文章编号:1000-7601(2019)02-0167-05 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.02.24

不同深松方式对玉米产量和水分利用效率的影响

郑家明,孙占祥,冯良山,杨 宁,白 伟,冯 晨,张 哲,蔡 倩,向午燕

(辽宁省农业科学院,辽宁 沈阳 110161)

摘 要:由于我国北方地区长期采用小型机具进行耕作,导致农田耕层变浅、犁底层向上移动,土壤蓄水能力下降。为了明确不同深松方法对作物产量和水分利用效率的影响,提高作物抗旱能力和生产能力,本研究通过 3 a 定位试验,以春季旋耕为对照(CK),研究了秋季全方位深松(BS)、秋季连年垄台深松(RS)、初夏连年垄沟中耕深松(FS)和秋夏年际交替间隔深松(AS)4 种深松耕作方式的蓄水和增产效应。试验研究结果表明,可以将不同耕作处理土壤容重特征表述为:CK 为上虚下实型、BS 为均匀疏松型、RS 为垄虚沟实型、FS 为垄实沟虚型(相对 RS)、AS 为年际疏松交替型。BS、AS、FS 和 RS 不同年份土壤平均贮水量较 CK 增幅的变化范围分别是 10.9~23.2 mm、10.9~17.2 mm、9.0~15.7 mm 和 6.0~8.2 mm,尽管 AS 的容重在年际间存在更替变化,但对年际间土壤平均贮水量影响较小。总体上 BS 和 AS 土壤贮水量高于 CK 和 RS,提高 10.9~23.2 mm,能够为不同降水年型下玉米稳产提供保障。尤其相对于其他 3 种深松方式,AS 处理 3 a 研究数据玉米持续保持着高生产能力和水分利用效率,较 CK 产量提高 17.22%~28.65%,水分利用效率提高 0.27~0.73 kg·m^{-3};2013 年较 BS 的产量和水分利用效率差异不显著,其他两年分别提高 1.00%~5.92%,0.06~0.20 kg·m^{-3};较 FS 产量提高 5.59%~13.50%,2014 年水分利用效率差异不显著,其他两年提高 0.20~0.43 kg·m^{-3},因此 AS 是较为适宜的深松方式。

关键词:深松方式;土壤容重;水分利用效率;产量;玉米

中图分类号:S513;S365 **文献标志码**:A

Effects of different subsoiling methods on maize yield and water use efficiency

ZHENG Jia-ming, SUN Zhan-xiang, FENG Liang-shan, YANG Ning, BAI Wei, FENG Chen, ZHANG Zhe, CAI Qian, XIANG Wu-yan

(*Liaoning Academy of Agricultural Sciences*, *Shenyang*, *Liaoning* 110161, *China*)

Abstracts: In northern China, the long-term use of small agricultural machinery for tillage has resulted in a thickened and uplifted plow pan, a decreased volume of nutrient-rich topsoil, and lower soil water holding capacity within the farmland. A three-year field research was conducted to investigate the effect of four subsoiling methods, including bulk subsoiling in autumn (BS), annual ridge subsoiling in autumn (RS), annual furrow subsoiling in early summer (FS) and inter-annual alternate zone subsoiling (AS), on soil water-holding capacity and agricultural output. These subsoiling methods were compared with that under the rotary tillage in spring (CK). The results suggested that the bulk density of soil varied with different tillage methods. The soil with BS was uniformly loose, while the soil of CK showed vertically uneven bulk densities of that the upper soil was loose while the lower soil was relatively compact. The soil with RS showed loose ridge soil and compact furrow soil, while the soil with FS yielded the opposite result compared to that with RS. The soil with AS tillage exhibited alternately variation of bulk density from year to year. The increases in the average soil water storage with BS, AS, FS, and RS during crop growth period compared with CK were 10.9~23.2 mm, 10.9~17.2 mm, 9.0~15.7 mm and 6.0~8.2 mm, respec-

收稿日期:2018-01-29 **修回日期**:2019-04-09

基金项目:国家特支计划项目(青年拔尖人才);国家“十二五”科技支撑计划课题 (2014BAD12B05)

