

不同土壤容重条件下水分亏缺对作物生长和水分利用的影响

刘战东¹, 张凯¹, 米兆荣², 秦安振¹, 黄超¹, 马岩川¹,

余轩¹, 孙景生¹, 黄世清³, 李长有³, 张景忙³

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所农业部作物需水与调控重点开放实验室, 河南 新乡 453002;

2. 河南科技学院, 河南 新乡 453002; 3. 河南省焦作市广利灌区管理局, 河南 沁阳 454550)

摘要: 为探究不同土壤容重和不同程度水分亏缺条件下冬小麦—夏玉米生长指标及产量的变化。采用桶栽土培法, 分别设置3种土壤容重(1.2, 1.4, 1.6 g/cm³)和3个土壤水分控制下限(低水分50%田间持水量、中水分60%田间持水量和高水分70%田间持水量), 研究不同土壤容重和水分亏缺对冬小麦—夏玉米根系、生长指标、耗水量、产量和水分利用的影响。结果表明: 随水分亏缺程度的加剧, 冬小麦和夏玉米生长指标、生物量、耗水量和产量均呈降低趋势。随土壤容重增加, 冬小麦生物量和产量呈先升高再降低的趋势, 冬小麦耗水量和水分利用效率呈降低趋势; 而夏玉米产量、耗水量和水分利用效率均呈降低趋势。试验中, 1.4, 1.2 g/cm³分别为冬小麦和夏玉米生长的最适土壤容重。土壤容重与水分处理互作对夏玉米株高、耗水量和水分利用效率有极显著影响, 而对冬小麦和夏玉米生物量及产量无显著影响。研究结果可为黄淮海地区作物绿色增产增效及水土资源高效利用提供理论参考。

关键词: 土壤容重; 水分亏缺; 生长; 产量; 耗水量; 水分利用效率

中图分类号: S152.7; S513; S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0115-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.02.019

Effects of Water Deficit on Crop Growth and Water Use Under Different Soil Bulk Densities

LIU Zhandong¹, ZHANG Kai¹, MI Zhaorong², QIN Anzhen¹, HUANG Chao¹,

MA Yanchuan¹, YU Xuan¹, SUNJingsheng¹, HUANG Shiqing³, LI Changyou³, ZHANG Jingmang³

(1. Key Laboratory for Crop Water Requirement and Its Regulation, Ministry of Agriculture, Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453002; 2. Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan 453002; 3. Guang Li Irrigation Authority, Jiaozuo City, Henan Province, Qinyang, Henan 454550)

Abstract: In order to study the changes of growth index and yield of winter wheat and summer maize under different soil bulk densities and different degrees of water deficit, a bucket-planting experiment was conducted. Three soil bulk densities were set up: 1.2 g/cm³, 1.4 g/cm³, 1.6 g/cm³, and three lower limits of soil moisture control: 50%, 60% and 70% of field water-holding capacity, respectively. The root system, growth index, water consumption, yields and water use of winter wheat-summer maize were studied. The results showed that with the increases of water deficit, the growth index, biomass, water consumption and yield of winter wheat and summer maize decreased. With the increases of soil bulk densities, the biomass and yield of winter wheat increased first and then decreased, and the water consumption and water use efficiency of winter wheat decreased; the yield, water consumption and water use efficiency of summer maize decreased. In the experiment, 1.4 g/cm³ and 1.2 g/cm³ were the optimum soil bulk densities for winter wheat and summer maize, respectively. The interaction between soil bulk density and water treatment had a significant effect on plant height, water consumption and water use efficiency of summer maize, but there was no significant effect on biomass and yield of winter wheat and summer maize. These results could provide a theoretical reference for increasing yield and increasing efficiency of crops and efficient utilization of soil and water resources in Huanghuai area.

