

喷灌配套耕作措施对土壤物理性质及玉米生长的影响

汪 然^{1,2}, 万书勤¹, 康跃虎¹, 刘士平¹

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:针对东北雨养区中心支轴式喷灌机的发展,和对与之配套的耕作与农艺管理措施的迫切需求,以玉米为研究对象,分别在 2014 年及 2015 年在东北西部内蒙古通辽地区开展了中心支轴式喷灌机喷灌条件下鱼鳞坑、深松及深松+鱼鳞坑耕作等配套耕作措施对土壤物理性质及玉米生长影响的田间试验研究。结果表明:与传统免耕相比,不同耕作措施均能有效降低 0—40 cm 深度的土壤容重,提高土壤孔隙度和土壤饱和导水率,从而改善了土壤结构;虽然深松、深松+鱼鳞坑两个处理之间玉米的产量没有显著差异,但是采用深松、深松+鱼鳞坑耕作措施可以增加玉米的茎粗和株高,并提高穗部干物质积累速率、穗干重比例和百粒重,有利于玉米的增产。

关键词:喷灌; 耕作措施; 土壤物理性质; 玉米

中图分类号:S152.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)05-0106-05

Influence of Matching Tillage Measures on Soil Characteristics and Maize Growth Under Sprinkler

WANG Ran^{1,2}, WAN Shuqin¹, KANG Yuehu¹, LIU Shiping¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Surface Processes, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Under the background of global climate change, the drought disaster in rain-fed district becomes more serious, which restricts the local maize's production. The rich land resource fails to give full exertion, so water saving irrigation technology is well developed in the Northeast China these years. For the sprinkler's development and its demand for matching tillage and agronomic management in the rain-fed district of North-east China, with maize as the research object, a field experiment with four tillage (no tillage, subsoiling-tillage, scale-like pit tillage, subsoiling plus scale-like pit tillage) was conducted to investigate the tillage effects on soil characteristic and maize growth in 2014 and 2015. The main results show as follows: three different tillage patterns can improve the soil structure by reducing the bulk density and improving the soil porosity and infiltration rate of the surface soil (0—40 cm); Though the difference of yield between the subsoiling tillage and the subsoiling plus scale-like pit tillage are not significant, the subsoiling tillage and subsoiling plus scale-like pit tillage can improve the height, stem diameter, 100 seed weight, corn ear dry weight and the dry matter accumulation rate in the stage of maize growth, which is beneficial to increase the yield; Compared with the conventional no tillage, the two tillage treatment can increase the yield of maize significantly.

Keywords: sprinkler irrigation; tillage; soil characteristic; maize

东北四省区不仅是我国重要的粮食主产区之一,也是我国粮食总产潜力最大的地区,东北地区玉米产量直接制约着我国玉米总产量^[1-2]。四省区三分之二的耕地以雨养农业为主^[3-4],然而随着气候变化影响的加剧,雨养区农业旱灾有增加的趋势,粮食产量低而不稳,尤其是春旱严重,制约了当地玉米生产,以致丰富的土地资源优劣未能有效发挥^[5-7]。为充分

降低气候变化对东北地区玉米产量的影响,喷灌尤其是中心支轴式喷灌机在东北各地获得了大力发展和推广普及,并取得了一定经济效益^[8]。

中心支轴式喷灌机在工作时,支管上安装的喷头离中心支轴越远,线速度越大,为达到设计灌水定额,越远位置喷灌强度越大,在机组末端喷灌强度往往大于 100 mm/h,容易产生短时间的地表径流^[9],因此与

收稿日期:2016-01-28

修回日期:2016-02-04

资助项目:国家科技支撑计划课题(2014BAD12B05,2013BAD05B08)

第一作者:汪然(1990—),男,安徽舒城人,在读硕士,主要从事农田节水灌溉研究。E-mail:1144069218@qq.com

通信作者:万书勤(1978—),女,江西抚州人,副研究员,硕士生导师,主要从事农田水循环与节水灌溉研究。E-mail:wansq@igsrr.ac.cn

之配套的耕作、农艺管理等措施的综合集成非常重要。目前我国东北四省区中心支轴式喷灌机灌溉下,作物的耕作模式大多还是沿用传统地面灌溉方式下的模式,这在一定程度上抑制了喷灌机综合效益的发挥。

