中国农业大学学报 2023,28(2):135-146
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

白岗栓,邹超煜,冯光惠,李志熙,边利强,边利军.激光平地对河套灌区土壤水分入渗及秋浇质量的影响[J].中国农业大学学报,2023,28(02):134-146.
BAI Gangshuan, ZOU Chaoyu, FENG Guanghui, LI Zhixi, BIAN Liqiang, BIAN Lijun. Effects of laser land leveling on soil moisture infiltration and autumn irrigation quality in Hetao irrigation area[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(02): 134-146.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2023.02.12

激光平地对河套灌区土壤水分入渗及秋浇质量的影响

白岗栓[1,2] 邹超煜[3] 冯光惠[4] 李志熙[4] 边利强[5] 边利军[6]

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;
2.中国科学院/水利部 水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;
3.吉安市湿地管理中心,江西 吉安 343000;
4.陕西榆林学院 生命科学学院,陕西 榆林 719000;
5.磴口县水利局,内蒙古 磴口 015200;
6.乌兰布和灌域管理局 沙区灌溉试验站,内蒙古 磴口 015200)

摘 要 为促进激光平地的推广应用和提高秋浇质量,以内蒙古河套灌区普通农田为对照,测定激光平地对农田土壤容重、土壤孔隙度、土壤水分入渗速率和秋浇质量等的影响。结果表明:激光平地主要影响0~10 cm土层土壤容重、土壤总孔隙度和毛管孔隙度,显著降低0~30 cm土层土壤非毛管孔隙度,但对10~30 cm土层土壤容重、土壤总孔隙度和毛管孔隙度则无显著影响;激光平地显著降低了土壤水分稳定入渗速率,秋浇水量可减少25.93%;激光平地后,农田的灌溉水流速率较快且较一致,田面储水深度较浅且均一,水流消退速率较低且较均匀。综上,建议河套灌区应积极开展激光平地,以节约灌水量并提高秋浇质量。

关键词 激光平地; 土壤容重; 土壤孔隙; 土壤水分入渗速率; 灌溉质量

中图分类号 S222.5+1;S152.3 **文章编号** 1007-4333(2023)02-0135-12 **文献标志码** A

Effects of laser land leveling on soil moisture infiltration and autumn irrigation quality in Hetao irrigation area

BAI Gangshuan[1,2], ZOU Chaoyu[3], FENG Guanghui[4], LI Zhixi[4], BIAN Liqiang[5], BIAN Lijun[6]

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;
2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences/Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;
3. Ji'an Wetland Management Center, Ji'an 343000, China;
4. College of Life Science, Yulin University, Yulin 719000, China;
5. Dengkou Water Resources Bureau, Dengkou 015200, China;
6. Sandy Area Irrigation Experiment Station, Ulanbuh Irrigation Field Adminstration, Dengkou 015200, China)

Abstract In order to promote the popularization and application of laser land leveling technology and improve autumn irrigation quality, compared with ordinary farmland, the effects of laser land leveling on soil bulk density, soil porosity, soil moisture infiltration rate and autumn irrigation quality in laser land leveling farmland in Hetao irrigation area of Inner Mongolia were measured. The results showed that: Laser land leveling mainly affected soil bulk density, soil total porosity and capillary porosity in 0-10 cm soil layer, and significantly decreased air-filled porosity porosity in 0-30 cm soil layer, but had no significant effects on soil bulk density, soil total porosity and capillary porosity in 10-30 cm soil layer. Laser land leveling significantly reduced the stable infiltration rate of soil moisture and reduced irrigation amount

收稿日期:2022-05-26
基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0501602);陕西省科技厅重点研发计划(2019TSLNY03-03);榆林市科技局产学研(2019-88-1)
第一作者:白岗栓(ORCID:0000-0001-5579-6032),研究员,主要从事果树栽培与农田生态研究,E-mail:gshb@nwsuaf.edu.cn

of autumn irrigation by 25.93%. In laser land leveling farmland, the irrigation water rate of autumn irrigation was faster and more consistent, the field water storage depth was shallow and uniform, and the water recession rate was lower and more consistent. In conclusion, laser leveling should be actively developed in Hetao irrigation area to save irrigation amount and improve autumn irrigation quality.

Keywords laser land leveling technology; soil bulk density; soil porosity; soil moisture infiltration rate; irrigation quality

内蒙古河套灌区光热资源丰富,土地资源辽阔,是亚洲最大的自流灌区,但近年来农业用水日趋紧缺[1-3]。河套灌区农田受多年灌溉和泥沙淤积等的影响,平整度较差,灌溉均匀度低,土壤盐渍化严重[2-3],不利于作物生长[2-5]。秋浇是河套灌区特有的一种灌溉形式,是在秋季作物收获后土壤封冻前进行的灌溉,目的是通过灌溉将土壤表层的盐分淋溶到深层土壤或地下水中,同时促进土壤保持足够的水分,确保春季播种时土壤中的水分和盐分能够满足种子正常发芽和幼苗生长发育[6-7]。秋浇时若灌溉量大,除浪费水资源外,还会造成地下水位升高,翌年春季耕种时土壤潮塌和返浆,造成耕种困难或不能及时耕种,同时大量的地表水蒸发会引起土壤盐渍化;若灌溉水量偏少,则难以淋溶表层土壤盐分,造成翌年春季土壤水分不足及土壤盐分较高,影响种子发芽和幼苗生长[6-7]。合理的秋浇水量,是保证河套灌区春季正常耕种的前提[6-7]。激光平地结合了激光精准控制技术和常规机械平地技术,能够大幅度提高农田平整度,减少灌溉量,提高灌溉质量与效率,防止土壤盐渍化,提高土壤水肥利用效率,提高作物产量[8-16],近年来已在各地试验和推广[17-23]。相关试验结果表明,激光平地能有效降低河套灌区农田的灌水量,降低土壤盐分,提高秋浇质量和土壤水分利用效率[2-3, 6-7]。土壤容重、土壤孔隙度和土壤水分入渗速率等除受成土母质等影响外,还受排灌、耕作、施肥和土地平整度等人为因素的影响。土壤容重和土壤孔隙度不仅影响土壤水分的保持、养分的供应和气体的交换过程,而且影响有机质的矿化与累积[24-25];土壤水分入渗过程和入渗能力不但影响降水及灌溉水、地表水、土壤水和地下水的相互转化,而且影响降雨或灌溉进程中分配到土壤中的储水量和地表的径流量[26-27]。然而,有关激光平地对河套灌区农田土壤容重、土壤孔隙度和土壤水分入渗速率的影响未见报道,因此,本研究以激光平地后的农田为研究对象,采用田间定位监测的方法,测定和分析激光平地对河套灌区土壤容重、孔隙度和水分入渗及秋浇质量的影响,以期为激光平地在河套灌区的推广应用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况及激光平地机

试验地位于河套灌区的磴口县坝楞村,东经106°98′,北纬40°33′,海拔1 048.7 m,年均降雨量142.7 mm,蒸发量2 381.8 mm。试验地土壤为灌於土,地下水位在100～150 cm,灌淤层100 cm左右。试验地耕层(0～30 cm)土壤有机质含量为11.0 g/kg,碱解氮182.45 mg/kg,速效磷16.75 mg/kg,速效钾158.21 mg/kg,耕层田间持水率23.23%,凋萎系数7.48%。耕层土壤主要盐分为氯化物-硫酸盐,含量为1.0 g/kg左右。0～80 cm土层土壤容重较一致,平均为1.48 g/cm^3[2-3]。