收稿日期: 2018-10-11

资助项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503117); 国家自然科学基金项目(51309226); 中国农业科学院基本科研业务费专项(FIRI2016-03)

第一作者: 刘战东(1981—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事作物生理与水分高效利用研究。E-mail: Lzddragon@163.com

通信作者: 孙景生(1963—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事作物生理与水分高效利用研究。E-mail: jshsun623@163.com

Keywords: soil bulk density; water deficit; growth; yield; water consumption; water use efficiency

土壤紧实是农学和土壤科学普遍关注的问题,因为它导致世界上大多数作物的产量降低,原因是土地复垦过程中的机械碾压所造成^[1]。土壤紧实可以被定义为“土壤颗粒被重新排列,以减少空隙空间,使其彼此更紧密地接触,从而增加容重的过程”^[2]。因此,土壤紧实反映的物理降解包括增加土壤强度、降低土壤孔隙率和降低水力传导率。土壤容重是土壤的基本物理属性^[3],许多研究^[4]都将土壤容重与土壤渗透阻力相结合来说明土壤紧实度,从而说明机械化耕作会导致犁底层加厚。土壤紧实对作物生长的影响取决于农业机械的负荷、土壤类型和作物系统^[5-6],它对根系和作物生长的影响被广泛报道。有研究^[7]表明,土壤紧实度过大会严重阻碍玉米根系的生长、分布及吸收功能,降低玉米株高、地上与地下部分的干重^[8]。Benigno 等^[9]认为,紧实土壤中通气状况和机械阻力会抑制根系的伸长生长,导致根冠比下降。然而,土壤紧实对作物生长也有一定的积极影响。有研究^[10]认为,适当的土壤紧实可以增强根系与土壤接触,增加土壤蓄水,从而使作物根系获得足够的资源,进而提高产量。这些结果表明不同环境下的作物生长有最佳的紧实度^[11]。但是,土壤的最优水平取决于土壤含水量^[12],而对于不同水分条件下作物对土壤紧实反应的系统研究较少。

冬小麦和夏玉米是黄淮海平原的主要作物,每年的耕作实践包括残茬、犁耕、播种和收割,使用拖拉机的耕作次数较多;此外,在作物播种前,如未遇到有效降雨,通常还需要适当“造墒”,以保证种子出苗,这些农事活动均会导致土壤紧实。因此,随着全程机械化农业发展,土壤紧实和犁底层的存在已成为黄淮海地区的一个潜在问题^[13]。而在黄淮海地区,土壤水分利用在确保作物高产的过程中发挥了重要作用,由于生长季节降雨量少,所以非常有必要研究地下土壤紧实作用对作物生长及水分利用的影响。因此,本研究通过设置不同土壤容重和水分亏缺分析土壤紧实对作物生长、产量和水分利用的影响,以期为土壤耕作和灌溉管理决策提供参考,并减少土壤紧实和水分亏缺对作物生长发育的负面影响。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2016—2017 年在位于河南省新乡市的中国农业科学院农田灌溉研究所作物需水量试验场大型启闭式防雨棚下进行(35°19'N, 113°54'E)。试验点多年平均降水量 610 mm,气温 13.5℃,≥0℃积温 5 070℃,年累积日照时间 2 497 h,无霜期 220 d,

为典型的暖温带半湿润半干旱地区。

1.2 试验设计

夏玉米供试品种为“登海 605”,于 2016 年 6 月 10 日播种,2016 年 9 月 30 日收获;冬小麦供试品种为“百农 207”,于 2016 年 10 月 15 日播种,翌年 6 月 3 日收获。采用桶栽土培法,测桶为圆柱形,分母桶和子桶。母桶内径 31 cm,高 40 cm,竖直埋设在土中,上沿高出地面 5 cm;子桶内径 29.5 cm,高 38 cm。测桶内的土壤取自大田耕层,土壤经晾晒、过筛后。主要有土壤容重和土壤含水量 2 个因子,每个因子各设置 3 个水平,两两组合共计 9 个处理,每个处理 4 个重复。土壤容重设置为 1.2, 1.4, 1.6 g/cm³。按照不同容重所需干土量,计算所需填土量并分层填入桶中。土壤水分含量参照土壤田间持水量,设置为 3 个土壤水分控制下限,分别为低水分(L, 50%田间持水量)、中水分(M, 60%田间持水量)和高水分(H, 70%田间持水量)。当土壤水分低于控制下限即实施灌水,灌水至田间持水量。全生育期每桶在土壤 3 cm 深度均匀放入肥料 5.1 g(按田间常用施肥量 750 kg/hm² 计算)。

1.3 测定项目与方法

土壤含水量的测定:土壤含水量采用称重法测定,各处理每 2~3 天测定 1 次,根据土壤水分控制下限以确定灌水时间。每次灌水量为到达田间持水量。以播种时土壤含水量、灌水量和试验结束时土壤含水量为依据计算作物生育期耗水量。

