008	0.00±0.000	0.47±0.004b	0.35±0.004c	0.21±0.003c	0.14±0.001b
	耕地 Cultivated land	0~1	0.36±0.049	1.10±0.011	0.00±0.000	0.44±0.038c	0.29±0.016d	0.17±0.002d	0.12±0.016c
		15~30	0.17±0.031	1.07±0.088	0.00±0.000	0.44±0.039c	0.37±0.028b	0.27±0.014a	0.10±0.013d
海伦 Hailun	林地 Woodland	0~15	0.89±0.034	1.16±0.018	0.00±0.000	0.57±0.009a	0.41±0.057a	0.18±0.007b	0.23±0.006a
		15~30	0.77±0.040	1.15±0.007	0.00±0.000	0.51±0.008b	0.38±0.045a	0.18±0.009b	0.20±0.017a
	耕地 Cultivated land	0~15	0.30±0.065	1.19±0.051	0.02±0.012	0.49±0.009c	0.31±0.013b	0.19±0.016b	0.21±0.008a
		15~30	0.52±0.163	1.09±0.004	0.00±0.000	0.49±0.013c	0.40±0.015a	0.26±0.008a	0.14±0.010b
哈尔滨 Harbin	林地 Woodland	0~15	0.37±0.022	1.27±0.045	0.04±0.013	0.53±0.003a	0.40±0.017b	0.20±0.006b	0.20±0.009a
		15~30	0.32±0.018	1.21±0.010	0.00±0.000	0.50±0.012ab	0.37±0.016b	0.18±0.011c	0.19±0.011b
	耕地 Cultivated land	0~15	0.12±0.023	1.23±0.035	0.01±0.009	0.47±0.009b	0.29±0.012c	0.20±0.009b	0.19±0.016b
		15~30	0.11±0.011	1.11±0.033	0.00±0.000	0.52±0.032a	0.45±0.018a	0.30±0.035a	0.15±0.005c

注： $\alpha$  为土壤进气值倒数， $n$  为持水曲线形状参数， $\theta_r$  与  $\theta_s$  分别为残余含水量与饱和含水量，FC 为田间持水量，WP 为萎蔫点，AWHC 为最大有效含水量。Note:  $\alpha$  is the inverse of soil air entry value,  $n$  is the shape parameters of water retention curve,  $\theta_r$  and  $\theta_s$  are residual and saturated water content respectively, FC is field capacity, WP is wilting point and AWHC is available water holding capacity.

表 3 林地、耕地不同层次与取样方向土壤水力学特性参数

Table 3 Soil hydraulic characteristic parameters of different layers and sampling directions of woodland and cultivated land

土地利用方式 Land use type	取样方向 Sampling direction	土壤层次 Soil layer /cm	$\alpha$ /cm <sup>-1</sup>	$n$	$\theta_r$ / ( cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	$\theta_s$ / ( cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	FC / ( cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	WP / ( cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	AWHC / ( cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )
林地 (n=18)	垂直	0~15	0.61±0.101	1.19±0.043	0.00±0.000	0.55±0.018a	0.41±0.003ab	0.21±0.018c	0.20±0.011a
Woodland	Vertical	15~30	0.55±0.098	1.18±0.022	0.00±0.000	0.49±0.010b	0.37±0.009bc	0.19±0.001d	0.18±0.004b
	水平	0~15	0.05±0.041	1.23±0.066	0.10±0.000	0.50±0.023ab	0.42±0.006a	0.26±0.084b	0.16±0.021bc
	Horizontal	15~30	0.30±0.085	1.13±0.004	0.00±0.000	0.52±0.040ab	0.38±0.005b	0.22±0.008c	0.16±0.027bc
	耕地 (n=18)	垂直	0~15	0.26±0.072	1.17±0.038	0.01±0.000	0.47±0.015c	0.30±0.007c	0.19±0.009d
Cultivated land	Vertical	15~30	0.27±0.014	1.09±0.012	0.08±0.060	0.48±0.023c	0.41±0.023ab	0.28±0.014a	0.13±0.017c
	水平	0~15	0.04±0.011	1.11±0.004	0.00±0.000	0.42±0.009c	0.38±0.005b	0.26±0.002b	0.12±0.010c
	Horizontal								

注:  $\alpha$  为土壤进气值倒数,  $n$  为持水曲线形状参数,  $\theta_r$  与  $\theta_s$  分别为残余含水率与饱和含水量, FC 为田间持水量, WP 为萎蔫点, AWHC 为最大有效含水量。Note:  $\alpha$  is the inverse of soil air entry value,  $n$  is the shape parameters of water retention curve,  $\theta_r$  and  $\theta_s$  are residual and saturated water content respectively, FC is field capacity, WP is wilting point and AWHC is available water holding capacity.