试验地为长50.0 m,宽24.0 m,面积0.12 hm^2,土壤理化性质和肥力基本一致的相邻两块农田。秋季作物收获后经水准仪测定,平整度(平整度为田块内所有地形测点处地面相对高程的标准偏差值S_d,S_d越小,田地的平整度越高)分别为5.98和5.42 cm,均表现为进水口区域的田面较高,尾部的较低。对平整度为5.98 cm的地块采用由激光平地系统(美国)、农用拖拉机(904)和平地铲组成的激光平地机,从畦尾进入试验地,然后从进水口区域开始,实施无纵横坡激光平地作业,作业后其平整度为1.62 cm。激光平地机中的农用拖拉机自重为4 600 kg,平地铲为2 300 kg。土壤封冻前对两块农田以畦灌的方式进行秋浇,当水流锋面与尾部地埂完全接触后及时停止灌溉。

1.2 试验设计及监测项目

1.2.1 试验设计

试验以普通农田为对照,秋浇前分段测定激光平地后农田的土壤容重、土壤孔隙度和土壤水分入渗速率,秋浇时测定灌水量、水流速率、田面储水深度和水流消退速率等。

1.2.2 测定内容和方法

秋浇前在农田进水口区域、中部区域和尾部区域各选 3 个采样点(图 1)，以 10 cm 为 1 层，用容积为 100 cm^3 的环刀分别采取耕层原状土各 3 个，然后加盖滤纸、底网和底盖，带回试验室内，用环刀法测定土壤容重、总孔隙度、非毛管孔隙度和毛管孔隙度。

环刀带回实验室后，去掉环刀上盖和底盖但保留底网，将其放在平底盘中，向盘中加水至环刀上沿但不能超过环刀上沿，每间隔 2 h 左右再加水以保持水位，放置 12 h 后环刀内土壤充分吸水直至饱和后，将环刀从平底盘中取出，迅速擦干环刀外面的水分后加盖上盖和底盖，称饱和湿土重 W_1。称取饱和重 W_1 后，打开上盖和底盖(保留底网)，将环刀放置在支架上让土壤中的重力水排出(环刀上盖虚盖在环刀上)，静置 12 h 后，加盖上盖和底盖并称重 W_2；称取毛管水重 W_2 后，打开环刀上盖和底盖，一并放入 105 ℃烘箱中烘烤 24 h 后，待烘箱中的温度降到室温时，打开烘箱，拿出环刀，加盖上盖和底盖后称烘干土重 W_3。

设环刀重为 W_0，环刀的体积为 V，则土壤孔隙度和土壤容重用下面公式计算。

$$土壤非毛管孔隙度 = (W_1 - W_2)/V \times 100\% \quad (1)$$

$$土壤毛管孔隙度 = (W_2 - W_3)/V \times 100\% \quad (2)$$

$$土壤总孔隙度 = (W_1 - W_3)/V \times 100\% \quad (3)$$

$$土壤容重(g/cm^3) = (W_3 - W_0)/V \quad (4)$$

秋浇前在农田进水口区域、中部区域和尾部区域各选择 3 个监测点(图 1)，双环法测定土壤水分入渗状况[28-29]，并计算土壤初始(前 3 min)入渗率、前 30 min 的入渗率、稳定入渗率和整个测试期间的入渗率。

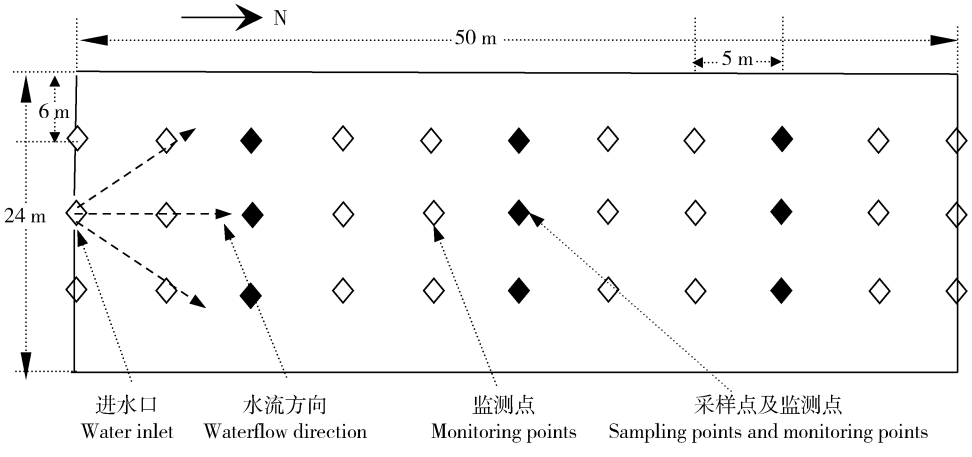

图 1　试验地采样点及监测点示意图

Fig. 1　Schematic diagram of sampling points and monitoring points in experimental field

供试的双环为不锈钢环，高 25 cm，外环直径 50.5 cm，内环直径 30.5 cm。试验时将内环与外环均放置于同一圆心上，轻轻砸入土内 15.0 cm，砸时应尽量减少对土壤的震动，以确保测试数据的准确性。内环和外环砸入土壤后，将小钢尺插入内环内，在内环内和外环与内环之间的土壤表层上铺 2 层纱布，以减少注水时水流对土壤表皮的冲刷与破坏。向内环和外环同时注水，注水深度达 5.0 cm 后停止，然后每间隔 1 min 测定 1 次水面下降深度，5 min 后每间隔 5 min 测定 1 次水面下降深度并将内环和外环水面高度补充到 5.0 cm，直到多次(至少 4 次以上)测定的水面下降幅度都保持一致时，便可认为已达到土壤水分稳定入渗状态，则可停止测定。

$$初始入渗率 = 前\ 3\ min\ 水面降低深度 /3 \quad (5)$$

$$前\ 30\ min\ 入渗率 = 前\ 30\ min\ 水面降低深度 /30 \quad (6)$$

$$稳定入渗率 = 稳定入渗时水面降低深度 /5 \quad (7)$$

$$测试期间的入渗率 = 测试期间水面降低深度 / 测试时间 \quad (8)$$

秋浇前分别在激光平地农田和普通农田内布设 11 排 3 列共 33 个监测点，每个监测点均布设带刻

度的标尺。不同排监测点之间相距 5.0 m,不同列监测点之间相距 6.0 m;边列监测点距地埂 6.0 m(图 1)。

灌水量:秋浇时用出水量为 320 m^3/h 的津奥特 ATSXOK300-100/2-140 双吸式潜水电泵从渠中抽水进行灌溉。当水流锋面达到农田尾部地埂时及时关泵停水,根据抽水时间来计算灌水量。

$$I = \frac{320T}{60} \times \frac{1\ 000}{50 \times 24} \tag{9}$$

式中:I 为灌水量(深度),mm;T 为抽水时间,min。

水流速率、田面储水深度和水面消退速率:秋浇时记录水流锋面达到每个监测点的时间;关泵停水时立即记录每个监测点的田面储水深度;记录每个监测点关泵停水后的田面水流消退时间。根据相邻排监测点(每排 3 个监测点)的距离(5.0 m)和水流通过时间计算不同地段的水流速率;根据田面储水深度及水面消退时间计算不同地段的水面消退速率。