耗水量(mm) = 灌水量 + 播种时土壤含水量 - 结束时土壤含水量

土壤容重:采用土壤容重钻测定 0—50 cm 土层深度的容重,每 10 cm 为 1 个土层,每个处理 3 次重复取样。

作物生长发育指标:利用量测法定期观测株高、叶面积指数等指标,每个处理 3 次重复取样。

产量及产量构成因子:在成熟期,冬小麦每个小区随机选取 1 m×2 m 为样本,籽粒经自然风干后称重,换算成亩产量。室内考种,测定穗粒数、穗长、小穗数和千粒重等指标。夏玉米收取每个处理的 10 株,在 105℃下杀青 30 min,然后在 75℃下烘干至恒重,称重记录地上部生物量、根干重。

水分生产效率(kg/(hm²·mm)) = 籽粒产量(kg/hm²)/耗水量(mm)。

1.4 数据分析

采用 Excel 对试验所取得的数据进行分析和作图,用 SAS 软件对不同处理间的差异在 0.05 水平上进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同土壤容重和土壤水分含量对夏玉米生长指标的影响

由表 1 可知,不同土壤含水量和土壤容重的夏玉米在株高、叶面积、地上部分干重和根干重有极显著性差异;夏玉米株高在不同土壤含水量和土壤容重互作效应下有极显著性差异,但夏玉米叶面积、地上部分干重和根干重差异不显著。与低水分亏缺处理相比,高水分处理株高、叶面积、地上部分干重和根干重分别增加 72.8%,188.8%,176.0%和 91.6%,差异均达显著水平;而中水分与高水分差异不显著。与 1.2 g/cm³ 土壤容重处理相比,1.6 g/cm³ 土壤容重处理的株高、叶面积、地上部分干重和根干重分别降低 25.7%,48.9%,34.9%和 44.0%,处理间均有显著差异;而 1.4、1.2 g/cm³ 处理相比差异不显著;1.2 g/cm³ 容重条件下,高水分处理夏玉米株高、叶面积、地上部分干重、根干重分别比低水分处理增加 35.2%,100.5%,78.8%和 104.2%;1.4 g/cm³ 容重条件下,高水分处理夏玉米株高、叶面积、地上部分干重和根干重分别比低水分处理增加 69.3%,164.0%,174.1%和 143.4%;1.6 g/cm³ 容重条件下,高水分处理夏玉米株高、叶面积、地上部分干重和根干重分别比低水分处理增加 150.2%,881.6%,761.3%和 175.7%。由此可见,夏玉米株高、叶面积、地上部分干重和根干重随土壤含水量的增加而提高,随土壤容重的增加而降低,而随土壤容重的增加,土壤水分越高对夏玉米生长的影响越大。

表 1 夏玉米不同土壤容重和灌水量处理生长指标比较				
处理	株高/ cm	单株叶 面积/cm ²	单株地上 部分干重/g	单株 根干重/g
土壤含水量	L	63.92c	695.9c	73.36c
	M	93.31b	1461.2b	168.77b
	H	110.43a	2010.0a	202.48a
土壤容重	1.2 g/cm ³	100.99a	1804.3a	175.93a
	1.4 g/cm ³	91.63b	1441.2b	148.03b
	1.6 g/cm ³	75.04c	921.6c	114.59c
土壤含水量	**	**	**	**
土壤容重	**	**	**	**
土壤含水量×土壤容重	**	NS	NS	NS

注:同列不同小写字母表示在 5% 水平差异显著; * 和 ** 分别表示在 5% 和 1% 水平差异显著; NS 表示差异不显著。下同。

各处理的株高和叶面积变化趋势较为一致(图 1 和图 2),即在各土壤容重条件下,株高和叶面积均随土壤含水量的增加而增加;随土壤容重的增加,不同水分处理夏玉米株高和叶面积差异明显。说明不同土壤容重条件下,土壤含水量越高,越有利于夏玉米的生长,且随土壤容重的增加,与低水分处理相比,高