作者简介:郑家明(1963-),男,辽宁盖州人,研究员,主要从事旱作与节水农业研究。E-mail:zaipeizjm@126.com

通信作者:孙占祥(1967-),男,辽宁新宾人,研究员,博士, 主要从事旱地耕作制度与节水农业研究。

冯良山(1980-),男,辽宁庄河人, 研究员,博士,主要从事旱作与节水农业研究。E-mail:fenglsh@163.com

tively. Soil bulk density varied yearly with AS treatment, but it had limited effect on the average soil water storage. Overall, soil tilled by BS and AS maintained a high soil water holding capacity, soil water storage increased by 10.9 ~23.2 mm, which could stabilize the yield under different rainfalls between years. Compared to the other three types of subsoiling methods, production capacity and water use efficiency in AS treatment were persistently higher. Compared with CK, yield increased by 17.22%~28.65%, water use efficiency increased by 0.27~0.73 kg · m^{-3}; compared with BS, there were no significant difference in yield and water use efficiency in 2013, but yield and water use efficiency increased by 1.00%~5.92% and 0.06~0.20 kg · m^{-3} in the other two years, respectively; compared with FS, yield increased by 5.59%~13.50%, there was no significant difference in water use efficiency in 2014, but increased by 0.20~0.43 kg · m^{-3} in the other two years. AS was a suitable subsoiling method.

Keywords: subsoiling method; soil bulk density; water use efficiency; yield; corn

中国北方地区春季干旱少雨,夏季降水集中,保蓄降水是该区域抵御旱灾,提高水分利用效率,增加作物产量的重要关键技术[1]。目前中国北方雨养旱作农业区由于土地经营分散,农业生产中多以小型机具为主,加之人们对耕地的连续高强度开发和不合理使用,使农田土壤有效耕层变浅,犁底层加厚并上移,耕层土壤养分质地趋于恶化,地力下降,作物增产及水分利用效率提高受到限制[2]。深松通过深松铲局部打破犁底层,利于集蓄更多降水,减少田间地表径流,促进作物生长,提高水分利用效率,可较好地为区域农业增产和稳产提供保障[3-5]。间隔深松能够在纵向形成虚实并存的结构基础上,横向也形成虚实交替结构,并提高土壤的保水能力和养分有效性[6-8],间隔深松紧实部分还可以促进水分由耕层下部向上部移动的作用,同时虚实并存耕层结构利于玉米生长,具有防止玉米后期倒伏的作用[9]。郑洪兵等[10]通过 31 a 的长期定位试验证明间隔深松耕作是改善土壤硬度,提高土壤宜耕性的有效耕作方法。虚实并存耕层结构能够明显提高玉米出苗率、增加苗期玉米株高、茎粗及叶片数,并显著提高玉米产量,增产幅度为8.17%~15.02%[11]。其中苗紧行松的间隔耕作方式能有效降低土壤硬度,提高土壤含水量,改善土壤结构,促使耕层土壤水气协调[12]。目前研究多采用定位的方式,对垄和沟间隔深松年际间更替的效果研究较少。秋夏年际交替间隔深松主要指秋收后进行垄台深松,至第二年初夏玉米拔节前进行垄沟中耕深松,两种深松方法在不同年份交替进行。秋夏年际交替间隔深松有效地将秋季间隔深松和初夏农田中耕深松结合起来,我们对其技术效果亦进行了研究。

1 材料与方法

1.1 试验地点与试验材料

试验在农业部辽宁阜新农业环境与耕地保育科学观测试验站进行,玉米品种为郑单 958,试验田土壤为褐土,耕作试验之前农田长期没有进行深松耕作,一直采用春季灭茬(浅旋耕 8 cm 左右)后直接播种的种植方式。2012 年、2013 年和 2014 年降水量分别为 483.7、462.3、216.3 mm。