水流速率、田面储水深度和水面消退速率均匀度用克里斯琴森均匀系数 C_u 表示[30]。

$$C_u = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} | X_i - \overline{X} |}{n\overline{X}} \tag{10}$$

式中:X_i 为沿水流方向不同地段的水流速率、田面储水深度和水面消退速率;$\overline{X}$ 为为沿水流方向不同地段监测点的平均水流速率、平均田面储水深度和平均水面消退速率;n 为沿水流方向的测点数。

1.4 数据处理

试验数据用 Excel 2010 制作图表,用 student test 检验普通农田和激光平地农田之间的差异。

3 结果与分析

3.1 激光平地对土壤容重和土壤孔隙度的影响

土壤容重可反映土壤板结的程度。土壤容重往往易受成土母质及长期灌溉等的影响。由表 1 可知:2 块农田耕层的土壤容重均随土层深度的增加而

表 1 不同处理耕层土壤的土壤容重

Table 1 Soil bulk density of topsoil with different treatments g/cm^3

采样位置 Sampling position	处理 Treatment	土壤容重 Soil bulk density			
		0～10 cm	10～20 cm	20～30 cm	0～30 cm
进水口区域 Water inlet area	普通农田 Ordinary farmland	1.35±0.08 b	1.43±0.06 a	1.54±0.05 a	1.44±0.06 a
	激光平地 Laser land leveling farmland	1.42±0.05 a	1.45±0.04 a	1.54±0.04 a	1.47±0.04 a
中部区域 Middle area	普通农田 Ordinary farmland	1.38±0.06 b	1.48a±0.05 a	1.58±0.04 a	1.48±0.05 a
	激光平地 Laser land leveling farmland	1.44±0.04 a	1.48±0.04 a	1.58±0.04 a	1.50±0.04 a
尾部区域 Trail area	普通农田 Ordinary farmland	1.46±0.07 a	1.52±0.06a	1.58±0.06 a	1.52±0.06 a
	激光平地 Laser land leveling farmland	1.44±0.08 a	1.54±0.07 a	1.58±0.06 a	1.52±0.07 a
平均值 Average	普通农田 Ordinary farmland	1.40±0.07 a	1.48±0.06 a	1.57±0.05 a	1.48±0.06 a
	激光平地 Laser land leveling farmland	1.43±0.06 a	1.49±0.05 a	1.57±0.05 a	1.50±0.05 a

注:表中同列数据后的小写表示差异达显著($P<0.05$)水平。表 2 和表 3 同。

Note: Small letters within the same column indicate significant difference at $P<0.05$. The same in Tables 2 and 3.

增加，进水口区域小于尾部区域。在农田进水口区域和中部区域，激光平地 0～10 cm 土层的土壤容重均显著($P<0.05$)高于普通农田，其中进水口区域较普通农田高 5.19%，中部区域高 4.35%，但<10～20 cm 和<20～30 cm 土层均与普通农田基本一致，无显著差异；在农田尾部区域，激光平地不同土层的土壤容重与普通农田基本一致，无显著差异；对于整块农田而言，激光平地对不同土层的土壤容重未产生显著影，与普通农田处于同一水平。

土壤孔隙往往影响土壤的通气性、养分释放和移动、微生物活动和土壤水热交换等。土壤孔隙往往受土壤质地、结构及长期灌溉和耕作等的影响。由表 2 可知：2 块农田的土壤总孔隙度均随土层深度的增加而降低，进水口区域高于尾部区域。激光平地显著($P<0.05$)降低进水口区域和中部区域 0～10 cm 土层的土壤总孔隙度，显著($P<0.05$)提高尾部区域 0～10 cm 土层的土壤总孔隙度，其中进水口区域降低了 5.71%，中部区域降低了 4.35%，尾部区域提高了 5.13%，但对<10～20 cm、<20～30 cm 土层和整块农田未产生显著影响。

表 2　不同处理耕层土壤的总孔隙度

Table 2　Soil total porosity of topsoil with different treatments　　%

采样位置 Sampling position	处理 Treatment	土壤总孔隙度 Soil total porosity			
		0～10 cm	10～20 cm	20～30 cm	0～30 cm
进水口区域 Water inlet area	普通农田 Ordinary farmland	50.12±1.24 a	46.14±1.15 a	41.68±1.12 a	45.98±1.17 a
	激光平地 Laser land leveling farmland	47.26±1.02 b	45.06±0.98 a	41.66±0.97 a	44.66±0.99 a
中部区域 Middle area	普通农田 Ordinary farmland	47.86±1.02 a	44.24±0.99 a	40.54±0.99 a	44.21±1.00 a
	激光平地 Laser land leveling farmland	45.78±0.98 b	44.15±0.98 a	40.46±0.96 a	43.46±0.97 a
尾部区域 Trail area	普通农田 Ordinary farmland	43.65±1.26 b	41.36±1.08 a	40.38±0.98 a	41.80±1.11 a
	激光平地 Laser land leveling farmland	45.89±1.16 a	41.25±1.12 a	40.29±1.01 a	42.48±1.10 a
平均值 Average	普通农田 Ordinary farmland	47.21±1.17 a	43.91±1.07 a	40.87±1.03 a	44.00±1.09 a
	激光平地 Laser land leveling farmland	46.31±1.05 a	43.49±1.01 a	40.80±0.98 a	43.53±1.02 a

土壤毛管孔隙是储存土壤水分的主要场所。由表 3 可知：2 块农田的土壤毛管孔隙度均随土层深度的增加而增加，进水口区域低于尾部区域。激光平地显著($P<0.05$)提高了进水口区域 0～10 cm 和 0～30 cm 土层土壤毛管孔隙度，其中 0～10 cm 土层提高了 8.21%，0～30 cm 土层提高了 5.18%，但对<10～20 和<20～30 cm 土层无显著影响；激光平地对中部区域不同土层无显著影响，但显著($P<0.05$)降低了尾部区域 0～10 cm 和<10～20 cm 土层的土壤毛管孔隙度，其中 0～10 cm 土层降低了 5.04%，<10～20 cm 降低了 4.42%；对整块农田而言，激光平地对不同土层的土壤毛管孔隙度未产生显著影响。

土壤非毛管孔隙是土壤气体交换的主要通道。由表 4 可知：2 块农田的土壤非毛管孔隙度均随土层深度的增加而降低，进水口区域高于尾部区域。

表3 不同处理耕层土壤的毛管孔隙度

Table 3 Soil capillary porosity of topsoil with different treatments %

采样位置 Sampling position	处理 Treatment	毛管孔隙度 Soil capillary porosity			
		0～10 cm	10～20 cm	20～30 cm	0～30 cm
进水口区域 Water inlet area	普通农田 Ordinary farmland	30.57±1.03 b	32.76±1.02 a	34.18±1.02 a	32.50±1.02 b
	激光平地 Laser land leveling farmland	33.08±1.02 a	34.14±1.02 a	35.25±1.01 a	34.16±1.02 a
中部区域 Middle area	普通农田 Ordinary farmland	31.59±1.06 a	33.62±1.04 a	34.67±1.04 a	33.29±1.05 a
	激光平地 Laser land leveling farmland	32.96±1.02 a	34.08±1.02 a	35.01±1.01 a	34.02±1.02 a
尾部区域 Trail area	普通农田 Ordinary farmland	33.74±1.12 a	34.65±1.08 a	35.92±1.08 a	34.77±1.09 a
	激光平地 Laser land leveling farmland	32.04±1.16 b	33.12±1.13 b	34.98±1.13 a	33.38±1.14 a
平均值 Average of border field	普通农田 Ordinary farmland	31.97±1.07 a	33.68±1.05 a	34.92±1.05 a	33.52±1.05 a
	激光平地 Laser land leveling farmland	32.69±1.07 a	33.78±1.06 a	35.08±1.05 a	33.85±1.06 a