水分处理对夏玉米生长的影响越大。

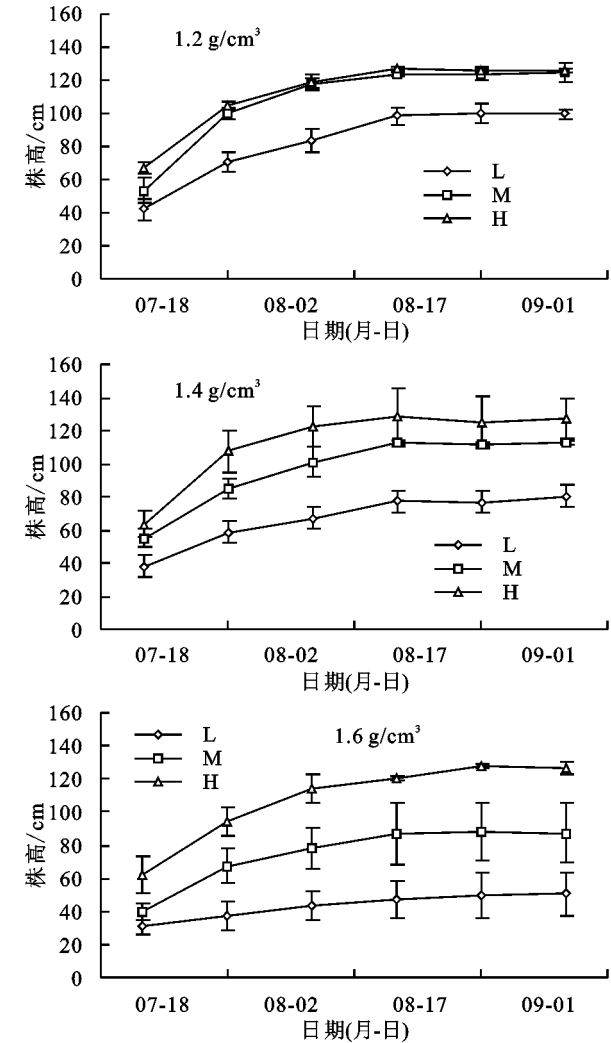


图 1 试验期各处理株高变化

由图 3 可知,土壤水分与地上部干重回归方程的斜率在 1.2、1.4、1.6 g/cm³ 容重处理下分别为 489.6, 652.9 和 794.3。土壤水分与地上部干重回归方程的斜率随土壤容重的增加而增加,这说明土壤容重越大,土壤水分亏缺对植株生长的影响越大。由图 4 可知,较高土壤容重条件下,表层根系的比例为 91.9%;而低土壤容重处理,表层根系比例为 86.8%,说明土壤容重越高,表层根系比例越高。可见,土壤容重增加可以促进根系向表层分布,限制了根系的下扎,从而不利于夏玉米的生长。

2.2 不同土壤容重和土壤水分对夏玉米、冬小麦产量、产量性状和生物量的影响

不同土壤含水量处理的冬小麦穗粒数、小穗数和千粒重均无显著差异(表 2),但冬小麦穗长有极显著性差异;而不同土壤容重的冬小麦穗粒数、穗长和千粒重也均无显著差异,但冬小麦小穗数有显著性差异。不同土壤含水量和土壤容重互作效应下,冬小麦穗粒数和千粒重差异不显著,但冬小麦穗长和小穗数均有显著性差异。与低水分处理相比,中水分和高水

分处理穗长分别增加 5.7%和 8.0%，但中水分和高水分处理差异不显著。与 1.2 g/cm³ 土壤容重处理相比，1.4、1.6 g/cm³ 土壤容重处理冬小麦小穗数分别增加 2.3%和降低 0.9%，且差异不显著；而 1.6、1.4 g/cm³ 土壤容重处理相比，冬小麦小穗数则显著降低；与低水处理相比，1.2、1.4、1.6 g/cm³ 容重下高水处理夏玉米穗长分别增加 9.2%、0.3%和 11.3%。可见，冬小麦穗长随土壤含水量的增加而提高，1.4 g/cm³ 土壤容重相对有利于冬小麦小穗数的生长，且相比 1.4 g/cm³ 容重处理，1.2、1.6 g/cm³ 容重处理含水量越高，对冬小麦穗长的影响越大。