### 2.3 土壤饱和与非饱和导水率

从图 4a 可以看到,虽然各地土壤饱和导水率差异较大,但总体上,林地饱和导水率均显著大于耕地,均值 (221.13 cm·d<sup>-1</sup>) 为耕地的 3.05 倍,其中海伦林地的导水率较耕地高 213.71 cm·d<sup>-1</sup>。不仅如此,耕作对导水率的影响差异导致林地和耕地分别在两个方向与两个层次均有不同的表现 (图 4b)。垂直方向上林地 0~15 cm 层土壤导水率为 15~30 cm 层土壤的两倍,而耕地 0~15 cm 层土壤导水率 (64.67 cm·d<sup>-1</sup>) 为 15~30 cm 层土壤 (6.61 cm·d<sup>-1</sup>) 的 10 倍;水平方向林地 0~15 cm 层土壤 (117.72 cm·d<sup>-1</sup>) 较 15~30 cm 层 (172.92 cm·d<sup>-1</sup>) 小 55.2 cm·d<sup>-1</sup>,而耕地 0~15 cm 层土壤为 15~30 cm 层的 5.69 倍,呈现出了相反差异。耕地同一层次水平方向的导水率均要大于其垂直方向,0~15 cm 层水平方向较垂直方向大 18.17 cm·d<sup>-1</sup>,15~30 cm 层水平方向为垂直方向的 2.2 倍,林地在 15~30 cm 层也出现了水平方向大于垂直方向的情况,但差异没有耕地明显。这些结果表明耕作降低了土壤的导水率,垂直方向受耕作的影响更大,降至更低,因此耕地更易产生横向水流。

非饱和导水率对土壤供水和作物吸水非常重要。由图 5 非饱和导水率曲线可知,土壤水吸力为 0~33 kPa 时林地较耕地导水率高;33 kPa 后导水率大幅

下降,但耕地较林地下降速率小。开始干旱时,100 kPa 吸力耕地各层次平均非饱和导水率约为 0.01 cm·d<sup>-1</sup>,约为林地土壤的三分之一;当吸力达 300 kPa 时,此吸力已经开始限制植物根系的水分供应,耕地的非饱和导水性仍较林地差,导水率是林地土壤的 28%。各个层次来看,林地以垂直方向的非饱和导水率下降更为迅速,同样的规律也表现在了耕地上。

## 3 讨论

本研究针对林地土壤与长期进行机械耕作的耕地土壤进行比较,通过二者各项性质差异分析得出,长期的机械耕作导致土壤紧实,改变土壤的理化性质,使土壤结构变差,减弱了土壤的持水性和导水性,物理质量显著退化。对于长期耕作的三个地区,嫩江虽然开垦时间最短,但土壤容重最大,导水率最小。嫩江纬度最大冬季最长,融雪解冻较其他两地缓慢,地块受冻融侵蚀的影响最大,并且田块隶属农场,很早就开始了集体大型机械耕作。耕作层与犁底层土壤结构差别相对最大的是哈尔滨,这可能是由于哈尔滨的开垦年限相对较长,长期沟垄耕作使得土壤分层退化。海伦未长期耕作的林地保水性与导水性最好,经过近七十年左右的开垦,土壤水力性质严重退化。