1.2 试验设计

试验设秋季全方位深松(BS),秋季连年垄台深松(RS),初夏连年垄沟中耕深松(FS)等方式,于 6 月上旬玉米拔节前进行作业;秋夏年际交替间隔深松(AS),2011 年为秋季垄台深松、2012 年为 6 月上旬玉米拔节前垄沟中耕,以此年际间交替实施;以春季旋耕 15cm 为对照(CK)。每个试验处理面积为 300 m^2,重复 3 次,深松深度均为 28cm,玉米种植密度为 60 000 株 · hm^{-2},播种时施用三元复合肥(N、P_2O_5、K_2O含量均为 15%)375 kg · hm^{-2},拔节期前追施尿素(N 含量为 46%)375 kg · hm^{-2}。2012 年、2013 年和 2014 年玉米播种期分别为 4 月 29 日、4 月 30 日、5 月 6 日,收获时期分别为 9 月 25 日、9 月 27 日和 9 月 21 日。

1.3 调查内容与方法

1.3.1 土壤容重 每年玉米收获后深松作业实施前采用环刀法分别测定每个小区垄上和垄沟土壤容重,每 5 cm 为一测定层次,纵向分别计算 0~15 cm 和 15~30 cm 平均土壤容重,横向分别计算垄和沟平均土壤容重。

1.3.2 土壤含水量与贮水量 玉米生长关键时期在玉米垄和沟交接处采用土钻钻取土壤样本,用 105℃烘干法测定 0~100 cm 土壤含水量(约 1 个月测定 1 次),每 10 cm 为 1 个测定层次,并计算土壤贮水量,如公式(1)。0~30 cm 土壤容重按照每年测定结果进行计算,30~100 cm 土壤按照平均土壤容重 1.5 g · cm^{-3}进行计算。

$$W = \phi m \cdot \rho \cdot h \qquad (1)$$

式中,W 为土壤贮水量(mm),ϕm 为土壤重量含水

量(%),ρ 为土壤容重(g · cm^{-3}),h 为土壤厚度(mm)。

1.3.3　土壤耗水量　采用土壤水分平衡法式(2)进行计算。

$$ET = I + P - RO - DP + CR \pm \Delta SF \pm \Delta SW \quad (2)$$

式中,ET 为作物生育期耗水量(mm),I 和 P 分别为该时段内的灌水量和降雨量(mm),RO 为降雨和灌溉时土壤的表面径流量(mm)(本试验由于田间设有田埂,因此忽略),DP 为深层土壤渗漏量(mm),CR 为地下水由毛管上升到根区的水量(mm)(由于试验田地下水位较低,因此忽略),ΔSF 为土壤水侧向渗漏量(mm),包括侧向流入量 SF_{in} 和侧向流出量 SF_{out}2 项(本试验忽略),ΔSW 为土壤含水量的变化量(mm)。

1.3.4　作物产量与水分利用效率　玉米成熟时测定每个小区玉米产量,采样小区面积为 50 m^2。同时计算玉米水分利用效率,计算公式如下式。

$$WUE = 0.1 \cdot Y/ET \quad (3)$$

式中,WUE 为作物水分利用效率(kg · m^{-3}),Y 为作物单位面积产量(kg · hm^{-2}),ET 为作物生育期耗水量(mm)。

2　结果与分析

2.1　不同耕作方式对土壤容重的影响

作物收获后 0~30 cm 土层不同耕作方式下土壤容重纵向分布情况如表 1 所示,在试验实施前(2011 年秋季)各处理差异不显著。采用不同耕作方式后,0~15 cm 土层平均土壤容重 CK 一直处于最低水平,2012 年 RS>FS>BS≈AS>CK;2013 年 AS>FS≈RS>BS>CK;2014 年 FS≈RS>AS≈BS≈CK。15~30 cm 土层平均土壤容重 CK 一直处于最高水平,2012 年 CK>RS>FS>AS≈BS;2013 年 CK>RS≈AS≈FS>BS;2014 年 CK>RS≈FS>AS≈BS。