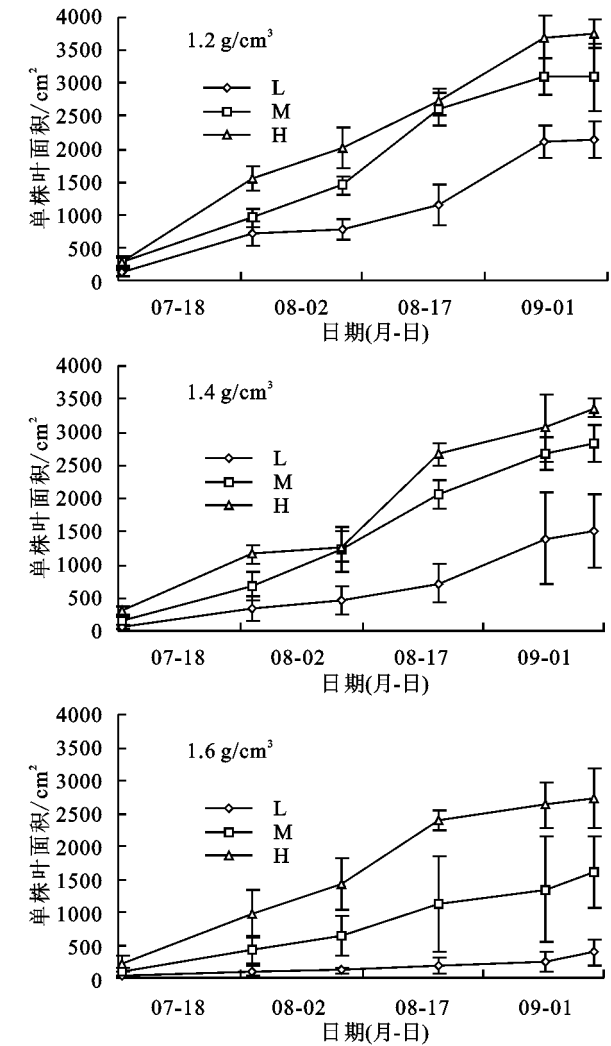


图 2 试验期各处理叶面积变化

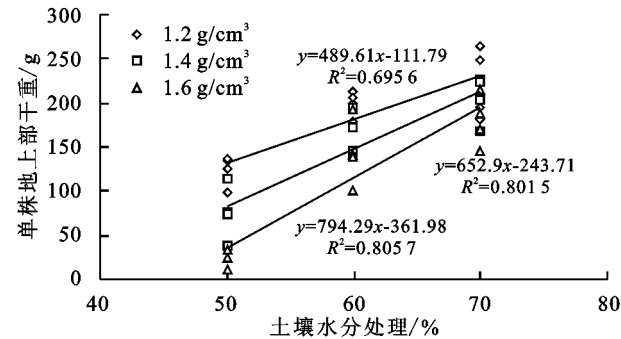


图 3 不同土壤容重条件下地上部干重与土壤水分的关系

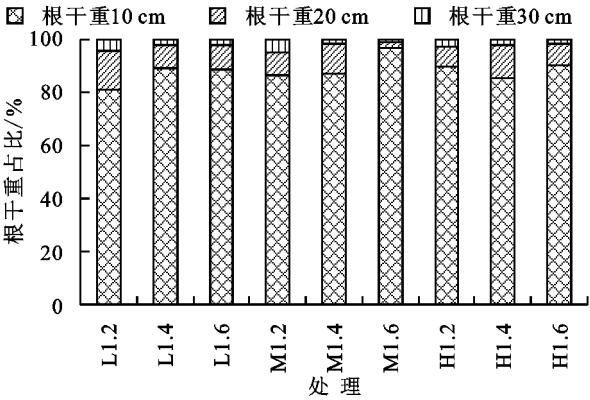


图 4 试验结束时各处理根的垂直分布

表 2 冬小麦不同土壤容重和灌水量处理产量性状比较

处理		穗粒数	穗长/cm	小穗数	千粒重/g
土壤含水量	L	35.58a	7.84b	18.59a	47.32a
	M	39.03a	8.29a	18.68a	47.29a
	H	38.76a	8.37a	18.73a	49.13a
土壤容重	1.2 g/cm ³	38.90a	8.18ab	18.59ab	46.72b
	1.4 g/cm ³	39.02a	8.29a	19.01a	47.6ab
	1.6 g/cm ³	35.48a	8.02b	18.42b	49.29a
土壤含水量		NS	**	NS	NS
土壤容重		NS	NS	*	NS
土壤含水量×土壤容重		NS	*	*	NS