深松耕作可有效打破犁底层,加深耕层,熟化底土,利于作物根系深扎,并能蓄雨贮墒,减少地表径流^[10]。鱼鳞坑是一种水土保持措施,具有一定蓄水能力,可保土保水保肥,减少水土流失^[11-12]。本试验主要研究通辽地区中心支轴式喷灌机灌溉条件下配套深松、鱼鳞坑等耕作措施对土壤物理性质及玉米生长等的影响,以期为东北四省区中心支轴式喷灌机的高效利用提供技术支持。

1 试验区概况及试验设计

1.1 试验区概况

本试验 2014—2015 年在通辽保康县巨宝山村开展。试验区位于内蒙古自治区东部,属于农牧交错地带,当地年平均气温 3℃左右,年平均日照时数 3 000 h

左右,年平均降水量约 380 mm,且主要集中在 6—8 月。当地水资源短缺,降雨较少,蒸发量大,主要农作物为玉米。该区地势较为平坦,但是由于风沙作用,比较容易形成坡地,当地称“沙坨子”。试验区土壤为砂质壤土,土壤基础养分状况见表 1。

1.2 试验设计

在玉米中心支轴式喷灌机灌溉区开展配套耕作措施研究。2014 年布置一个鱼鳞坑(SPT)耕作措施处理,2015 年布置深松(ST)、深松+鱼鳞坑(SST)两个耕作措施处理,两年都以不作任何耕作措施的免耕(NT)作为对照,每个处理三个重复。

2014 年、2015 年玉米齐出苗之后,在垄间挖鱼鳞坑,鱼鳞坑为直径 30 cm,深度 30 cm 左右的圆形坑;2015 年 4 月 9 日采用大型拖拉机(450 匹)进行深松,深松深度为 40 cm 左右。试验区玉米品种为伟科 702。2014 年玉米 5 月 21 日齐苗,7 月 21 日开始抽穗,10 月 4 日收获。2015 年玉米 6 月 6 日齐苗,7 月 22 日开始抽穗,10 月 6 日收获。

表 1 试验区土壤基础养分状况

深度/ cm	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	铵态氮/ (mg·kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
0—20	14.41	0.80	0.27	17.46	6.79	5.55	2.15	146.50
20—40	11.37	0.72	0.22	17.13	12.19	2.65	1.15	84.50
40—60	7.73	0.33	0.17	17.41	8.95	0.48	0.90	70.00

1.3 试验观测与方法

1.3.1 土壤容重、孔隙度及饱和导水率 在玉米播种前与收获后,各个处理分别在 0—10,30—40 cm 两个深度取三个土样测容重及饱和导水率,重复三次,以上数据均取平均值。其中容重用环刀法测定,饱和导水率用特制的环刀取土带回实验室用定水位法测定。

土壤总孔隙度计算公式为^[13]:
$$P=(1-d_i \cdot \rho) \times 100\%$$

式中: P 表示土壤总孔隙度(%); d_i 表示土壤容重(g/cm^3); ρ 表示土壤密度(g/cm^3),采用“常用密度值”(2.65 g/cm^3)。

1.3.2 玉米冠层水面蒸发量监测 在玉米冠层顶部安装一直径为 20 cm 的铜质标准蒸发皿,蒸发皿高度随作物高度增加而调整。蒸发皿为自动补水式,可以自动记录皿内水量,精度达到 1 mm。同时,每天定时(8:00)观测蒸发皿剩余水量。

1.3.3 玉米生长指标及产量指标 玉米生育前期每个小区固定 10 株玉米,测定玉米株高及茎粗,数据取平均值;待玉米抽穗后开始测玉米干物质重量,在每个小区随机取三株玉米,分别包括茎、叶及穗;收获期每个小区随机取 25 个玉米穗,考种并测产,考种项目主要包括棒长、秃尖、棒行数、百粒重及出籽率。