作物收获后 0~30 cm 土层不同耕作方式下土壤容重横向分布情况如表 2 所示,CK 无论垄或沟其土壤容重一直处于最高水平。垄体位置土壤容重,2012 年 CK>FS>AS ≈RS≈BS;2013 年 CK>FS≈AS>RS≈BS;2014 年 CK>FS>AS≈RS≈BS。垄沟位置土壤容重,2012 年 CK>RS>BS≈FS≈AS;2013 年 CK≈RS>AS>BS≈FS;2014 年 CK>RS>BS≈AS≈FS。

根据以上土壤容重特征,我们可以将不同处理土壤容重表述为:CK 为上虚下实型,BS 为均匀疏松型,RS 为垄虚沟实型,FS 为垄实沟虚型(相对其它处理),AS 为年际疏松交替型。

2.2　不同耕作方式对土壤水分的影响

不同耕作方式对土壤贮水量的影响如图 1(a)所示,2012 年、2013 年及 2014 年玉米生育前期降水相对丰沛,采用深松作业后土壤的蓄水能力较 CK 高,2014 年玉米生育后期试验 区域遭受历史罕见的严重伏旱[13-14],使土壤贮水量大量消耗,深松处理保蓄的土壤水分显然成为作物稳产的关键因素之一。

表 1　2011-2014 年不同耕作方式下土壤容重纵向变化情况/(g · cm^{-3})

Table 1　Vertical variations of soil bulk density under different treatments in 2011-2014

处理 Treatment	2011		2012		2013		2014	
	0~15 cm	15~30 cm	0~15 cm	15~30 cm	0~15 cm	15~30 cm	0~15 cm	15~30 cm
CK	1.299 aA	1.459 aA	1.272 dD	1.465 aA	1.261 dC	1.464 aA	1.280 bB	1.459 aA
BS	1.300 aA	1.457 aA	1.281 cC	1.369 dD	1.277 cB	1.359 dD	1.278 bB	1.364 cB
RS	1.301 aA	1.451 aA	1.304 aA	1.403 bB	1.292 bA	1.392 bB	1.290 aA	1.379 bB
FS	1.313 aA	1.442 aA	1.295 bB	1.382 cC	1.292 bA	1.377 cC	1.293 aA	1.372 bB
AS	1.292 aA	1.451 aA	1.281 cC	1.370 dD	1.304 aA	1.388 bBC	1.279 bB	1.365 cB

注:同列不同小写字母表示 $LSD_{0.05}$ 差异显著;同列不同大写字母表示 $LSD_{0.01}$ 差异显著,下同。

Note: Different lowercase letters in the same column showed significant differences in $LSD_{0.05}$, while different uppercase letters showed significant differences in $LSD_{0.01}$, the same below.

表 2　2011-2014 年不同耕作方式下土壤容重横向(0~30 cm)变化情况/(g · cm^{-3})

Table 2　Lateral variations of soil bulk density under different treatments in 2011-2014

处理 Treatment	2011		2012		2013		2014	
	垄 Ridge	沟 Furrow	垄 Ridge	沟 Furrow	垄 Ridge	沟 Furrow	垄 Ridge	沟 Furrow
CK	1.358 aA	1.400 aA	1.349 aA	1.387 aA	1.344 aA	1.381 aA	1.352 aA	1.387 aA
BS	1.353 aA	1.404 aA	1.307 cC	1.342 cC	1.299 cC	1.337 cC	1.300 dC	1.343 cC
RS	1.361 aA	1.391 aA	1.311 cC	1.397 bB	1.304 cC	1.380 aA	1.303 cdC	1.366 bB
FS	1.348 aA	1.407 aA	1.339 bB	1.339 cC	1.338 bAB	1.331 cC	1.331 bB	1.334 cC
AS	1.351 aA	1.392 aA	1.312 cC	1.339 cC	1.335 bB	1.358 bB	1.306 cC	1.338 cC

对玉米生育期土壤平均贮水量进行比较,采用深松耕作均能提高土壤贮水量,如图 1(b)。其中 2012 年玉米生育期土壤平均贮水量 BS、AS、FS 和 RS 均显著高于 CK,经计算分别提高 10.9、10.9、9.0 mm 和8.2 mm;2013 年玉米生育期平均土壤贮水量 BS 最高,较 CK 高 16.3 mm,其次为 AS 和 FS 分别高 14.6 mm 和 12.7 mm,再次为 RS 较 CK 高 6.0 cm;2014 年玉米生育期平均土壤贮水量 BS 和 AS 最高,较 CK 分别高 23.2 mm 和 17.2 mm,其次为 FS 和 RS,较 CK 分别高 15.7 mm 和 7.1 mm。