由表 3 可知，不同土壤含水量处理的冬小麦和夏玉米产量和生物量均呈极显著性差异；不同土壤容重处理的冬小麦产量和生物量均呈显著性差异，夏玉米产量和生物量均呈极显著性差异；不同土壤含水量和土壤容重交互效应下冬小麦和夏玉米产量和生物量均差异不显著。与低水分处理相比，高水分处理冬小麦产量和生物量分别提高 66.5%和 66.1%，均达显著性差异；高水分处理夏玉米产量和生物量分别提高 180.9%和 176.0%，均存在显著性差异。与 1.2 g/cm³ 处理相比，冬小麦 1.4 g/cm³ 处理产量和生物量分别提高 18.0%和 15.0%，处理间差异均显著；而 1.6 g/cm³ 处理产量和生物量差异均不显著。夏玉米季土壤容重 1.6 g/cm³ 处理与 1.2 g/cm³ 处理相比，产量和生物量分别降低 36.6%和 36.8%，且差异显著；与低水分处理相比，1.2、1.4、1.6 g/cm³ 容重下高水分处理冬小麦产量分别增加 72.8%、48.9%和 84.5%，生物量分别增加 64.5%、48.2%和 94.0%；与低水分处理相比，1.2、1.4、1.6 g/cm³ 容重下高水分处理夏玉米产量分别增加 78.8%、174.1%和 761.3%，生物量分别增加 76.5%、169.8%和 749.2%。可见，冬小麦、夏玉米产量和生物量随土壤含水量的增加而提高，1.4 g/cm³ 处理的冬小麦产量和生物量最高，夏玉米产量和生物量随土壤容重的增加而降低；随土壤容重增加，含水量越高对夏玉米产量和生物量的影响越大；与 1.4 g/cm³ 容重处理相比，1.2、1.6 g/cm³ 容重处理含水量越高，对冬小麦产量和生物量影响越大。

表 3 冬小麦—夏玉米不同土壤容重和灌水量处理产量和生物量比较 单位: kg/hm²

处理		冬小麦		夏玉米	
		产量	生物量	产量	生物量
土壤含水量	L	5475.30c	9275.10c	3302.25c	6602.25c
	M	8278.20b	13748.10b	7549.65b	15189.15b
	H	9114.15a	15408.45a	9276.45a	18223.05a
土壤容重	1.2 g/cm ³	7065.75b	12270.15b	8113.95a	16310.25a
	1.4 g/cm ³	8336.85a	14116.80a	6811.50b	13323.00b
	1.6 g/cm ³	7470.00b	12075.30b	5141.70c	10313.55c
土壤含水量		* *	* *	* *	* *
土壤容重		*	*	* *	* *
土壤含水量×土壤容重		NS	NS	NS	NS

2.3 不同土壤容重和土壤水分对夏玉米—冬小麦耗水量和水分利用效率的影响

不同土壤含水量处理的冬小麦耗水量、夏玉米耗水量与水分利用效率均呈极显著性差异(表 4),但冬小麦水分利用效率差异不显著;不同土壤容重处理的冬小麦和夏玉米耗水量和水分利用效率均呈极显著性差异;不同土壤含水量和土壤容重互作效应下冬小麦耗水量和水分利用效率均无显著性差异,而夏玉米耗水量和水分利用效率均呈极显著差异。

表 4 冬小麦—夏玉米不同土壤容重和灌水量处理需水量和水分利用效率比较

处理		冬小麦		夏玉米	
		耗水量/	水分利用效率/	耗水量/	水分利用效率/
		mm	(kg·m ⁻³)	mm	(kg·m ⁻³)
土壤含水量	L	242.72c	1.65a	172.33c	1.13b
	M	436.97b	1.49a	314.29b	1.67a
	H	515.82a	1.24a	376.51a	1.61a
土壤容重	1.2 g/cm ³	488.87a	1.89a	323.90a	1.68a
	1.4 g/cm ³	395.34b	1.52a	311.40a	1.38b
	1.6 g/cm ³	307.84c	0.98b	227.83b	1.36b
土壤含水量		* *	NS	* *	* *
土壤容重		* *	* *	* *	* *
土壤含水量×土壤容重		NS	NS	* *	* *