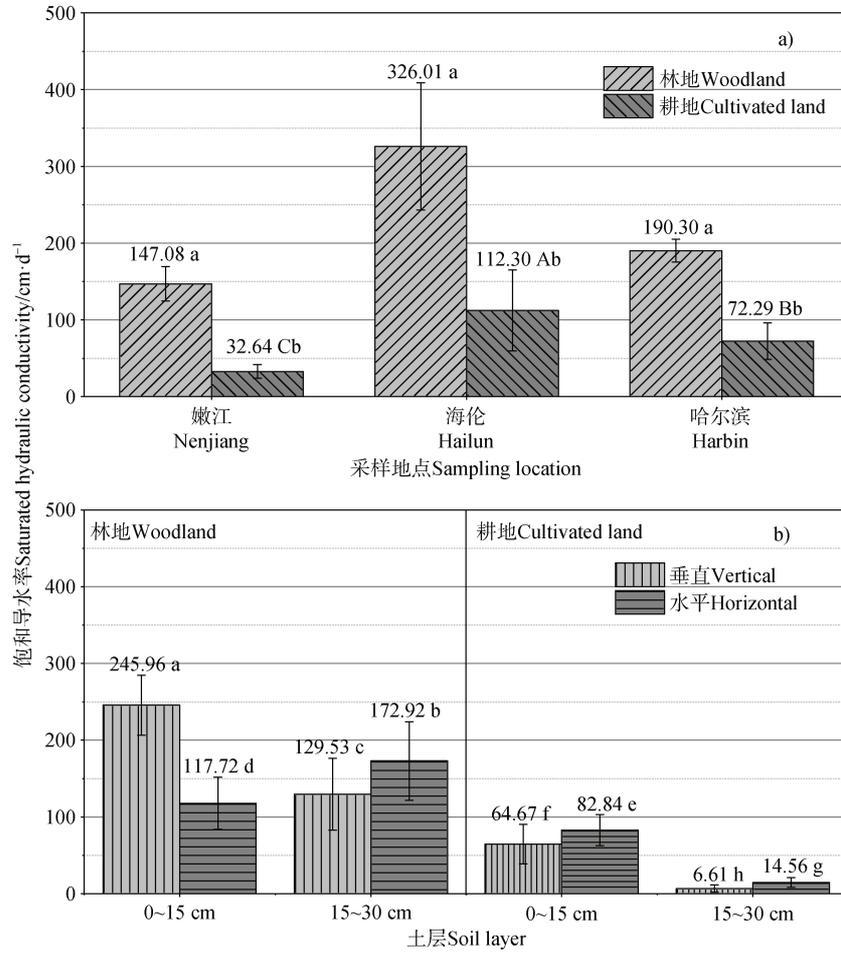


图 4 林地和耕地的土壤饱和导水率

Fig. 4 Soil saturated hydraulic conductivity of woodland and cultivated land

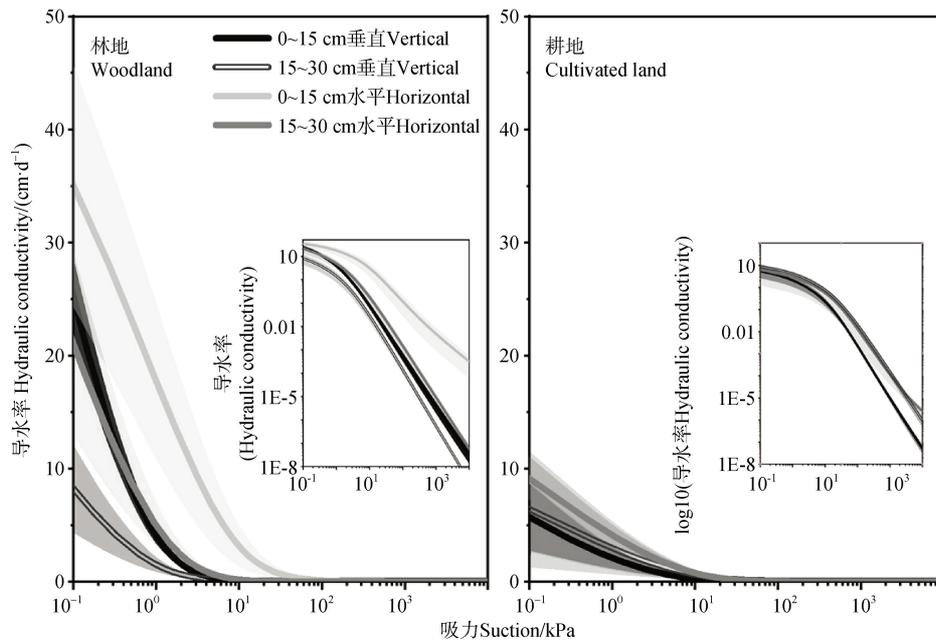


图 5 林地和耕地的非饱和导水率曲线

Fig. 5 Unsaturated hydraulic conductivity curves of woodland and cultivated land

耕作使土壤结构变差只是一方面影响, 本文发现, 另一方面还造成了耕地土壤的力学性质和导水率分层。在耕作的影响下土壤被分为两层, 土壤的表层一般是在耕翻的影响下的活土层, 称为耕作层; 耕作层以下土壤受耕作器具压实影响<sup>[23-24]</sup>, 导致土壤容重增加形成较为紧实的土层犁底层<sup>[25-26]</sup>。本文结果显示 0~15 cm 表层和 15~30 cm 的亚表层在水力学性质上表现出极大的差异。虽然一定厚度的耕层和犁底层有利于水分保持, 但在集约式耕作下, 大型农机具的大范围使用, 耕地土壤不断被碾压, 这样一定厚度的耕作层和犁底层之间的平衡遭到破坏, 两个层次的差异(特别是导水率与容重)不断扩大, 人为造成了土壤性质在层次之间的差异<sup>[27]</sup>。研究表明<sup>[28-29]</sup>, 层状土壤水分运动明显不同于均质土壤, 主要表现为土壤分层界面处存在毛管障碍, 其一维垂向入渗过程中实际渗透率仅为理论值的 20.5%, 特别是当犁底层渗透能力较差时, 耕地整体土层的渗透率只有犁底层渗透率的 33.5%, 渗透率的显著降低减少了水分的下渗并促进了水分在上层的储存, 导致产生更多的地表径流<sup>[30]</sup>。