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 进行数据处理和图表绘制,并采用 SAS 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 灌溉、降雨及冠层水面蒸发量

图 1 为 2014 年、2015 年玉米生育期内冠层累计降雨量、水面蒸发量以及灌溉量。从图 1 可知,2015 年玉米在生育期内的有效降雨次数明显较 2014 年多,分别为 35 次和 23 次,但是累计降雨量差异不大,分别为 287.64,283.62 mm,2015 年的有效降雨次数明显较 2014 年多,但是总降雨量差异不大。其中在 2014 年 7 月中旬单次最大降雨量达 94 mm,占玉米生育期降雨量的 1.3 左右,7 月 17—19 日三日降雨达 152 mm,占整个玉米生育期降雨量的 50%以上;而 2015 年最大降雨量为 7 月底的 56 mm,远低于 2014 年的最大降雨量,且降雨分布更加均匀。频繁、均匀的降雨明显降低了玉米冠层的水面蒸发量。2014 年玉米生育期内冠层累计水面蒸发量为 718.03 mm,而 2015 年的累计水面蒸发量仅为 632.40 mm,较 2014 年降低了 11.9%。总体而言,2014 年和

2015 年分别是年干旱年、平水年。2014 年玉米灌溉了 3 次,平均每次灌水量平均为 23.7 mm,总灌水量 71.0 mm;而 2015 年玉米仅灌溉了 1 次,灌水量 27 mm。这主要是因为 2015 年降雨次数多、降雨分布均匀,使得玉米生育期内 2015 年土壤墒情明显较 2014 年的好,因此减少了灌溉次数和总灌水量。因此,与 2015 年相比,2014 年的大的降雨以及更多次数的灌溉,更易产生地表径流。

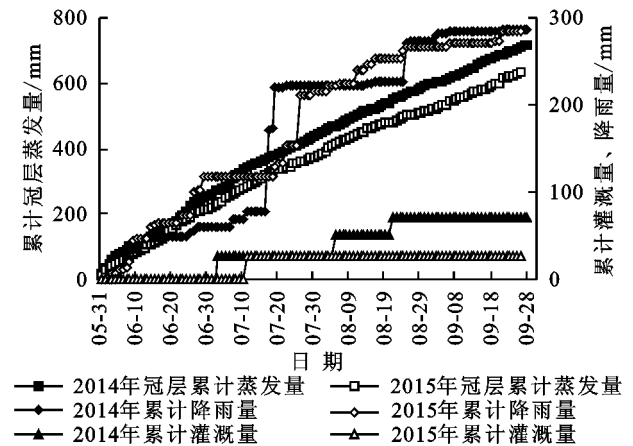


图 1 玉米生育期不同年限累计灌溉、降雨及冠层蒸发量

表 2 2014—2015 年不同耕作处理下不同深度土壤容重 g/cm^3

年份	处理	5 月 31 日		10 月 1 日	
		0—10 cm	30—40 cm	0—10 cm	30—40 cm
2014	NT(免耕对照)	—	—	1.56a	1.61a
	SPT(鱼鳞坑)	—	—	1.35b	1.48b
2015	NT(免耕对照)	1.72a	1.67a	1.59a	1.72a
	ST(深松)	1.63b	1.66a	1.60a	1.63b
	SST(深松+鱼鳞坑)	1.58b	1.61b	1.57a	1.71a

注:不同字母表示处理之间显著水平差异($p<0.05$)。下表同。

此外,从表 2 中还可以发现,与 2014 年 10 月份土壤容重相比,经过一个冬季后,2015 年 5 月份不同层次土壤容重都增加了,这主要受土壤冻融过程、干湿交替和耕作措施等的综合影响。2015 年玉米生育期后,与试验初期(2015 年 5 月 31 日)相比,试验末期(2015 年 10 月 1 日)所有处理表层 0—10 cm 土壤容重均降低了,尤其是免耕对照处理,土壤容重由 1.72 g/cm^3 降低到了 1.59 g/cm^3 ,降低了 7.6%,深松、深松+鱼鳞坑处理土壤容重仅分别降低了 1.8%和 0.6%;但是免耕、深松+鱼鳞坑处理 30—40 cm 土壤容重均增加到了 1.70 g/cm^3 以上,分别增加了 3.0%,6.2%。这主要