与低水分处理相比,冬小麦和夏玉米高水分处理耗水量分别增加 112.5%和 118.5%,差异均显著;夏玉米高水分处理水分利用效率增加 42.5%,中水分与高水分处理夏玉米水分利用效率差异不显著。与 1.2 g/cm³ 土壤容重处理相比,冬小麦 1.6 g/cm³ 处理耗水量和水分利用效率分别降低 37.0%和 48.1%,差异显著;水分利用效率在 1.4,1.2 g/cm³ 处理间没有显著性差异;夏玉米 1.6 g/cm³ 处理耗水量降低 29.7%,1.4,1.2 g/cm³ 处理间差异不显著;夏玉米 1.6 g/cm³ 处理水分利用效率降低 19.0%,1.4,1.6 g/cm³ 处理间没有显著性差异。与低水分处理相比,1.2,1.4,1.6 g/cm³ 容重下高水分处理冬小麦耗水量分别增加 104.7%,77.5%和 182.6%,夏玉米耗水量分别增加 61.5%,99.8%和 305.3%。可见,冬小麦、夏

玉米耗水量和水分利用效率随土壤含水量的增加而增加,随土壤容重的增加而减少;随土壤容重的增加,含水量越高对夏玉米耗水量的影响越大,与 1.4 g/cm³ 容重处理相比,1.2,1.6 g/cm³ 容重处理含水量越高,对冬小麦耗水量的影响越大。

3 讨论

有研究^[8]表明,土壤紧实度过大严重阻碍玉米根系的生长、分布及吸收功能^[7],降低玉米株高、地上与地下部分的干重。本试验中,较高土壤容重条件下,夏玉米表层根系的比例高达 91.6%,根系更多的向上层土壤分布,限制根系的下扎,从而不利于夏玉米的生长,其株高、叶面积、地上部分干重、根干重和产量都随土壤容重的增加而降低。同时也有研究^[14]认为,土壤容重为 1.2~1.6 g/cm³ 时,随土壤容重的增加,玉米株高、单株叶面积、总根量、植株干物质累积和籽粒产量总体呈现减少趋势,且容重越大,降幅越显著。这与本试验的结果基本一致,即在较低土壤容重 1.2 g/cm³ 时玉米产量最高。而针对小麦,已有研究^[15]表明,适宜的土壤容重可使小麦获得高产,即土壤过度疏松或紧实都可造成小麦减产。同样本试验结果表明,土壤容重和水分处理均显著影响生物量和产量;在任意水分处理,产量和生物量均在容重 1.4 g/cm³ 时最大,这说明适宜的土壤容重可能有利于冬小麦高产。

水分亏缺也会对作物产量造成一定程度的影响^[16],水分重度亏缺会严重影响作物生长发育进程,从而导致其减产^[17]。水分亏缺导致冬小麦光合作用降低,光合产物减少,降低关键酶活性,进而影响光合产物向籽粒的运转和分配,最终导致产量降低^[18]。随着水分胁迫程度的加剧,冬小麦干物质累积及籽粒产量受到的抑制作用逐渐增强,重度胁迫下产量甚至可减少 1/2^[19]。不同水分亏缺程度会对玉米产量有不同程度影响,也会造成玉米生物量和产量的降低^[20]。试验中,不同水分处理冬小麦和夏玉米产量及生物量均随土壤水分亏缺程度的增加而降低,这与

已有研究^[21]结果相一致。土壤紧实使得其对水分的调节能力下降,降低土壤的水分存储能力,作物耗水量减少,不利于植物生长。土壤容重增加在中低水分处理显著降低作物耗水量。土壤容重 1.6 g/cm^3 处理的作物耗水量在各水分处理中均为最低。以相同水分条件下 1.2 g/cm^3 土壤容重处理为参照, 1.6 g/cm^3 处理在中水分条件下的夏玉米耗水量为 1.2 g/cm^3 处理的 62.8%, 1.6 g/cm^3 处理在低水分条件下的夏玉米耗水量仅为 1.2 g/cm^3 处理的 38.7%;以相同水分条件下 1.2 g/cm^3 土壤容重处理为参照, 1.6 g/cm^3 处理在中水分条件下的冬小麦耗水量为 1.2 g/cm^3 处理的 53.7%, 1.6 g/cm^3 处理在低水分条件下的冬小麦耗水量仅为 1.2 g/cm^3 处理的 54.5%。