表4 不同处理耕层土壤的非毛管孔隙度

Table 4 Soil air-filled porosity of topsoil with different treatments %

采样位置 Sampling position	处理 Treatment	非毛管孔隙度 Soil air-filled porosity			
		0～10 cm	10～20 cm	20～30 cm	0～30 cm
进水口区域 Water inlet area	普通农田 Ordinary farmland	19.55±1.38 aA	13.38±1.02 aA	7.50±0.94 aA	13.48±1.11 aA
	激光平地 Laser land leveling farmland	14.18±1.04 bB	10.92±0.92 bB	6.41±0.92 bB	10.50±0.96 bB
中部区域 Middle area	普通农田 Ordinary farmland	16.27±1.24 aA	10.62±0.95 aA	5.87±0.95 aA	10.92±1.05 aA
	激光平地 Laser land leveling farmland	12.82±0.99 bB	10.07±0.96 bA	5.45±0.95 bA	9.45±0.97 bB
尾部区域 Trail area	普通农田 Ordinary farmland	9.91±0.96 bB	6.71±0.94 bB	4.46±0.92 bB	7.03±0.94 bB
	激光平地 Laser land leveling farmland	13.85±1.16 aA	8.13±1.02 aA	5.31±0.95 aA	9.10±1.04 aA
平均值 Average of border field	普通农田 Ordinary farmland	15.24±1.19 aA	10.24±0.97 aA	5.94±0.94 aA	10.47±1.03 aA
	激光平地 Laser land leveling farmland	13.62±1.06 bB	9.71±0.97 bA	5.72±0.94 aA	9.68±0.99 bA

注：表中同列数据后的小写和大写字母分别表示差异达显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$)水平。下表同。

Note: Small and capital letters within the same column indicate significant difference at $P<0.05$ and extremely significant difference at $P<0.01$. The same as below.

激光平地极显著($P<0.01$)降低了进水口区域不同土层的土壤非毛管孔隙度，其中 0～10 cm、<10～20、<20～30 cm 和 0～30 cm 土层分别降低了 27.47%、18.39%、14.53%和 20.13%；激光平地极显著($P<0.01$)降低中部区域 0～10 cm 土层和 0～30 cm 土层的土壤非毛管孔隙度，显著($P<0.05$)降低<10～20 和<20～30 cm 土层的土壤非毛管孔隙度，其中 0～10 cm 土层和 0～30 cm 土层分别降低了 21.20%和了 11.18%，<10～20 和<20～30 cm 土层分别降低 5.18%和 7.16%；激光平地极显著($P<0.01$)提高了尾部区域不同土层的土壤非毛管孔隙度，其中 0～10 cm、<10～20、<20～30 cm 和 0～30 cm 土层分别提高了 39.76%、21.16%、19.06%和 26.66%；对整块农田而言，激光平地极显著($P<0.01$)降低 0～10 cm 土层的土壤非毛管孔隙度，显著($P<0.05$)降低<10～20 和<0～30 cm 土层，其中 0～10 cm 土层降低了 10.63%，<10～20 土层降低了 5.18%，0～30 土层降低了 6.50%，但对<20～30 cm 土层无显著影响。激光平地对进水口和尾部区域的影响较大，对中部区域的影响较小，且土层越接近地表，影响越大。

3.2　激光平地对土壤水分入渗速率的影响

土壤水分入渗过程往往影响土壤的蓄水保水能力。受多年灌溉的影响，农田不同区域的土壤水分入渗速率存在一定的差异。由图 2 可知：农田进水口区域的土壤水分入渗速率较高，中部区域居中，尾部区域较低。图 2(a)为农田进水口区域，图 2(b)为农田中部区域，结合图 2(a)和 2(b)可以看出，激光平地的初始入渗速率、前 30 min 入渗速率、稳定入渗速率均低于普通农田；图 2(c)为农田尾部区域，可以看出激光平地农田的初始入渗速率和前 30 min 入渗速率高于普通农田；图 2(d)为农田不同区域的平均值，可以看出激光平地的平均稳定入渗速率低于普通农田。

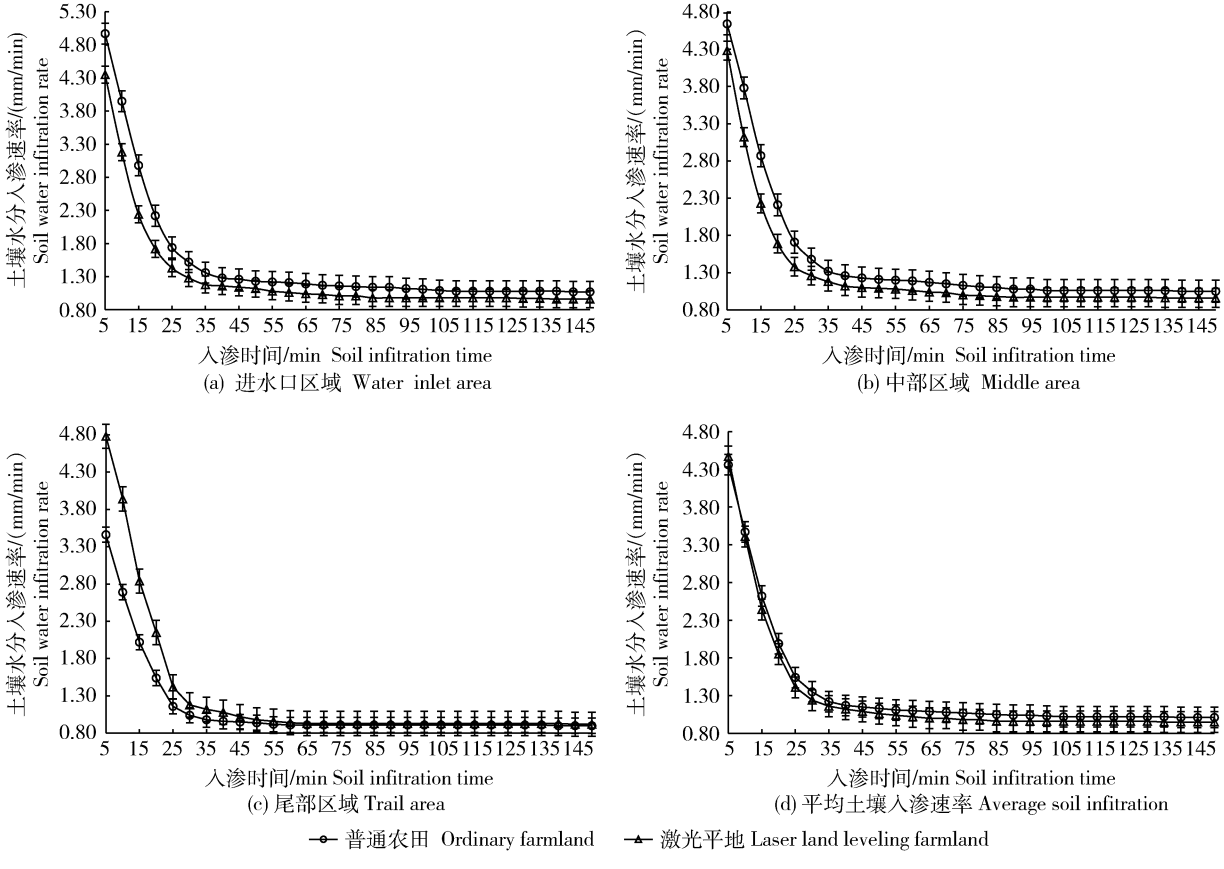

图 2　不同平地方式的不同区域土壤水分入渗速率

Fig. 2　Soil infitration rates of different regions under different land leveling styles

