

砒砂岩对毛乌素沙地风沙土储水能力影响的研究

孙婴婴^{1,2,3}, 孙绪博^{1,2,3}, 曹婷婷^{1,2,3}, 张海欧^{1,2,3}

(1. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 西安 710075; 2. 陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 西安 710075; 3. 国土资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 西安 710075)

摘要:为探析砒砂岩对于风沙土储水能力的影响,在毛乌素沙地设置不同比例砒砂岩与沙复配成土试验小区(砒砂岩与沙的体积比分别为1:1, 1:2, 1:5),进行单季玉米种植,并分别于2013—2015年连续3年对0—120 cm深度内土壤水分进行动态监测。结果表明:从2013—2015年,适量砒砂岩的加入将风沙土储水量从100 mm左右提升至200 mm以上,并可逐步调节土壤水分至不亏缺状态,显著提升土壤的保水蓄水能力,有利于作物生长需求;土壤储水以40 cm以下中深层土壤储水能力改善作用最为明显,且经多年种植,0—40 cm和80—120 cm土层逐步成为土壤水分较为稳定的土层,利于作物根系对水分的吸收利用;砒砂岩与沙1:1~1:5范围内,随砒砂岩所占比例提高,复配土储水特征的改善作用有增强趋势,但趋势不显著。

关键词:砒砂岩与沙复配成土; 土壤储水; 土壤水分亏缺

中图分类号:S288;S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)06-0105-06

Study on the Influence of Soft Rock on Moisture Storage Capacity of Sandy Soil

SUN Yingying^{1,2,3}, SUN Xubo^{1,2,3}, CAO Tingting^{1,2,3}, ZHANG Haiou^{1,2,3}

(1. Shaanxi Land Construction Group Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 2. Institute of Land Engineering & Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 3. Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering the ministry of Land and Resources of China, Xi'an 710075, China)

Abstract: To analyze how the soft rock influence the moisture storage capacity of sandy soil, experimental plots with different ratios of soft rock and sandy soil were set in Mu Us sand land, with spring maize planted one season per year, and the soil moisture of the depth 0—120 cm was frequently monitored during 2013—2015. The results showed that moderate soft rock could improve the moisture storage capacity of sandy soil from 100 mm in 2013 to over 200 mm in 2015, promote the soil moisture to none deficiency state, strengthen the moisture storage capacity of soil, which was beneficial for the crop growth. Moisture storage capacity of soil layer below 40 cm was promoted most obviously, and the layers of 0—40 cm and 80—120 cm turned into more stable layers for moisture storage, which was helpful for the crops. Between the soft rock and sandy soil with ratio 1:1 to 1:5, with the addition of soft rock, the moisture storage capacity of the soil was enhanced, but not significant.

Keywords: soft rock-sand amended soil; soil moisture storage; soil moisture deficit

在我国西北部干旱—半干旱地区,由于降雨较少、灌溉受限,土壤对于水分的保蓄能力成为影响农业生产中水分利用效率的重要因素,加上土壤保水、蓄水能力同时决定了土壤保肥能力,并能影响土地的水土流失程度,因此,如何提高土壤对于水分的保蓄能力成为发展当地农业的重中之重^[1-2]。提高风沙土保蓄能力的主要技术措施目前主要包括施用保水剂^[3-4],应用生物炭等生物质改良剂^[5-7],合理耕作^[8]等等。以上技术措施都已经被证实具有不同程度改良土壤保蓄能力的作用,但由于施用成本较高、经济效益较低等多种

原因,其中真正能在土地整治工程中大规模应用的技术手段并不多。如何控制施用成本,同时提升经济效益,研发产投比更佳的风沙土保蓄功能优化技术,已经成为大规模风沙土整治工程的重要需求。

自2009年起,韩霁昌等就利用砒砂岩与沙两者性质互补的特质,将两者复配,形成新成“土壤”,不仅能通过将砒砂岩资源化利用来改良风沙土的性质,形成新的有效耕地,并且极大节约了工程成本,进行了大规模应用^[9-10]。研究成果证实,砒砂岩中的黏粒能促进风沙土的质地向砂壤、壤砂土质地转变^[11],增加

表层土壤有机质的含量^[12],有效减少硝态氮、铵态氮向耕层以下的淋溶现象^[13],促进作物生长发育,提升产量^[14]。摄晓燕等人通过室内试验证实,适量砒砂岩能有效改善风沙土的持水能力^[15],但是该结果尚未得到田间试验的证实,也未能分析出这种改善作用是否能有效消除土壤水分亏缺现象。

本文以陕西省榆阳区砒砂岩与沙复配成土试验小区的土壤水分观测为基础,引入土壤储水量和土壤水分亏缺度指标,系统研究了不同用量砒砂岩对风沙土储水特征的影响,为该区内砒砂岩与沙复配成土技术的规模化应用提供土壤水分依据。