2.3 不同耕作方式对作物产量和水分利用效率的影响

不同耕作方式下玉米的产量和水分利用效率如表 3 所示,2012 年 AS 产量最高,其次为 BS,再次为 RS 和 FS,经计算分别比 CK 增产 28.65%、21.47%、13.35%和 13.23%;2013 年 BS 和 AS 产量最高,其次为 RS 和 FS,经计算分别比 CK 高 18.93%、17.22%、11.01%和 9.45%;2014 年 AS 产量最高,其次为 BS,之后依次为 RS 和 FS,经计算分别比 CK 高 17.38%、16.21%、9.91%和 5.90%。2012 年和 2013 年降水相对充足,采用深松耕作具有增加土壤贮水能力的作用,因此会降低农田的耗水量。2012 年全生育期 AS 较 CK 少耗水 22.3 mm,BS 少耗水 14.6 mm,FS 少耗水 7.6 mm,RS 少耗水 3.6 mm;2013 年全生育期 BS 耗水量最少,比 CK 少 26.9 mm;其次为 FS、AS 和 RS,分别比 CK 少 20.1、17.1 mm 和 11.7 mm。2014 年由于遭受严重旱灾,为降低玉米干旱胁迫消耗了大量的土壤贮水量,整个生育期 BS 和 FS 分别较 CK 多消耗 22.8 mm 和 9.5 mm 土壤水分,AS 和 RS 与 CK 耗水量差异不显著。通过比较不同处理的水分利用效率,2012 年 AS 最高,其次为 BS,再次为 FS 和 RS,分别较 CK 提高 0.73、0.53、0.31 kg·cm^{-3}和 0.30 kg·cm^{-3};2013 年 BS 和 AS 最高,其次为 FS 和 RS,分别较 CK 提高 0.67、0.55、0.37 kg·cm^{-3}和 0.35 kg·cm^{-3};2014 年 AS、RS、BS 和 FS 较 CK 分别提高 0.27、0.24、0.21 kg·cm^{-3}和 0.07 kg·cm^{-3}。总体上,AS 处理在 3 a 研究中,玉米持续保持着高生产能力和水分利用效率,较 CK 产量提高 17.22%~28.65%,水分利用效率提高 0.27~0.73 kg·m^{-3};2013 年与 BS 产量和水分利用效率差异不显著,而较其他两年分别提高 1.00%~5.92%,0.06~0.20 kg·m^{-3};较 FS 产量提高 5.59%~13.50%,水分利用效率除 2014 年差异不显著外,较其他两年提高 0.20~0.43 kg·m^{-3}。