农田不同区域的土壤水分入渗过程存在一定差异。由表 5 可知：农田进水口区域，激光平地的稳定入渗速率在测试 85 min 后出现，普通农田在 110 min 后出现；激光平地的初始入渗速率、前

30 min入渗速率和测试期间的入渗速率均极显著($P<0.01$)低于普通农田,分别较普通农田分别降低了13.30%,18.28%和14.00%;稳定入渗速率显著($P<0.05$)低于普通农田,较普通农田降低了9.26%。农田中部区域,激光平地的稳定入渗速率在测试90 min后出现,普通农田在100 min后出现;激光平地的前30 min入渗速率和测试期间的入渗速率极显著($P<0.01$)低于普通农田,分别降低了16.19%和12.41%;初始入渗速率和稳定入渗速率显著($P<0.05$)低于普通农田,分别降低了8.11%和8.49%。农田尾部区域,激光平地的稳定入渗速率在测试65 min后出现,普通农田在60 min后出现;初始入渗速率、前30 min入渗速率和测试期间的入渗速率均极显著($P<0.01$)高于普通农田,分别提高了38.83%,36.68%和15.04%,但稳定入渗速率与普通农田处于同一水平外,仅提高了2.20%。对整块农田而言,激光平地的稳定入渗速率在测试85 min后出现,普通农田在105 min后出现;激光平地的初始入渗速率和前30 min入渗速率均与普通农田之间无显著差异;稳定入渗速率和测试期间的入渗速率均显著($P<0.05$)低于普通农田,分别降低了5.88%和5.15%。

表5 不同处理的土壤入渗速率

Table 5 Soil infiltration rate in different infiltration stages of different treatments mm/min

测定位置 Monitoring position	处理 Treatment	初始入渗速率 Initial infiltration rate	前30 min入渗速率 Infiltration rate in the first 30 min	稳定入渗速率 Stableinfiltration rate	测试期间的入渗速率 Infiltration rate during the testing
进水口区域 Water inlet area	普通农田 Ordinary farmland	5.64±0.45 aA	2.90±0.21 aA	1.08±0.03 aA	1.50±0.04 aA
	激光平地 Laser land leveling farmland	4.89±0.38 bB	2.37±0.19 bB	0.98±0.02 bA	1.29±0.03 bB
中部区域 Middle area	普通农田 Ordinary farmland	5.18±0.39 aA	2.78±0.21 aA	1.06±0.02 aA	1.45±0.04 aA
	激光平地 Laser land leveling farmland	4.76±0.36 bA	2.33±0.18 bB	0.97±0.02 bA	1.27±0.04 bB
尾部区域 Trail area	普通农田 Ordinary farmland	3.94±0.43 bB	1.99±0.19 bB	0.91±0.02 aA	1.13±0.03 bB
	激光平地 Laser land leveling farmland	5.47±0.46 aA	2.72±0.24 aA	0.93±0.02 aA	1.30±0.04 aA
平均值 Average	普通农田 Ordinary farmland	4.92±0.42 aA	2.56±0.20 aA	1.02±0.02 aA	1.36±0.04 aA
	激光平地 Laser land leveling farmland	5.04±0.40 aA	2.47±0.20 aA	0.96±0.02 bA	1.29±0.04 bA

3.3 激光平地对灌水量、水流速率、田面储水深度、水流消退速率及其均匀度的影响

农田灌水量、水流速率和水流消退速率等与农田土壤质地、土壤结构和土地平整度等密切相关。激光平地提高了农田的平整度,影响了耕层土壤容重和孔隙度,降低了土壤水分入渗速率,必然会对农田灌水量、水流速率、田面储水深度和水流消退速率等产生一定影响。经测定,激光平地农田灌溉耗时为40 min,普通农田耗时为54 min,灌水量分别为177.77 mm和239.99 mm,激光平地较普通农田节

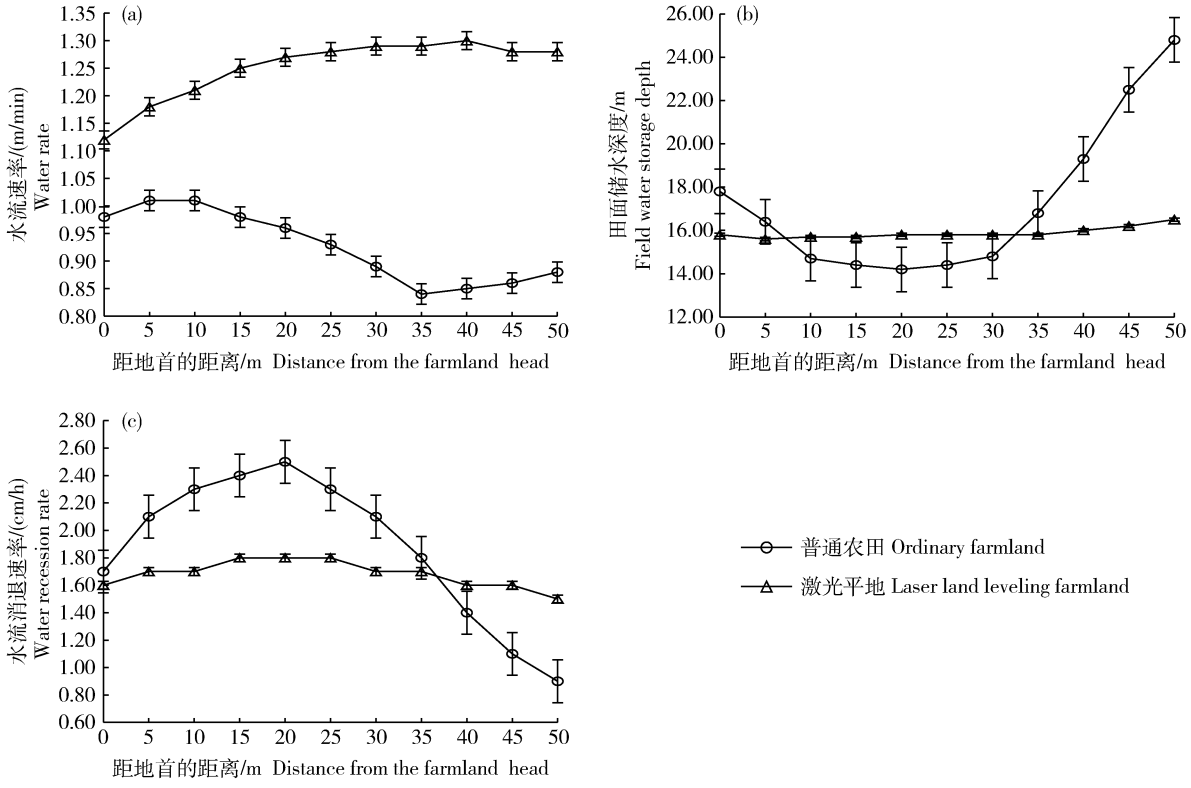

图 3　不同平地方式的水流推进速率(a)、田面储水深度(b)和水流消退速率(c)