1 研究区自然概况与研究方法

1.1 试验区概况

试验区位于陕西省榆林市榆阳区小纪汗乡大纪汗村,该地位于陕西北部的毛乌素沙漠南缘,海拔 1 206~1 215 m,属典型中温带半干旱大陆性季风气候区,全年降水时空分布不均,气候干燥,春季多风干旱,秋季温凉湿润,年均气温 8.1℃,≥10℃积温为 3 307.5℃,持续天数为 168 d。年平均无霜期 154 d,年均日照时间 2 879 h,年总辐射量 6 077.9 MJ/m²,项目区年均降水 400 mm,玉米生育期(5—9 月)平均总降雨量为 324 mm,占全年降雨的 80%以上。而 2013 年、2014 年、2015 年该地全年总降雨量分别为 567.4 mm,378.3 mm,451 mm,其中在玉米全生育期内总降雨量分别为 552.4 mm,274.2 mm,310 mm,即无论是从全年总降雨还是玉米生育期内总降雨看,本研究期内,2013 年为丰水年、2014 年、2015 年为平水年(图 1)。

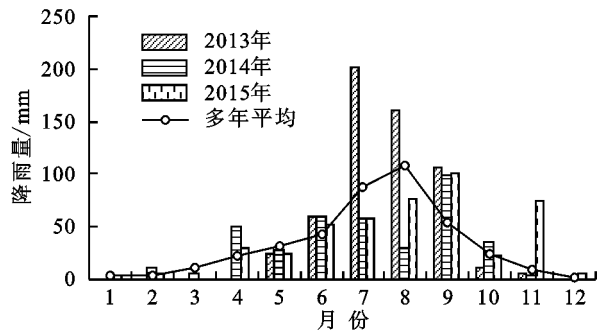


图 1 2013—2015 年榆阳区降雨量

1.2 试验设置

研究期为 2013—2015 连续 3 a 春玉米生育期,试验田为 2012 年开始种植,分别设有砒砂岩:沙体积比例为 1:1,1:2,1:5 的 3 个处理,每处理重复 3 个小区。每小区面积为 5 m×12 m,在小区表层 30 cm 覆盖不同混合比例的复配土,30 cm 以下为当地原状沙土。实际种植中,因为多年机械翻耕,表层 30—40 cm 的土壤也混入部分复配土,性质接近 0—30 cm 表层土。试验种植作

物为春玉米“万瑞 5 号”,分别于 2013-04-22,2014-05-08,2015-05-08 种植,2013-09-15,2014-09-27,2015-10-08 收获,玉米株行距统一设为 50 cm×33 cm。所有小区灌溉与施肥处理完全相同:播前施基肥磷酸二铵 335 kg/hm²,复合肥(N—P₂O₅—K₂O=12%—19%—16%)375 kg/hm²,于拔节期追肥 1 次,施尿素 375 kg/hm²。灌水以喷灌方式进行,依据当地降雨与玉米生育期需水要求确定灌溉量(表 1),其中 2013 年共灌水 389.2 mm,2014 年灌水 194.4 mm,2015 年灌水 145 mm,灌溉量逐年下降。

表 1 2013—2015 年试验田灌水量

2013 年 灌溉日期	灌溉量/ mm	2014 年 灌溉日期	灌溉量/ mm	2015 年 灌溉日期	灌溉量/ mm
2013-05-21	55.6	—	—	—	—
2013-06-01	55.6	—	—	—	—
2013-06-16	55.6	—	—	2015-06-25	—
2013-07-01	55.6	2014-07-02	55.6	—	35
2013-07-15	55.6	2014-07-13	32.4	2015-07-07	—
2013-07-25	55.6	—	—	—	75
2013-08-15	55.6	2014-08-06	106.5	2015-08-13	35
总灌水量	389.2	—	194.4	—	145

1.3 测定指标与方法

每种植季玉米收获后,以环刀法分层测定不同比例复配土容重和田间持水量,在 0—40 cm 深度范围内每 10 cm 为一层,40—120 cm 范围内每 20 cm 为一层。分别于春玉米播前、拔节期、12 叶期、抽雄期、乳熟期、成熟期等不同生育时期,利用 CNC100 型水分中子仪测定田间土壤容积含水量。在 0—40 cm 深度范围内每 10 cm 为一层,40—120 cm 范围内每 20 cm 为一层。各层土壤含水量加权值即为 0—120 cm 深度内土壤体积含水量。土壤储水量计算公式为^[16-17]:

每层土壤储水量的计算公式为:

$$W_i = \theta h \tag{1}$$

$$W = \sum W_i \tag{2}$$

式中:W_i 为每层土壤储水量(mm);W 为土壤总储水量(mm);θ 为土壤体积含水率(%);h 为土层厚度,取值为 10 或 20 cm。

土壤储水亏缺度(Deficit degree of soil Water, DSW)计算公式为^[18]:

$$DSW = (F - W) / F \times 100\% \tag{3}$$

式中:F 为土壤田间持水量(mm);W 为土壤实际储水量(mm)。

土壤储水亏缺补偿度(Compensation degree of soil Water, CSW)计算公式为^[18]:

$$CSW = (W_{cm} - W_{cc}) / (F - W_{cc}) \times 100\% \tag{4}$$

式中:W_{cm} 为生育期末的土壤储水量;W_{cc} 为生育期开

始的土壤储水量; F 为田间持水量。

2 结果与分析

2.1 玉米生育期内土壤含水量动态变化

2015 年春玉米全生育期内,3 种比例的复配土试验田土壤含水量在玉米全生育期内均高于 17%,显著高于 2013 年、2014 年(图 2)。2013—2014 年、1:5 比例复配土土壤含水量基本都表现为 3 种复配

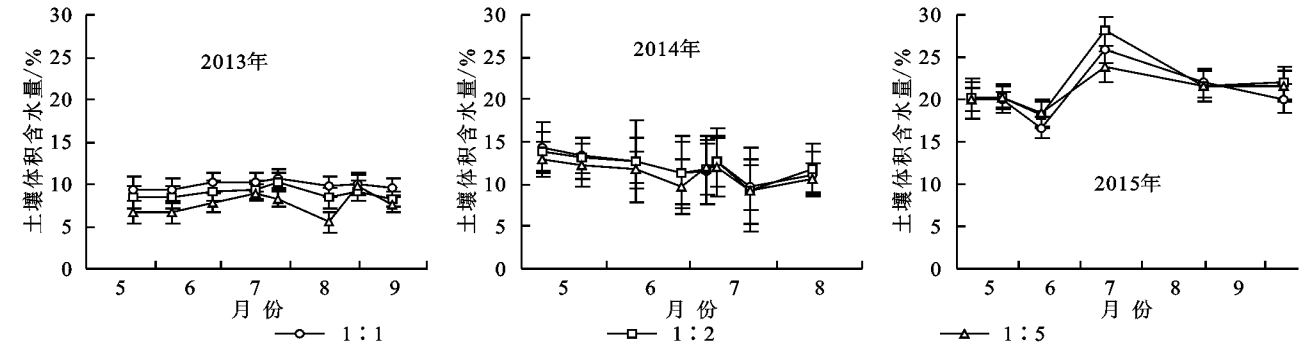


图 2 2013—2015 年 0—120 cm 深度内土壤平均体积含水量动态变化

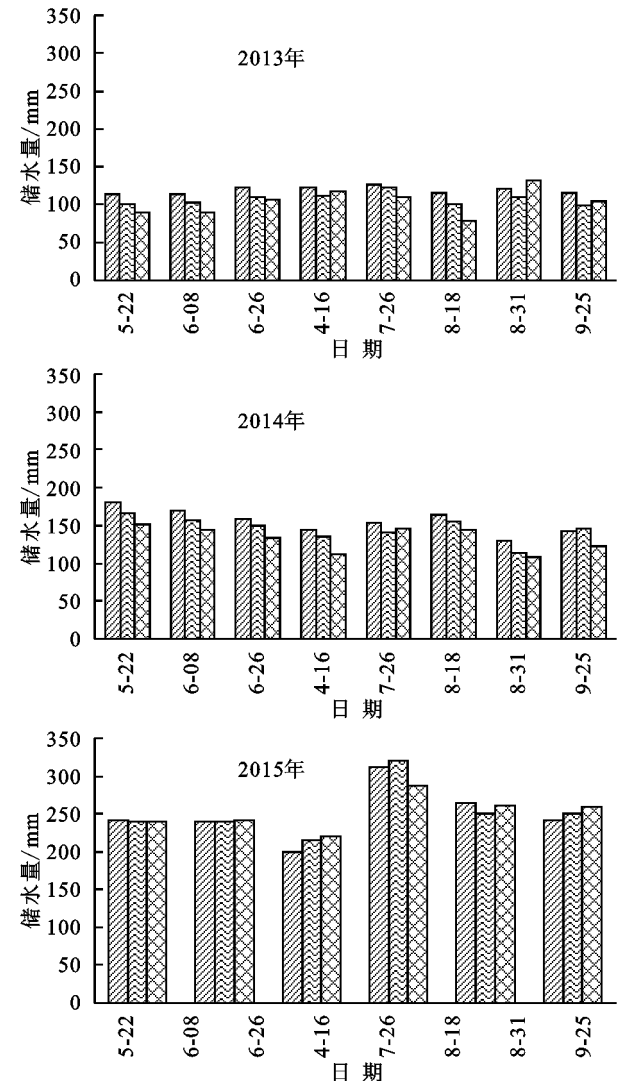


图 3 2013—2015 年玉米生育期内 0—120 cm 土层总储水量动态变化

比例中最低,且 1:1 比例复配土的土壤含水量有高于 1:2 比例的趋势。到 2015 年,尽管 3 种比例复配土土壤含水量之间的差异性减小,但在当年 7 月的测定中,1:5 比例复配土土壤含水量仍显著低于另外 2 种比例的复配土,土壤持水性相对较差。相应的,在连续 3 a 不同生育期的土壤储水量计算中,1:5 比例复配土的储水量多数时期都为 3 种比例复配土中储水量最低的(图 3)。