田间土壤的水分运动状态又与地表径流的产生相互影响与联系<sup>[31]</sup>, 这有利于超渗产流从而产生地表侵蚀。同时, 东北黑土区主要采用大豆-玉米轮作, 大豆与玉米是黑土区的支柱作物, 玉米根系最深可以分布到 200 cm 土层<sup>[32]</sup>, 对于 15 cm 深度以下大孔隙分布量极少的黑土而言, 对植物的根系发育有很大的制约。

耕地土壤除了水分性质和力学性质分层, 耕作还导致黑土导水率在方向上出现异化。林地土壤的垂直方向的导水率显著大于水平方向上的导水率, 这利于降水入渗, 而耕作层却相反, 耕作层水平方向的导水率大于垂直方向的导水率, 表明长期耕作扰乱了原有土壤的水分运动。这是因为水平方向为机械犁耕的行走方向, 在耕作层易造成土壤结构体在水平方向堆垒, 水平方向有结构体之间的大孔隙; 而在犁底层, 水平方向的耕作和压实形成紧实的片状结构, 这种变化不仅不利于土壤水分下渗反而利于地表产流, 特别利于耕作层与犁底层之间产生浅层侧向壤中流<sup>[33]</sup>, 例如田块犁底层的存在会抑制水流的垂直运动, 减少深层渗漏, 但同时增强了水流沿耕作层侧向运动的能力<sup>[34]</sup>, 促进耕层土壤侵蚀, 也促进侵蚀沟发

育。沟垄耕作通过对微地形改造, 增加了地面粗糙度, 延长水分下渗时间<sup>[35]</sup>, 抑制径流及土壤冲刷, 减少了水土流失, 这是其好的一方面; 但另一方面, 垄沟中的土壤最紧实, 加之垄沟本身属于局部凹陷, 容易聚集降水径流, 在垄沟中聚集的水分较在垄台上更难下渗, 提高了整个田块的径流系数, 加大了地表径流的冲刷力, 从而加剧土壤侵蚀甚至促进耕地浅沟发育, 这也是沟垄耕作产生“沟渠效应”<sup>[36]</sup>的原因之一。