Fig. 3　Water advancing rate (a), field water storage depth (b) and water recession rate (c) of different land leveling styles

约灌水量 25.93%，达极显著($P<0.01$)差异。

田面越平整，水流速率越高。由图 3(a)可知：激光平地的水流速率为逐渐增加，在尾部区域为匀速状态；普通农田是先逐渐降低，在尾部区域缓慢增加。普通农田的水流速率均匀度为 0.94，激光平地的为 0.97，激光平地较普通农田提高了 3.19%，未形成显著差异。激光平地的水流速率平均为 1.25 m/min，普通农田为 0.93 m/min，激光平地较普通农田提高了 34.41%，达极显著($P<0.01$)差异。

田面越平整，田面储水深度越一致。由图 3(b)可见：普通农田的田面储水深度表现为中部较浅，尾部较深，最深与最浅处相差 14.8 cm，均匀度为 0.84；激光平地最深与最浅处相差 0.9 cm，均匀度为 0.99；激光平地田面储水深度均匀度较普通农田提高了 17.86%，达极显著($P<0.01$)差异；激光平地田面储水深度平均为 15.88 cm，普通农田为 17.28 cm，激光平地较普通农田浅 8.10%，达显著($P<0.05$)差异。

土壤容重越低，土壤孔隙度越大，水流消退速率应越高。由图 3(c)可见：激光平地和普通农田的水流消退速率均为中部较高，尾部较低。激光平地中部在 9 h 左右、尾部在 11.0 h 左右后水分基本消退；而普通农田中部在 6 h 左右、尾部在 29 h 左右后才基本消退。普通农田水流消退速率均匀度为 0.76，激光平地为 0.95，激光平地较普通农田提高了 25.00%，达极显著($P<0.01$)差异。普通农田水面消退速率平均值为 1.87 cm·h^{-1}，激光平地为 1.68 cm·h^{-1}，激光平地较普通农田降低了 10.16%，达极显著($P<0.01$)差异。

4　讨　论

在较大空间尺度上，土壤容重和土壤孔隙主要受母岩、地质历史、气候和地形等的影响；在较小尺度上，则主要受立地环境、植被分布和农事耕作的影响[31]。土壤容重和土壤孔隙不但影响土壤耕性，而且影响土壤的持水保水性、透气性和作物根系在土壤中的伸展空间，间接影响土壤肥力和作物产量[32-38]。供试农田为多年引黄灌溉而形成的灌淤土，进水口区域沉积的土壤粗沙粒较多，土粒较大，

疏松，土壤容重较小，总孔隙度和非毛管孔隙度较大而毛管孔隙度相对较小，而尾部区域沉积的土壤细沙粒较多，颗粒较细，粘性较强，毛管孔隙发达，毛管孔隙度相对较大[39]；进水口区域地面较高，尾部较低，尾部区域为汇水区和土壤盐渍化的高发区，不利于作物生长[2-3]。激光平地机的拖拉机和平地铲二者的自重高达6 900 kg，平地过程中机具对土壤反复碾压，造成土壤紧密，增加土壤容重，减少土壤总孔隙度和非毛管孔隙度，相对增加土壤毛管孔隙度。平地过程中进水口区域为挖方区，尾部为填方区，且土层越深土壤容重越大，因而平地后进水口区域和中部区域的土壤容重增加，土壤总孔隙度和非毛管孔隙度降低，毛管孔隙度增加；平地后尾部区域0～10 cm土层多为从进水口区域运来的土壤，在平地过程中原有的土壤结构遭到破碎并形成许多相对较大的物理孔隙，且进水口区域土壤相对疏松，因而其土壤容重略有降低，总孔隙度和非毛管孔隙度升高，毛管孔隙度相对降低。虽然激光平地对农田不同区域的总孔隙度和土壤容重有一定的影响，但土壤容重、土壤总孔隙度和毛管孔隙度主要与土壤质地密切相关[38]，故激光平地对整块农田的土壤容重、土壤总孔隙度和土壤毛管孔隙度未产生显著影响。激光平地后土壤非毛管孔隙降低，首先是土壤非毛管孔隙易受农事操作的影响，平地过程中机具对土壤反复碾压，会增加土壤紧密度，降低土壤非毛管孔隙[19,32-33]；第二是平地过程中进水口区域及中部区域均处于挖方区域，挖后下层土壤相对上升，从而导致土壤非毛管孔隙度降低；第三是试验地填方区域所的占比例较小而挖方区域所占比例较大，造成整块农田土壤非毛管孔隙度降低。

土壤水分入渗与土壤孔隙度等密切相关，特别与非毛管孔隙密切相关[26-27]。激光平地降低了进水口和中部区域的土壤总孔隙度和非毛管孔隙度，增加了尾部区域的土壤总孔隙度和非毛管孔隙度，因而进水口和中部区域的土壤入渗速率降低，尾部区域的提高，这与已有研究结果土壤总孔隙度和非毛管孔隙度越高，土壤入渗速率越高的[40-43]基本相同。由于平地过程中机具对土壤的反复碾压，整块农田的非毛管孔隙降低，导致整块农田的土壤入渗速率降低。

激光平地提高了农田平整度，减少了水流阻力，降低了水流推进锋面，利于灌溉水流快速向前推进，提高了水流速率，而水流速率的提高促进了水流锋面提早到达地尾，从而有效缩短灌水时间，减少灌水量[7,22]，降低田面储水深度，提高田面储水深度均匀度[2-9]。激光平地过程中机具对土壤反复碾压，提高了土壤容重，降低了土壤总孔隙度和非毛管孔隙度，导致灌溉水分入渗缓慢，水面消退速率降低，有利于灌溉水分相对较多地保留在耕层土壤中，利于土壤洗盐[3]，提高灌水效率[22]；激光平地的灌水量较普通农田少，可减少地面水分蒸发，减少盐分表聚，从而减轻土壤盐分[3]；激光平地后尾部区域的土壤容重降低，土壤总孔隙度和非毛管孔隙度增加，可有效改善尾部区域的土壤物理性状，提高尾部区域的土地生产力[2-3]。激光平地后春季农田不同区域土壤水分分布均匀，防止土壤出现潮塌和返浆现象，利于春小麦等作物提早播种，延长春小麦生长期，提高春小麦产量[2-3]。

5 结 论

本研究通过监测激光平地对农田土壤容重、土壤孔隙度、土壤水分入渗速率和秋浇质量等的影响，主要结论如下：

1)激光平地对0～10 cm土层的土壤容重、土壤孔隙度影响较大，对10 cm土层以下的土壤影响较小。激光平地提高了处于挖方的进水口区域的土壤容重和毛管孔隙度，降低了进水口区域的土壤总孔隙度和非毛管孔隙度；降低了处于填方的尾部区域的土壤容重和毛管孔隙度，提高了尾部区域的土壤总孔隙度和非毛管孔隙度，显著($P<0.05$)降低了整块农田0～30 cm土层的非毛管孔隙度，但对整块农田的土壤容重、土壤总孔隙度和毛管孔隙度无显著影响；

2)激光平地显著($P<0.05$)降低了农田进水口区域和中部区域的土壤水分稳定入渗率，对尾部的土壤水分稳定入渗率无显著影响，显著($P<0.05$)降低了整块农田的土壤水分稳定入渗率；