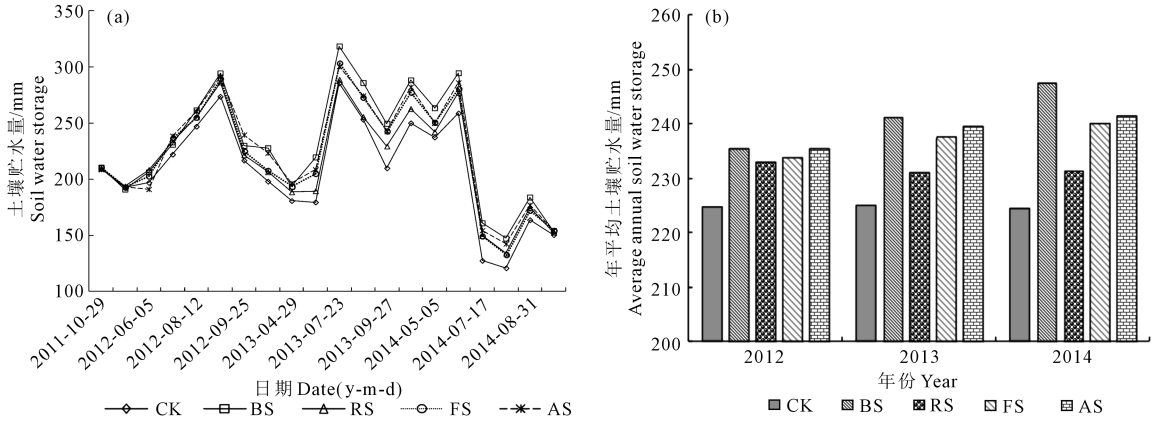


图 1 玉米生长季 0~100 cm 土壤贮水量变化

Fig.1 Change of soil water storage in 0~100 cm during maize growth season

表 3 2012-2014 年不同耕作方式下玉米产量和水分利用效率

Table 3 Corn yield and water use efficient under different treatments in 2012-2014

处理 Treatment	产量/(kg·hm^{-2}) Yield			耗水量/mm Water consumption			水分利用效率/(kg·m^{-3}) WUE		
	2012	2013	2014	2012	2013	2014	2012	2013	2014
CK	9473.6 d	10752.3 c	8172.0 e	459.4 a	433.2 a	303.2 b	2.06 d	2.48 c	2.70 c
BS	11507.3 b	12788.03 a	9497.0 b	444.8 d	406.3 c	326.0 a	2.59 b	3.15 a	2.91 b
RS	10738.4 c	11936.2 b	8981.5 c	455.8 b	421.5 b	305.8 b	2.36 c	2.83 b	2.94 ab
FS	10726.5 c	11768.0 b	8654.0 d	451.8 c	413.1 b	312.7 a	2.37 c	2.85 b	2.77 b
AS	12188.0 a	12603.9 a	9592.2 a	437.1 e	416.1 b	311.7 b	2.79 a	3.03 a	2.97 a

3　结论与讨论

土壤是作物生长的基础,由于中国农田很少休闲,年复一年进行农业生产,耕作模式在农业生产中发挥着重要作用,几千年来,精耕细作已成为中国农业的特色[15]。耕作能降低土壤容重,提高土壤保水能力,调节土壤中固体、液体、气体的三相比例,协调土壤中水、肥、气、热的关系,利于作物的根系生长,并为作物的高产奠定良好基础[16-17]。深松耕作具有耕作层深,划破犁底层等优点,可以降低土壤耕层的容重,增加通透性,改善土壤环境,加速雨水下渗,增加土壤耕层水分,促进作物增产[18-19]。李传友等[20]研究表明,通过深松可提高土壤蓄水能力,土壤累计入渗量提高 58%~264%,土壤含水量增加 3.2%~5.9%。罗洋等[21]的研究证明,虚实并存的耕层构造有利于玉米生长发育,株高和最大叶面积可提高 8.37%~14.18%,气生根条数和叶片净光合速率也明显提高。目前关于间隔深松的研究多集中在固定的耕作体系,关于间隔深松位置更替、耕作时间和后效等研究还相对较少[22-23],尚未形成完整的间隔深松理论和技术体系。

本研究通过 3 a 定位试验发现,不同耕作方式对土壤容重的影响不同,可以将不同耕作处理土壤容重特征表述为:CK 为上虚下实型,BF 为均匀疏松型,RS 为垄虚沟实型,FS 为垄实沟虚型(相对),AS 为年际疏松交替型。土壤容重与土壤贮水能力存在密切关系[24-25],AS 由于在 2011 年秋季和 2012 年初夏分别对农田垄和沟进行了间隔深松作业,2012 年作物收获后至 2013 年作物收获前并未对农田耕层进行深度耕作作业,2013 年作物收获后和 2014 年初夏又分别对垄和沟进行了间隔深松作业,因此年际间土壤容重存在更替变化。但试验证明这不会影响其年际间土壤贮水能力,总体上 AS 与 BS 一样会保持较高的土壤贮水能力,能够为不同降水年型下玉米稳产提供保障。这是因为深松具有后效作用[26-27],同时土壤水分在年际间也存在蓄留效应[28]。3 a 间 BS、AS、FS 和 RS 在不同年份土壤平均贮水量的变化范围分别是 10.9~23.2 mm、10.9~17.2 mm、9.0~15.7 mm 和 6.0~8.2 mm。