4 结论

随水分亏缺程度的加剧,冬小麦和夏玉米生长指标、生物量、耗水量、产量均呈降低趋势。随土壤容重增加,冬小麦生物量和产量呈先升高再降低的趋势,冬小麦耗水量和水分利用效率呈降低趋势;而夏玉米产量、耗水量和水分利用效率均呈降低趋势。随土壤容重的增加,土壤紧实对作物生长的限制作用受土壤水分的影响较大,表现为土壤水分的减少会加剧土壤容重对作物生长的限制作用。土壤容重和水分胁迫互作对夏玉米株高、耗水量和水分利用效率呈极显著影响,而对冬小麦和夏玉米生物量及产量无显著影响。

参考文献:

- [1] 石磊,王娟铃,许明祥,等. 陕西省农田土壤紧实度空间变异及其影响因素[J]. 西北农业学报, 2016, 25(5): 770-778.
- [2] 刘宁,李新举,郭斌,等. 机械压实过程中复垦土壤紧实度影响因素的模拟分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 183-190.
- [3] 周李磊,朱华忠,钟华平,等. 新疆伊犁地区草地土壤容重空间格局分析[J]. 2016, 25(1): 64-75.
- [4] Motavalli P P, Anderson S H, Pengthamkeerati P. Surface compaction and poultry litter effects on corn growth, nitrogen availability, and physical proper-ties of a claypan soil[J]. Field Crops Research, 2003, 84: 303-318.
- [5] Alvaro F J, Lampurlanes J, Cantero M C. Alternative crop rotations under mediterranean no-tillage conditions: Biomass, grain yield, and water-use efficiency [J]. Agronomy Journal, 2009, 101: 1227-1233.
- [6] Soane B D, Ball B C, Arvidsson J, et al. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment[J]. Soil Tillage Research, 2012, 118: 66-87.

- [7] 王群,李潮海,李全忠,等. 紧实胁迫对不同类型土壤玉米根系时空分布及活力的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(10): 2039-2050.
- [8] Ashraf T, Virginie G R, Sylvain P, et al. Effect of soil compaction on photosynthesis and carbon partitioning within a maize-soil system[J]. Soil and Tillage Research, 2003, 71(2): 151-161.
- [9] Benigno S M, Cawthray G R, Dixon K W, et al. Soil physical strength rather than excess ethylene reduces root elongation of eucalyptus seedlings in mechanically impeded sandy soils[J]. Plant Growth Regulation, 2012, 68(2): 261-270.
- [10] Morell F J, Cantero-Martinez C, Alvaro-Fuentes J, et al. Root growth of barley as affected by tillage systems and nitrogen fertilization in a semiarid mediterranean agroecosystem[J]. Agronomy Journal, 2011, 103: 1270-1275.
- [11] Arvidsson J, Håkansson I. Response of different crops to soil compaction-short-term effects in Swedish field experiments[J]. Soil Tillage Research, 2014, 138: 56-63.
- [12] Håkansson I, Lipiec J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction[J]. Soil Tillage Research, 2000, 53: 71-85.
- [13] Liu X B, Zhang X Y, Wang Y X, et al. Soil degradation: A problem threatening the sustainable development of agriculture in Northeast China[J]. Plant Soil Environment, 2010, 56: 87-97.
- [14] 韩成卫,孔晓民,宋春林,等. 山东省褐土土壤容重对玉米生长发育及产量形成的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(6): 143-148.
- [15] 黄细喜. 土壤紧实度及层次对小麦生长的影响[J]. 土壤学报, 1988, 25(1): 59-65.
- [16] 蔡红涛,汤一卒,刁品春,等. 棉花花铃期土壤持续干旱胁迫对产量形成的调节效应[J]. 棉花学报, 2008, 20(4): 300-305.
- [17] Wu J, Liu M, Lü A, et al. The variation of the water deficit during the winter wheat growing season and its impact on crop yield in the North China Plain[J]. International Journal of Biometeorology, 2014, 58(9): 1951-1960.
- [18] 高阳,黄玲,李新强,等. 开花后水分胁迫对冬小麦旗叶光合作用和保护酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 201-206.
- [19] 盛钰,赵成义,贾宏涛. 水分胁迫对冬小麦光合及生物学特性的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 193-196.
- [20] 周伟,徐宝山. 不同水分处理对玉米生理生长指标及产量的影响[J]. 甘肃水利水电技术, 2016, 52(3): 11-14.
- [21] 吕殿青,邵明安,潘云. 容重变化与土壤水分特征的依赖关系研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 209-216.