3)激光平地可减少灌水量25.93%，灌溉水流速率较快且较一致，田面储水深度较浅且均一，水流消退速率较低且较均匀。

参考文献 References

[1] 邹超煜，白岗栓，杜社妮. 河套地区春小麦向日葵复种对土壤盐分及农田生产力的影响[J]. 中国农业大学学报，2017，22(6)：1-10
Zou C Y, Bai G S, Du S N. Effects of spring wheat-sunflower multiple cropping on soil salinity and farmland productivity in Hetao irrigation

area[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(6): 1-10 (in Chinese)

[2] 白岗栓，邹超煜，于健，史吉刚，宋耀兴. 激光平地对灌水均匀度及春小麦生长的影响[J]. 水土保持学报，2014，28(4)：85-90
Bai G S, Zou C Y, Yu J, Shi J G, Song Y X. Effects of laser land leveling on irrigation uniformity and spring wheat growth[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(4): 85-90 (in Chinese)

[3] 白岗栓，杜社妮，于健，张沛琪. 激光平地改善土壤水盐分布并提高春小麦产量[J]. 农业工程学报，2013，29(8)：125-134
Bai G S, Du S N, Yu J, Zhang P Q. Laser land leveling improve distribution of soil moisture and soil salinity and enhance spring wheat yield [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(8): 125-134 (in Chinese)

[4] 白美健，许迪，李益农. 水平畦田微地形空间变异性对灌溉系统的影响[J]. 水利学报，2007，38(10)：1194-1199
Bai M J, Xu D, Li Y N. Influence of microtopography spatial variability on horizontal border irrigation system [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(10): 1194-1199 (in Chinese)

[5] 陈博，欧阳竹，刘恩民，张艳玲，陈俊旭. 不同畦面结构下地面灌溉效果的对比分析[J]. 农业工程学报，2010，26(11)：30-36
Chen B, Ouyang Z, Liu E M, Zhang Y L, Chen J X. Comparison of border irrigation practices in different morphologic fields[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(11): 30-36 (in Chinese)

[6] 王瑞萍，王鹏，梁春霞. 激光平地技术对秋浇灌溉效率的影响[J]. 海河水利，2012(2)：48-50
Wang R P, Wang P, Liang C X. Effect of laser land leveling technology on the efficiency of autumn irrigation[J]. *Haihe Water Resources*, 2012 (2): 48-50 (in Chinese)

[7] 徐睿智，魏占民，夏玉红，张婉璐. 激光精细平地对畦田灌水质量的影响及节水效果分析[J]. 灌溉排水学报，2012，31(2)：6-9
Xu R Z, Wei Z M, Xia Y H, Zhang W L. Effects of laser precision land leveling on border irrigation and its water saving performance [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(2): 6-9 (in Chinese)

[8] Finney C. The benefits of land leveling on irrigation schemes in Turkey and Sindh province, Pakistan[J]. *International Commission on Irrigation and Drainage*, 1996, 45(1): 21-37

[9] Agarwal M C, Goel A C. Effect of field leveling quality on irrigation efficiency and crop yield[J]. Agricultural Water Management, 1981, 4 (4): 457-464

[10] Aryal J P, Mehrotra M B, Jat M L, Sidhu H S. Impacts of laser land leveling in rice-wheat systems of the north-western indo-Gangetic Plains of India[J]. *Food Security*, 2015, 7(3): 725-738

[11] Singh T, Kaur B. A techno-economic feasibility of laser land leveling technology in Punjab agriculture[J]. *Journal of Agricultural Development and Policy*, 2014, 24(1): 59-68

[12] Ahmad U D, Masih I, Giordano M. Constraints and opportunities for water savings and increasing productivity through resource conservation technologies in Pakistan[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 187: 106-115

[13] Asif M, Ahmed M, Gafoor A, Aslam Z. Wheat productivity, land and water use efficiency by traditional and laser land-leveling techniques[J]. *Journal of Biological Sciences*, 2003, 3(2): 141-146

[14] Ahmad B, Khokha S B, Badar H. Economics of laser land leveling in district Faisalabad[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2001, 1(3): 409-412

[15] Das A, Lad, Chalodia A. Effect of laser land leveling on nutrient uptake and yield of wheat, water saving and water productivity[J]. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 2018, 7(2): 73-78

[16] Abdullaev I, UI Hassan M, Jumaboev K. Water saving and economic impacts of land leveling: Tthe case study of cotton production in Tajikistan[J]. Irrigation and Drainage Systems, 2007, 21(3-4): 251-263

[17] 杨柯，胡志超，于昭洋. 新型激光平地机研究与发展[J]. 中国农机化学报，2014，35(2)：17-19，37
Yang K, Hu Z C, Yu Z Y. Research and development of the laser grader [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2014, 35(2): 17-19, 37 (in Chinese)

[18] 艾建军，杨英芸，高韶坤. 我国农田激光平地机的研究进展及发展趋势[J]. 东北农业大学学报，2013，44(11)：155-160
Ai J J, Yang Y Y, Gao S K. Research status and development trend of farmland laser land leveling machine in China[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2013, 44(11): 155-160 (in Chinese)

[19] 王永生，李存军，陈静，胡海棠，史磊刚，朱东海，安晓飞，陶欢，淮贺举. 激光平地与精准播种对冬小麦产量和土壤理化性状的影响初探[J]. 灌溉排水学报，2016，35(S1)：37-40
Wang Y S, Li C J, Chen J, Hu H T, Shi L G, Zhu D H, An X F, Tao H, Huai H J. Preliminary effects of laser land leveling and precision seeding on winter wheat production and soil physicochemical properties [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(S1): 37-40 (in Chinese)

[20] 许迪，李益农，李福祥，杨继富. 常规土地平整与激光平地技术组合应用初步分析[J]. 水利学报，1999，30(10)：52-56
Xu D, Li Y N, Li F X, Yang J F. Study on combination of conventional and laser controlled land grading procedures[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 30(10): 52-56 (in Chinese)

[21] 许迪，李益农. 精细地面灌溉技术体系及其研究的进展[J]. 水利学报，2007，38(5)：529-537
Xu D, Li Y N. Review on advancements of study on precision surface irrigation system[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(5): 529-537 (in Chinese)

[22] 任文涛，胡忠飞，崔红光，杨成桐，刘涌，王玉家，张占永，李宝筏. 激光平地乳芽直播节水效果的研究[J]. 农业工程学报，2003，19(3)：72-75
Ren W T, Hu Z F, Cui H G, Yang C T, Liu Y, Wang Y J, Zhang Z Y, Li B F. Effect of laser-controlled land leveling and baby rice seedling direct planting on saving water[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(3): 72-75 (in Chinese)

[23] 胡炼，殷延勃，杜攀，罗锡文. 水稻田激光平地技术研究与展望[J]. 中国稻米，2020，26(5)：16-18
Hu L, Yin Y B, Du P, Luo X W. Research and prospect of laser leveling technology in rice field[J]. *China Rice*, 2020, 26(5): 16-18 (in Chinese)

[24] 张维俊，李双异，徐英德，刘旭，安婷婷，朱平，彭畅，汪景宽. 土壤孔隙结构与土壤微环境和有机碳周转关系的研究进展[J]. 水土保持学报，2019，33(4)：1-9
Zhang W J, Li S Y, Xu Y D, Liu X, An T T, Zhu P, Peng C, Wang J K. Advances in research on relationships between soil pore structure and soil miocroenvironment and organic carbon turnover[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(4): 1-9 (in Chinese)