2.2 不同耕作措施对土壤表层容重及孔隙度的影响

试验发现,与当地传统对照免耕相比,2015 年 5 月 31 日,深松、深松+鱼鳞坑耕作措施都可以降低土壤容重,0—10 cm 的土壤容重分别降低了 5.2%和 8.1%,30—40 cm 的土壤容重分别降低了 0.6%和 3.6%,其中后者土壤容重降低的较前者快,说明在试验初期(5 月 31 日),深松+鱼鳞坑综合耕作措施较深松单项耕作措施降低土壤容重的效果更好,尤其是对于表层 0—10 cm 的土壤(表 2)。

玉米生育期后(10 月 1 日),2014 年的配套鱼鳞坑耕作措施显著降低了土壤容重,其中,0—10 cm 和 30—40 cm 的土壤容重分别降低了 13.5%和 8.1%。然而 2015 年的深松、深松+鱼鳞坑耕作措施对土壤容重的影响不明显,0—10 cm 的土壤容重分别降低了一 0.6%和 1.3%,30—40 cm 的土壤容重分别降低了 5.2%和 0.6%,可能的原因是 2015 年降雨分布均匀、降雨次数多但大降雨少,灌水也仅灌溉了一次,因降雨和灌溉造成地表径流的少。因此与当地传统对照免耕相比,深松、深松+鱼鳞坑耕作措施的效果不明显。

同玉米的生长以及土壤的空间变异等有关。

土壤总孔隙度是指单位容积土壤内孔隙所占的百分比。由表 3 可知,2014 年试验末期鱼鳞坑土壤总孔隙度较对照土壤总孔隙度显著提高,其中 0—10 cm 提高近 20%,30—40 cm 提高近 13%。2015 年,试验初期,深松及深松+鱼鳞坑耕作措施较对照免耕显著提高了土壤总孔隙度,但是试验末期,土壤表层(0—10 cm)土壤孔隙度差异不显著。该研究结果同尧水红、曹立为二人研究土壤孔隙度结果一致^[14-15],可能原因是由于 2015 年降雨频率大,土壤干湿交替次数较多,最终土壤表层总孔隙度趋于稳定。

表 3 2014—2015 年不同耕作处理下不同深度土壤总孔隙度 %

年份	处理	5 月 31 日		10 月 1 日	
		0—10 cm	30—40 cm	0—10 cm	30—40 cm
2014 年	NT(免耕对照)	—	—	41.13b	39.25b
	SPT(鱼鳞坑)	—	—	49.06a	44.15a
2015 年	NT(免耕对照)	35.09b	36.98b	40.00a	35.09b
	ST(深松)	38.49a	37.36b	39.62a	38.49a
	SST(深松+鱼鳞坑)	40.38a	39.25a	40.75a	35.47b

2.3 不同耕作措施对土壤饱和和导水率的影响

由表4可知,与当地传统对照免耕相比,2015年深松、深松+鱼鳞坑耕作措施都可显著提高土壤饱和和导水率,尤其是在试验初期(5月31日)表层0—10 cm的土壤饱和和导水率,平均提高了20倍,30—40 cm深度平均提高了3倍;作物生长末期(10月1日)0—10 cm,30—40 cm深度土壤饱和和导水率平均提高了5倍和2倍,然而深松、深松+鱼鳞坑耕作措施之间的土壤饱和和导水率差异并不显著。

另外从表4中还可以发现,玉米生育期后,免耕对照处理,0—10 cm的土壤饱和和导水率增加了,但是30—40 cm深度的减少了,这同土壤容重的变化规律正好相反;而深松、深松+鱼鳞坑处理各层次土壤饱和和导水率均降低。