由于深松作业会增加农田的贮水量,可为作物生长创造相对较好的土壤水分条件,3 a 中深松处理均明显增加了玉米产量和水分利用效率,尤其相对于其他 3 种深松方式,AS 处理玉米持续保持着高生产能力和水分利用效率。尽管 AS 和 BS 在一定条件下具有相近的土壤蓄水能力,但有研究证明间隔深松可以在土壤中形成虚实并存的耕层结构,利于干旱季节土壤水分由下部移动到土壤耕层,并提高玉米的抗倒伏能力[2,9,29],AS 可在保留间隔深松优点的同时,实现全方位深松的蓄水效果,这为 2012 年和 2014 年 AS 玉米产量和水分利用效率较 BS 提高创造了条件。而 AS 相对于 RS 和 FS 两种间隔深松方式,采用交替的深松方式更能降低土壤容重,改善土壤耕层结构,提高土壤蓄水能力,使玉米保持更高的生产力。同时,一般全方位深松较间隔深松需要更多的能耗[30],因此 AS 在降低作业成本方面具有优势,是更加理想的深松耕作方式。尤其在半干旱地区,通过年际间在秋季和初夏进行间隔深松,能够创造出较好的耕层结构,利于蓄保秋季降水和夏季的集中降水,具有较好的应用前景。

参 考 文 献:

[1] 冯良山,孙占祥,郑家明,等.辽西风沙半干旱区旱作农田水资源研究[J].土壤通报,2008,39(1):25-28.

[2] 白伟,孙占祥,郑家明,等.虚实并存耕层提高春玉米产量和水分利用效率[J].农业工程学报,2014,21(11):81-90.

[3] Ekelöf J, Guamán V, Jensen E S, et al. Inter-row subsoiling and irrigation increase starch potato yield, phosphorus use efficiency and quality parameters[J]. Potato Research,2015,58(1):15-27.

[4] McGarry D, Bridge B J, Radford B J. Contrasting soil physical properties after zero and traditional tillage of an alluvial soil in the semi-arid subtropics[J]. Soil and Tillage Research,2000,53(2):105-115.

[5] Ahmed S M, Adeeb A. Topsoiling and subsoiling as rainwater harvesting techniques for arid climates: a case study from Sudan[J]. Planet Risk,2014,2(1):40-45

[6] Abu-Hamdeh N H. Compaction and sub-soiling effects on corn growth and soil bulk density[J]. Soil Science Society of America Journal,2003,67(4):1212-1218.

[7] Martin-Rueda L, Munoz-Guerra L M, Yunta F. Tillage and crop rotation effects on barley yield and soil nutrients on a Calciortidic Haploxeralf[J]. Soil and Tillage Research,2007,92(1-2):1-9.

[8] Tian S, Wang Y, Ning T, et al. Continued no-till and subsoiling improved soil organic carbon and soil aggregation levels[J]. Agronomy Journal,2014,106(1):212-218.

[9] 李华,逄焕成,任天志,等.深旋松耕作法对东北棕壤物力性状及春玉米生产的影响[J].中国农业科学,2013,46(3):647-656.

[10] 郑洪兵,郑金玉,罗洋,等.长期不同耕作方式下的土壤硬度变化特征[J].农业工程学报,2015,31(9):63-70.

[11] 郑洪兵,郑金玉,罗洋,等.农田不同耕层构造对玉米生长发育及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(5):41-45,95.

[12] 刘武仁,郑金玉,罗洋,等.不同耕层构造对土壤硬度和含水量的影响[J].玉米科学,2013,21(6):76-80.

[13] Feng L S, Sun Z X, Yan C R, et al. Effect of farmland surface covered porous mulch materials on soil water, heat and water use efficiency of maize[J]. Journal of Animal and Plant Sciences,2015,25(S1):22-27.

(下转第 201 页)