[25] 丁莫元，冯浩，赵英，杜璇. 氨化秸秆还田对土壤孔隙结构的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2016，22(3)：650-658
Ding D Y, Feng H, Zhao Y, Du X. Effect of ammoniated straw returning on soil pore structure[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(3): 650-658 (in Chinese)

[26] 赵鹏宇，徐学选，刘普灵，陈天林，廖鑫，李波. 黄土丘陵区不同土地利用方式土壤入渗规律研究[J]. 水土保持通报，2009，29(1)：40-44
Zhao P Y, Xu X X, Liu P L, Chen T L, Liao X, Li B. Infiltration characteristics under different land uses in the loess hilly area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29 (1): 40-44 (in Chinese)

[27] 赵娇娜，徐学选，李星，张良德，宇苗子. 长武塬区降雨入渗特征[J]. 中国水土保持科学，2012，10(4)：37-44
Zhao J N, Xu X X, Li X, Zhang L D, Yu M Z. Characteristic of rainfall infiltration on Changwu tableland [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012, 10(4): 37-44 (in Chinese)

[28] 侯喜禄，白岗栓，曹清玉. 刺槐、柠条、沙棘林土壤入渗及抗冲性对比试验[J]. 水土保持学报，1995，9(3)：90-95
Hou X L, Bai G S, Cao Q Y. Contrast study on soil infiltration capacity

and anti-scourability in *Robinia pseudoacacia*, *Caragana microphylla* and *Hippophae rhamnoides* woodlands[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1995, 9(3): 90-95 (in Chinese)

[29] 康强. 土壤入渗测定方法评述[J]. 乡村科技, 2014(8): 84-85
Kang Q. Review of soil infiltration measurement methods[J]. *Rural Science and Technology*, 2014(8): 84-85 (in Chinese)

[30] 李久生, 尹剑锋, 张航, 栗岩峰. 滴灌均匀系数对土壤水分和氮素分布的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 27-33
Li J S, Yin J F, Zhang H, Li Y F. Field evaluation of drip fertigation uniformity effects on distributions of water and nitrogen in soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(12): 27-33 (in Chinese)

[31] 梁向锋, 赵世伟, 华娟, 张扬. 子午岭林区典型植被下土壤结构及稳定性指标分析[J]. 水土保持通报, 2008, 28(3): 12-16, 22
Liang X F, Zhao S W, Hua J, Zhang Y. Analysis of soil structure and its stability indexes under typical vegetation in Ziwuling forest area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(3): 12-16, 22 (in Chinese)

[32] 孙梅, 黄运湘, 孙楠, 徐明岗, 王伯仁, 张旭博. 农田土壤孔隙及其影响因素研究进展[J]. 土壤通报, 2015, 46(1): 233-238
Sun M, Huang Y X, Sun N, Xu M G, Wang B R, Zhang X B. Advance in soil pore and its influencing factors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(1): 233-238 (in Chinese)

[33] 刘涛, 王金满, 秦倩, 王洪丹, 白中科. 矿区机械压实对土壤孔隙特性影响的研究进展[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 233-238
Liu T, Wang J M, Qin Q, Wang H D, Bai Z K. Advance in the study on the effect of mechanical compaction on soil pore characteristics in mining area[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(1): 233-238 (in Chinese)

[34] 杨彦明, 刘景辉, 李立军, 赵宝平, 车永强, 乌恩. 聚丙烯酸钾对土壤孔隙及含水特性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(4): 28-35
Yang Y M, Liu J H, Li L J, Zhao B P, Che Y Q, Wu E. Effect of potassium polyacrylate on soil porosity and moisture characteristics[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015(4): 28-35 (in Chinese)

[35] 鞠忻倪, 贾玉华, 甘淼, 金珊, 肖波. 黄土沟壑区不同地形部位土壤大孔隙特征研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(5): 1098-1107
Ju X N, Jia Y H, Gan M, Jin S, Xiao B. Characteristics of soil macropores in the gully area of loess plateau as affected by terrain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(5): 1098-1107 (in Chinese)

[36] 甘磊, 李健, 李帅, 韦灵, Saeed Rad. 广西甘蔗地不同耕作方式下土壤孔隙特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 122-130
Gan L, Li J, Li S, Wei L, Rad S. Soil pore characteristics of sugarcane field under different tillage treatments in Guangxi[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(6): 122-130 (in Chinese)

[37] 张保华, 陶宝先, 曹建荣, 刘子亭. 黄河下游冲积平原潮土土壤孔隙微形态特征[J]. 干旱区地理, 2020, 43(3): 687-693
Zhang B H, Tao B X, Cao J R, Liu Z T. Micromorphological characteristics of soil voids of fluvo-aquic soil in the alluvial plain of the lower Yellow River[J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(3): 687-693 (in Chinese)

[38] 李志熙, 白岗栓, 邹超煜, 邵发琦. 自然生草对渭北旱塬苹果园土壤孔隙和水分入渗的影响[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(5): 146-156
Li Z X, Bai G S, Zou C Y, Shao F Q. Effects of self-sown grass on soil porosity and soil infiltration in apple orchard in Weibei dry plateau[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(5): 146-156 (in Chinese)

[39] 邹超煜, 白岗栓. 河套灌区土壤盐渍化成因及防治[J]. 人民黄河, 2015, 37(9): 143-148
Zou C Y, Bai G S. Formation cause and control methods about soil salinization in Hetao irrigation area[J]. *Yellow River*, 2015, 37(9): 143-148 (in Chinese)

[40] 陈文媛, 张少妮, 华瑞, 徐学选. 黄土丘陵区林草恢复进程中土壤入渗特征研究[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(1): 62-69
Chen W Y, Zhang S N, Hua R, Xu X X. Effects of forestland and grassland restoration process on soil infiltration characteristics in loess hilly region[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(1): 62-69 (in Chinese)

[41] 冯璐, 丁康, 屈媛媛, Farhat Ullah KHAN, 杜峰, 徐学选. 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, Qu Y Y, Khan F, Du F, Xu X X. The influence of loess tableland slope vegetation type on soil pore characteristics[J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(4): 625-634 (in Chinese)

[42] 丁康, 徐学选, 陈文媛, Shahmir Ali Kalhoro. 长武塬边坡不同植被下土壤团聚体及入渗特征[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(12): 44-51
Ding K, Xu X X, Chen W Y, Kalhoro S. Soil aggregates and infiltration characteristics under different vegetations in Changwu tableland slope of northwestern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(12): 44-51 (in Chinese)

[43] 杨永辉, 赵世伟, 雷廷武, 刘汗. 宁南黄土丘陵区不同植被下土壤入渗性能[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5): 1040-1045
Yang Y H, Zhao S W, Lei T W, Liu H. Soil infiltration capacity under different vegetations in southern Ningxia loess hilly region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(5): 1040-1045 (in Chinese)

责任编辑：杨爱东

通讯作者简介：白岗栓，硕士，西北农林科技大学水土保持研究所和中国科学院 水利部 水土保持研究所研究员，农业生态学专业硕士生导师，主要从事果树栽培及农田生态方面的研究及推广工作，先后参加国家“七·五”～“十四·五”科技攻关或支撑、国家“948”沙棘育种及加工、国家“863”保水剂研发及产业化开发等项目，先后获得陕西省科技进步一等奖和二等奖，先后在 Plant & Soil，农业工程学报、园艺学报、林业科学等期刊发表论文 190 多篇，参编专著 3 部。