根据调查, 就本研所在地之一的嫩江而言, 虽然作物只是一年一熟, 但大型农机具一年下地作业可达 8 次。4 月至 5 月的整地、播种、整压与深松, 6 月打药并施肥, 9 月的收割, 收割后起垄, 完成这 8 次作业基本均依赖于大型农机具<sup>[37-40]</sup>。为了抢农时, 大型机具可能会在不适合的土壤水分条件下作业, 更容易破坏土壤结构。例如, 有些年份 4 月施肥播种期土壤仍然在融雪解冻, 此时土壤含水量高(坡下位和低洼地方地表甚至有积水), 不是宜耕期, 大型农机具压在湿土上将发生“排水固结”作用(即在外压力作用下土壤孔隙水排出, 孔隙被压缩而土壤固结的现象), 土壤更容易被压实。由于农场土地面积大, 每台机具要完成的任务大, 难以做到所有田块均在宜耕期作业, 不合理的耕作是黑土耕地变硬的重要原因。因此, 优化种植环节减少作业次数, 减小田块面积和加强水利设施建设, 促进地势低洼区域排水, 在宜耕期下地作业, 是当前黑土耕地管理要考虑的问题。

## 4 结 论

长期耕作使得土壤物理与水力性质严重退化。与未进行机械耕作的林地土壤相比, 耕地有机质含量降低, 质地未发生变化, 但容重显著提高, 穿透阻力增加, 导水性与持水供水性显著降低, 有效含水量大幅度降低, 土壤物理质量指数 S 值从“优”退化为“差”。耕作层和犁底层之间的平衡遭到破坏, 两个层次的差异在导水率与容重方面不断扩大, 造成了耕地土壤的耕作层与犁底层在紧实度和导水率的分层, 人为造成了土壤性质在层次之间的差异。耕作使导水率在垂直方向降低更多, 而水平方向降低少, 耕层土壤导水率大小在方向上的异化扰乱了原有土壤的水分运动方向; 犁底层导水率