表4 2015年不同耕作处理下不同深度土壤饱和和导水率K
10² cm/d

小区	5月31日		10月1日	
	0—10 cm	30—40 cm	0—10 cm	30—40 cm
NT(免耕对照)	0.54b	3.92b	1.64b	2.78b
ST(深松)	10.04a	10.54a	7.67a	6.45a
SST(深松+鱼鳞坑)	11.32a	9.76a	8.29a	4.64a

综合表2,3,4可知,鱼鳞坑、深松、深松+鱼鳞坑等耕作措施都能降低土壤容重、提高土壤孔隙度和土壤饱和和导水率,从而改善了土壤结构,改善了土壤的透气透水性能^[16]。尤其是在降雨量集中且有大降雨的年份,鱼鳞坑、深松等耕作措施的效果更明显。

2.4 不同耕作措施下玉米的生长响应

2.4.1 不同耕作措施下玉米茎粗、株高的生长响应

从图2中可知所有处理的茎粗从6月中旬开始快速生长,至7月中旬茎粗达到最大点,随后茎粗开始缓慢减小;在整个玉米生长发育期,免耕对照处理玉米的茎粗低于深松(ST)、深松+鱼鳞坑处理(SST)的茎粗,但是深松及深松+鱼鳞坑耕作措施的株高差异不显著,其中免耕对照玉米茎粗最大值大约为深松、深松+鱼鳞坑处理茎粗最大值的83%左右。所有处理的株高自7月上旬开始进入快速生长期,至7月下旬株高停止生长,8月初株高保持在一定高度。在生长期前期,免耕对照的株高与其他两个处理的差异不显著,在6月中旬以后免耕对照的株高明显低于其他两个处理,但是深松(ST)、深松+鱼鳞坑(SST)耕作措施的株高差异不显著,其中免耕对照株高大约为深松、深松+鱼鳞坑处理株高的95%。

由此可知,采用深松、深松+鱼鳞坑耕作措施后,从作物生长前期开始就为作物提供了良好的生长环境^[17-18],从而使得玉米生长后期的茎粗、株高均高于免耕处理。

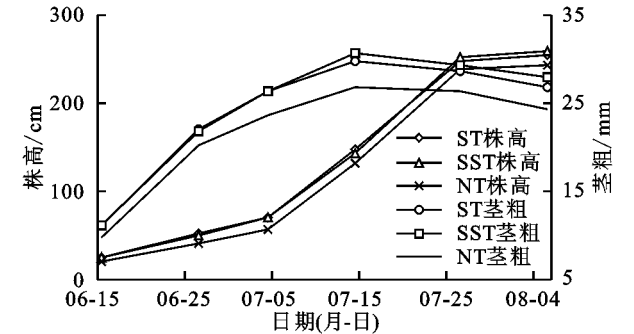


图2 不同耕作措施下玉米株高及茎粗生长的响应

2.4.2 不同耕作措施下玉米生长后期地上部分干物质转移

不同耕作处理对玉米生长后期营养体物质转运的影响详见表5。免耕对照处理(NT)茎及叶鞘和叶片干物质积累最大值出现于抽穗开始时(5 d),而深松(ST)、深松+鱼鳞坑(SST)处理,茎及叶鞘和叶片干物质积累的最大值分别出现于抽穗开始后的15 d。从抽穗后15 d开始,深松、深松+鱼鳞坑处理茎及叶鞘和叶片干物质积累速率明显高于免耕对照处理。进入抽穗期后,玉米籽粒形成开始,营养器官中光合产物向籽粒转运,相较于免耕对照处理,从抽穗后15 d开始,深松、深松+鱼鳞坑处理穗部干物质积累速率明显高于免耕对照处理。

2.4.3 不同耕作措施下玉米生长后期地上部分干物质分配

从表6可以得出,抽穗后5 d,玉米地上部分器官茎及叶片的干物质积累占全株干物质的比重最高,分别达到60%及30%左右,总计占全株地上部分90%的干物质质量。抽穗后25 d,玉米进入灌浆期,此时穗干重占地上部分干物质比例达22%左右。进入灌浆期后,玉米穗及籽粒成为干物质分配的中心,此后玉米穗及籽粒占地上部分干物质的比例不断升高,而茎及叶片占地上部分干物质的比例不断下降。抽穗45 d后,玉米进入蜡熟期,穗及籽粒干重占地上部分干物质重已经达到最大值,达到60%以上。

表5 2015年不同耕作处理对玉米生长后期营养体物质转运的影响 %

器官	处理	5 d	15 d	25 d	35 d	45 d
茎及叶鞘	NT	97.9	86.8	63.5	68.8	70.4
	ST	89.4	98.7	81.6	77.2	77.1
	SST	95.0	101.9	106.6	84.6	76.4
叶	NT	53.7	45.9	27.9	30.2	39.2
	ST	47.7	49.6	36.7	39.2	37.0
	SST	50.9	52.4	44.7	40.9	35.1
穗	NT	13.0	29.2	45.6	93.3	178.6
	ST	12.4	45.1	99.8	150.5	208.7
	SST	14.7	53.6	134.5	165.5	200.5

免耕对照处理玉米的叶片、茎及叶鞘的干重比例均较深松、深松+鱼鳞坑处理的高,且在抽穗后25 d

至抽穗后 35 d,不同处理之间茎及叶鞘的干重比例差异显著,但至抽穗 45 d 后差异不显著;从抽穗后的 5~45 d,深松、深松+鱼鳞坑处理玉米的穗干重比例一直较免耕对照处理的高。由此说明,深松、深松+鱼鳞坑处理能够提高穗及籽粒重。

2.5 不同耕作措施对玉米产量的影响

由表 7 及图 1 可知,2014 年降雨较集中于 7 月中旬,鱼鳞坑在玉米生育期其他阶段对雨水的蓄积作用不显著,尽管在免耕基础上挖鱼鳞坑增加了棒行数(穗粒数),但是总体上鱼鳞坑耕作措施对玉米产量构成及产量的影响有限,两种耕作措施之间产量构成要素及产量差异不显著。2015 年,免耕对照区玉米棒长、秃尖长度、百粒重、产量均与深松、深松+鱼鳞坑处理差异显著,深松、深松+鱼鳞坑处理玉米棒长增加了 4 cm 左右,秃尖长度减少了 1 cm 左右,百粒重增加了 7%~11%,最终产量比免耕对照区增产 16%~17%,总体上深松、深松+鱼鳞坑两种耕作之间玉

米产量构成要素及产量差异不显著,但是产量均较 2014 年的低。

表 6 2015 年玉米生育后期干物质在各器官间的分配比例 %

器官	处理	抽穗后天数				
		5 d	15 d	25 d	35 d	45 d
茎及 叶鞘	NT	59.45a	53.63a	46.37a	35.77a	24.44a
	ST	59.78a	51.05a	37.40b	28.93b	24.36a
	SST	59.15a	49.01a	37.30b	29.07b	24.49a
叶	NT	32.62a	28.35a	20.34a	15.70a	13.60a
	ST	32.12a	25.64a	16.84b	14.70a	11.40a
	SST	31.71a	25.20a	15.64b	14.05a	11.25a
穗	NT	7.92b	18.02a	33.28b	48.53b	61.96a
	ST	8.37a	23.31a	45.76a	56.38a	64.24a
	SST	9.14a	25.79a	47.06a	56.88a	64.26a

综合以上两年玉米产量分析可以得出,与免耕相比,配套深松耕作措施对玉米产量及产量构成影响较显著,而单独的鱼鳞坑耕作措施对玉米增产效果不显著。

表 7 不同耕作措施对玉米产量构成的影响

年份	处理	棒长/cm	秃尖/cm	棒行数	百粒重/g	出籽率/%	产量/(kg·hm ⁻²)
2014	NT	19.86b	1.68b	15.42b	40.02a	79.31a	8936.51a
	SPT	20.23b	1.34b	16.28a	40.48a	79.16a	8996.56a
	NT	17.70b	2.08a	15.20b	39.89b	80.46a	7017.56b
2015	ST	21.16a	1.25b	16.13a	42.69a	78.49a	8151.82a
	SST	21.48a	0.98c	16.20a	44.20a	79.54a	8235.19a