低，容易聚集降水而产生侧向壤中流；垄沟中的土壤导水率极低，水分无法下渗是促进“沟渠效应”的重要原因。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Chinese Academy of Sciences. White Paper on Northeast Black Land (2020) [R]. Beijing, 2021. [中国科学院. 东北黑土地白皮书 (2020) [R]. 北京, 2021.]
- [ 2 ] Yang W W, Zhang X P, Wang H Y. Study on soil and water loss and prevention technology of sloping land in blackland in the northeast[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12 (5): 232—236. [杨文文, 张学培, 王洪英. 东北黑土区坡耕地水土流失及防治技术研究进展[J]. *水土保持研究*, 2005, 12 (5): 232—236.]
- [ 3 ] Liu B Y, Zhang G L, Xie Y, et al. Delineating the black soil region and typical black soil region of northeastern China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66 (1): 96—106. [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.]
- [ 4 ] Chen X W, Zhang X P, Liang A Z, et al. Effects of tillage mode on black soil's penetration resistance and bulk density[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23 (2): 439—444. [陈学文, 张晓平, 梁爱珍, 等. 耕作方式对黑土硬度和容重的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23 (2): 439—444.]
- [ 5 ] Qi Z, Ding C, Han X, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture and nutrients in valley-slope erosion watershed in black soil area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40 (5): 79—87, 96. [祁志, 丁超, 韩兴, 等. 沟坡侵蚀汇水区黑土水分和养分的空间异质性[J]. *水土保持通报*, 2020, 40 (5): 79—87, 96.]
- [ 6 ] Shi X H, Yang X M, Drury C F, et al. Impact of ridge tillage on soil organic carbon and selected physical properties of a clay loam in southwestern Ontario[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 120: 1—7.
- [ 7 ] Álvarez-Mozos J, Campo M Á, Giménez R, et al. Implications of scale, slope, tillage operation and direction in the estimation of surface depression storage[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 111 (2): 142—153.
- [ 8 ] Gómez J A, Guzmán M G, Giráldez J V, et al. The influence of cover crops and tillage on water and sediment yield, and on nutrient, and organic matter losses in an olive orchard on a sandy loam soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 106 (1): 137—144.
- [ 9 ] Yang Z, Liu X G, Ning J, et al. Effects of gully erosion on soil nutrients in ridge area of typical black soil[J]. *Soils*, 2017, 49 (2): 379—385. [杨子, 刘晓光, 宁静, 等. 典型黑土垄作区耕地沟蚀对土壤养分的影响研究[J]. *土壤*, 2017, 49 (2): 379—385.]
- [ 10 ] Lin L, Shan B, Lu Q Q, et al. Water retention characteristics and pore size distribution of black soil under simulated mechanical compaction[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2014, 42 (12): 102—105. [林琳, 单博, 卢倩倩, 等. 模拟机械压实黑土持水特征与孔隙分布[J]. *东北林业大学学报*, 2014, 42 (12): 102—105.]
- [ 11 ] Wang Y L, Li J. Study of tillage patterns suitable for soil physicochemical properties and crop yields in wheat/maize fields[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20 (5): 1139—1150.
- [ 12 ] Meng L Q, Li Y. The mechanism of gully development on sloping farmland in black soil area, northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23 (1): 7—11, 44. [孟令钦, 李勇. 东北黑土区坡耕地侵蚀沟发育机理初探[J]. *水土保持学报*, 2009, 23 (1): 7—11, 44.]
- [ 13 ] Zhang B W, Yang Y M, Zhang X L, et al. Effects of continuous deep loosening on soil physical characteristics, organic carbon content and carbon pool index in black soil[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2019 (2): 6—13. [张博文, 杨彦明, 张兴隆, 等. 连续深松对黑土结构特性和有机碳及碳库指数影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2019 (2): 6—13.]
- [ 14 ] Qi J T, Tian X L, Liu K, et al. Soil water infiltration under mulch tillage affected by maize stovers returning in black soil areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37 (1): 141—147. [齐江涛, 田辛亮, 刘凯, 等. 黑土区覆混耕作中玉米秸秆还田对土壤水分入渗性能的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37 (1): 141—147.]
- [ 15 ] Zhang X Y, Li J Y, Guo M J, et al. Effects of straw mulching and no tillage for continuous 14 years on soil and water conservation in mollisols sloping farmland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36 (3): 44—50. [张兴义, 李健宇, 郭孟洁, 等. 连续 14 年黑土坡耕地秸秆覆盖免耕水土保持效应[J]. *水土保持学报*, 2022, 36 (3): 44—50.]
- [ 16 ] Qiao J B, Zhu Y J, Jia X X, et al. Development of pedotransfer functions for soil hydraulic properties in the critical zone on the Loess Plateau, China[J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32 (18): 2915—2921.
- [ 17 ] Wang L, Zheng F L, Shi H Q, et al. Impacts of seepage flow and soil thaw depth on hillslope snowmelt erosion in Chinese Mollisol region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32 (12): 4177—4185. [王伦, 郑粉莉, 师宏强, 等. 壤中流和土壤解冻深度对黑土坡面融雪侵蚀的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32 (12): 4177—4185.]
- [ 18 ] da Silva A P, Kay B D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61 (3): 877—883.
- [ 19 ] Bouma J, Lanen. Transfer functions and threshold values: from soil characteristics to land qualities[J]. *Quantified Land Evaluation*, 1986, 6: 106—110.
- [ 20 ] Xing X G, Liu Y, Garg A, et al. An improved genetic algorithm for determining modified water-retention model for biochar-amended soil[J]. *Catena*, 2021, 200: 105—143.