注:2015 年由于玉米种子的问题首次播种出苗率较低,故所有处理均于 5 月 18 日重新播种,由于玉米生长期较 2014 年短,所以产量较 2014 年的低。

3 结论

(1) 与免耕相比,配套鱼鳞坑、深松、深松+鱼鳞坑等耕作措施都可有效降低 0—40 cm 土壤容重,提高土壤孔隙度和土壤饱和导水率,从而改善了土壤结构;尤其是在降雨量集中且有大降雨的年份,鱼鳞坑、深松等耕作措施的效果更明显。

(2) 与免耕相比,深松、深松+鱼鳞坑耕作措施下玉米的茎粗、株高和穗部干物质积累速率生长指标均较高,穗干重比例和百粒重产量指标都相对较大,同时试验区的玉米也增产 16%以上,即深松、深松+鱼鳞坑等耕作措施可为玉米生长提供良好的生长环境,使得玉米长势好,产量高。

参考文献:

[1] 赵春雨.我国粮食生产区域分布演变研究[D].长春:吉林大学,2008.

[2] 马树庆,王琪,罗新兰.基于分期播种的气候变化对东北地区玉米(*Zea mays*)生长发育和产量的影响[J].生态学报,2008,28(5):2131-2139.

[3] 东北玉米[M].北京:中国农业出版社,2007.

[4] 孙仕军,樊玉苗,许志浩,等.东北雨养区地膜覆盖条件下种植密度对玉米田间土壤水分和产量的影响[J].生态学杂志,2014,33(10):2650-2655.

[5] 梁书民.中国雨养农业区旱灾风险综合评价研究[J].干旱区资源与环境,2011,25(7):39-44.

[6] 王素艳,郭海燕,邓彪,等.气候变化对四川盆地作物生产潜力的影响评估[J].高原山地气象研究,2009,29(2):49-53.

[7] 程叶青,张平宇.中国粮食生产的区域格局变化及东北商品粮基地的响应[J].地理科学,2005,25(5):513-520.

[8] 殷春霞,许炳华.我国喷灌发展五十年回顾[J].中国农村水利水电,2003(2):9-11.

[9] 丁惠南,郑仁塘.引进使用美国园形喷灌机若干问题的探讨[J].灌溉排水学报,1981(2):16-30.

[10] 肖继兵,孙占祥,杨久廷,等.半干旱区中耕深松对土壤水分和作物产量的影响[J].土壤通报,2011,42(3):709-714.

[11] 穆兴民,陈霁伟.黄土高原水土保持措施对土壤水分的影响[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(4):39-44.

[12] 李萍,朱清科,赵磊磊,等.黄土丘陵沟壑区鱼鳞坑雨季土壤水分状况[J].农业工程学报,2011,27(7):76-81.

[13] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000.

[9] 张喜,朱军,崔迎春,等. 火烧对黔中喀斯特山地马尾松林土壤理化性质的影响[J]. 生态学报,2011,31(19): 5809-5817.

[10] Kobza R M, Trexler J C, Loftus W F, et al. Community structure of fishes inhabiting aquatic refuges in a threatened Karst wetland and its implications for ecosystem management [J]. Biological Conservation, 2004,116(2):153-165.

[11] 魏强,凌雷,柴春山,等. 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质[J]. 生态学报,2012,32(15):4700-4713.

[12] 熊康宁,黎平,周忠发,等. 喀斯特石漠化的遥感—GIS 典型研究:以贵州省为例[M]. 北京:地质出版社,2002.

[13] 刘丛强,郎赞超,李思亮,等. 喀斯特生态系统生物地球化学过程与物质循环研究:重要性、现状与趋势[J]. 地学前缘,2009,16(6):1-12.

[14] Zhang X, Bai X, He X. Soil creeping in the weathering crust of carbonate rocks and underground soil losses in the karst mountain areas of southwest China[J]. Carbonates and Evaporites, 2011,26(2):149-153.

[15] 邵水仙,董智,李红丽,等. 不同造林模式对退化石灰岩山地土壤理化性质及水文效应的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(1):263-267.

[16] Gentry A H. Changes in plant community diversity and floristic composition on environmental and geographical gradients[J]. Annals of the Missouri Botanical Garden, 1988,75(1):1-34.

[17] Gartlan J S, Newbery D M C, Thomas D W, et al. The influence of topography and soil phosphorus on the vegetation of Korup Forest Reserve, Cameroun [J]. Vegetatio, 1986,65(3):131-148.

[18] 王琳,张金屯,上官铁梁,等. 历山山地草甸的物种多样性及其与土壤理化性质的关系[J]. 应用与环境生物学报,2004,10(1):18-22.

[19] 杨小波,张桃林,吴庆书. 海南琼北地区不同植被类型物种多样性与土壤肥力的关系[J]. 生态学报,2002,22(2):190-196.

[20] 王凯博,陈美玲,秦娟,等. 子午岭植被自然演替中植物多样性变化及其与土壤理化性质的关系[J]. 西北植物学报,2007,27(10):2089-2096.

[21] 王顺忠,陈桂琛,柏玉平,等. 青海湖鸟岛地区植物群落物种多样性与土壤环境因子的关系[J]. 应用生态学报,2015,16(1):186-188.

[22] 刘鸿雁,黄建国. 缙云山森林群落次生演替中土壤理化性质的动态变化[J]. 应用生态学报,2005,16(11): 2041-2046.

[23] 喻理飞,朱守谦,叶镜中,等. 退化喀斯特森林自然恢复过程中群落动态研究[J]. 林业科学,2002,38(1):1-7.

[24] 王庆锁,李博. 鄂尔多斯沙地油蒿群落生物量初步研究[J]. 植物生态学报,1994,18(4):347-353.

[25] 马克平,黄建辉,于顺利. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究[J]. 生态学报,1995,15(3):268-277.

[26] 杜虎,彭晚霞,宋同清,等. 桂北喀斯特峰丛洼地植物群落特征及其与土壤的耦合关系[J]. 植物生态学报, 2013,37(3):197-208.

[27] 盛茂银,刘洋,熊康宁. 中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应[J]. 生态学报,2013,33(19):6303-6313.

[28] 杜荣骞. 生物统计学[M]. 北京:高等教育出版社,2008.

[29] 文丽,宋同清,杜虎,等. 中国西南喀斯特植物群落演替特征及驱动机制[J]. 生态学报,2015,35(17):5822-5833.

[30] 罗光杰,李阳兵,王世杰,等. 岩溶山区景观多样性变化的生态学意义对比:以贵州四个典型地区为例[J]. 生态学报,2011,31(14):3882-3889.

[31] Du Y, Pan G, Li L, et al. Leaf N/P ratio and nutrient reuse between dominant species and stands: predicting phosphorus deficiencies in Karst ecosystems, southwestern China [J]. Environmental Earth Sciences, 2011,64(2):299-309.

[32] Zuber S M, Behnke G D, Nafziger E D, et al. Crop rotation and tillage effects on soil physical and chemical properties in Illinois[J]. Agronomy Journal, 2015,107(3):971-978.



(上接第 110 页)

[14] 尧水红. 干湿交替强度对旱地土壤结构形成及水稻秸秆分解过程的相互作用的影响[D]. 南京:南京农业大学,2005.

[15] 曹立为. 耕层深度及土壤容重大豆生长发育和产量的影响[D]. 北京:东北农业大学,2015.

[16] 彭舜磊,由文辉,沈会涛. 植被群落演替对土壤饱和导水率的影响[J]. 农业工程学报,2010(11):78-84.

[17] 汪三树,史东梅,蒋光毅,等. 紫色丘陵区坡耕地生物埂的土壤结构稳定性与抗蚀性分析[J]. 水土保持学报, 2012,26(6):31-35.

[18] 李玲玲,黄高宝,张仁陟,等. 不同保护性耕作措施对旱作农田土壤水分的影响[J]. 生态学报,2005,25(9): 2326-2332.