- [ 21 ] van Genuchten M T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44 ( 5 ): 892—898.
- [ 22 ] Dexter A R, Czyz E A. Applications of S-Theory in the study of soil physical degradation and its consequences[J]. Land Degradation & Development, 2007, 18 ( 4 ): 369—381.
- [ 23 ] Reynolds W D, Elrick D E. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the  $\alpha$ -parameter using the Guelph permeameter[J]. Soil Science, 1985, 140 ( 4 ): 292—302.
- [ 24 ] Håkansson I, Voorhees W B, Riley H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes[J]. Soil and Tillage Research, 1988, 11 ( 3/4 ): 239—282.
- [ 25 ] Gao J S, Guo J J, Cui H N, et al. Effects of breaking plow pan thoroughly or partially on agronomic traits and yield of summer maize in the northern region of Huang-Huai-Hai Plain[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2018, 50 ( 3 ): 36—40.[高建胜, 郭建军, 崔慧妮, 等. 黄淮海北部农田犁底层不同破除程度对夏玉米农艺性状及产量的影响[J]. 山东农业科学, 2018, 50 ( 3 ): 36—40.]
- [ 26 ] Tu A G. Advances in water infiltration and solute transport in layered soil[J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2017, 39 ( 4 ): 818—825.[涂安国. 层状土壤水分入渗与溶质运移研究进展[J]. 江西农业大学学报, 2017, 39 ( 4 ): 818—825.]
- [ 27 ] Cho K W, Song K G, Cho J W, et al. Removal of nitrogen by a layered soil infiltration system during intermittent storm events[J]. Chemosphere, 2009, 76 ( 5 ): 690—696.
- [ 28 ] Wang W Y, Zhang J F, Wang Z R, et al. Infiltration reduction effect of sand layer in loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36 ( 6 ): 650—655 [王文焰, 张建丰, 汪志荣, 等. 砂层在黄土中的减渗作用及其计算[J]. 水利学报, 2005, 36 ( 6 ): 650—655]
- [ 29 ] Ren L D, Huang M B, Fan J. Study on water retention capacity for drained soils with different textural layering[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 ( 19 ): 105—111.[任利东, 黄明斌, 樊军. 不同类型层状土壤持水能力的研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29 ( 19 ): 105—111.]
- [ 30 ] Zhang C, Jiang J S, Wang R B, et al. Influences of rainfall unsaturated infiltration on the change of heat transfer in soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36 ( 18 ): 118—126.[张超, 姜景山, 王如宾, 等. 降雨非饱和入渗对土壤热量运移变化的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36 ( 18 ): 118—126.]
- [ 31 ] Wang Q J, Liu F, Jiao F, et al. Effects of deep tillage on water characteristics and dynamic changes of black soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49 ( 4 ): 942—948.[王秋菊, 刘峰, 焦峰, 等. 深耕对黑土水分特征及动态变化影响[J]. 土壤通报, 2018, 49 ( 4 ): 942—948.]
- [ 32 ] Schenk H J, Jackson R B. Mapping the global distribution of deep roots in relation to climate and soil characteristics[J]. Geoderma, 2005, 126 ( 5 ): 129—140.
- [ 33 ] Tao Y, Zou Z Q, Guo L, et al. Linking soil macropores, subsurface flow and its hydrodynamic characteristics to the development of Benggang erosion[J]. Journal of Hydrology, 2020, 586: 124829.
- [ 34 ] Shao D G, Yang X, Xu B L, et al. Field experiment and simulation of lateral and vertical water flow in multi-layer soil in hilly region of southern China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48 ( 7 ): 799—807.[邵东国, 杨霞, 徐保利, 等. 南方丘陵区多层土壤结构水平和垂向渗流特征试验与模拟研究[J]. 水利学报, 2017, 48 ( 7 ): 799—807.]
- [ 35 ] Hu G R, Wang Q, Song X Y, et al. Effects of ditch covering materials on soil temperature, crop yield and water use efficiency of ridge and ditch rainwater harvesting[J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture, 2016, 24 ( 5 ): 590—599.[胡广荣, 王琦, 宋兴阳, 等. 沟覆盖材料对垄沟集雨种植土壤温度、作物产量和水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24 ( 5 ): 590—599.]
- [ 36 ] She D L, Zhang Y, Shao M A. Improved design of locally compacted ridge-furrow fertilizing machine [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24 ( 4 ): 151—154.[余冬立, 张勇, 邵明安. 成垄压实耕作施肥机械的改进设计[J]. 农业工程学报, 2008, 24 ( 4 ): 151—154.]
- [ 37 ] Meng L Q. Study on gully erosion mechanism and prevention mode in black soil area of Northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.[孟令钦. 东北黑土区沟蚀机理及防治模式的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.]
- [ 38 ] Liu H H, Zhang T Y, Liu B Y, et al. Effects of gully erosion and gully filling on soil depth and crop production in the black soil region, northeast China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 68 ( 6 ): 1723—1732.
- [ 39 ] Zhou Y L, Lu B F. Mechanical compaction of black soil: Impact on soil structure and sugar beet yield[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35 ( 32 ): 84—88.[周艳丽, 卢秉福. 黑土机械压实对土壤结构和甜菜产量的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35 ( 32 ): 84—88.]
- [ 40 ] Wang E H, Chai Y F, Chen X W. Effects of heavy machinery operation on the structural characters of cultivated soils in black soil region of Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19 ( 2 ): 351—356.[王恩姮, 柴亚凡, 陈祥伟. 大机械作业对黑土区耕地土壤结构性特征的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19 ( 2 ): 351—356.]

(责任编辑: 檀满枝)