2.2 土壤储水量和储水比例动态变化

根据对 0—120 cm 深度内不同分层土壤储水特征的计算分析(表 2,图 4),在 2013—2014 年,不同比例复配土储水以 0—20 cm 和 20—40 cm 表层土为主,而各比例该层储水量占 0—120 cm 总储水的比例则基本表现为 $1:1 < 1:2 < 1:5$ 。随种植季数的增加,各比例复配土表层储水量增加,但所占储水比例降低。中层(40—80 cm)和深层(80—120 cm)储水量增加的同时,所占储水比例也在逐年增加。从各层储水量变异系数(CV)来看,1:5 比例复配土各层变异系数均有高于另外两比例的而趋势,且 2014—2015 年各比例不同层次变异系数基本都高于 2013 年。各比例复配土在 2013 年基本以 0—20 cm 和 100—120 cm 即最表层和最深层的变异系数最高,在不同生育期之间变化幅度最大。其中 1:5 比例复配土 0—20 cm 储水量在 2013 年变异系数为 0.458,是 40—60 cm 变异系数的 11.4 倍。但到 2014—2015 年,各比例复配土 40—60 cm,60—80 cm,80—100 cm 3 个层次的变异系数则明显高于其他层次,成为不同生育期间变动幅度最大的层次,属于较活跃层次。

到 2015 年,各比例复配土小区内各层土壤储水量较 2013 年、2014 两年均有显著提高,这可能是因为经过多年种植,砒砂岩在改良风沙土表层(0—40 cm)内土壤质地,增强其保蓄能力的同时,也降低了下层土壤中水分的蒸散作用。此外,表层土壤储水量的增加,可能会增强作物根系对表层土壤水分的吸收,从而减少对深层土壤水分的吸收利用。而其具体机制仍有待进一步的监测和分析。

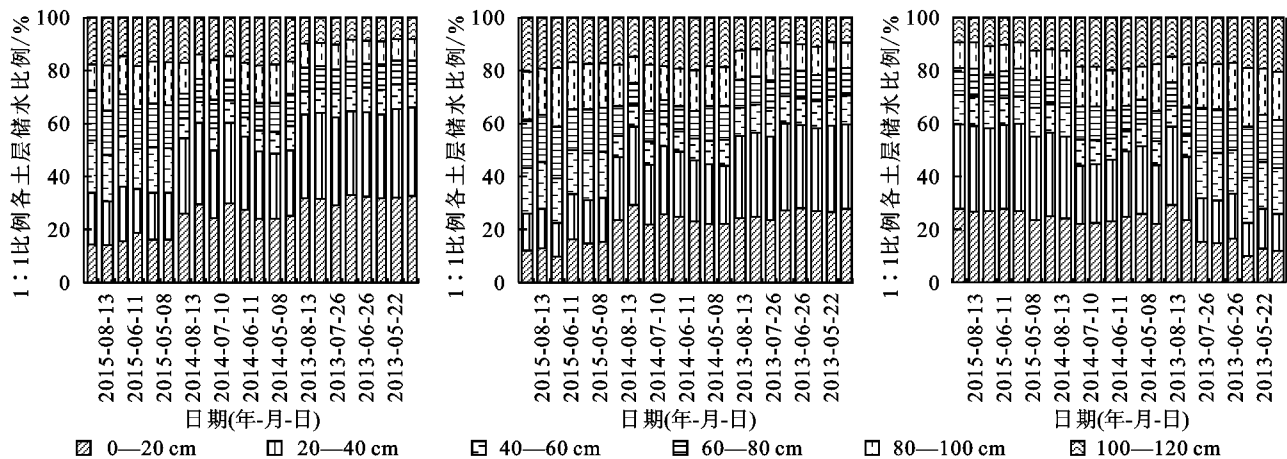


图 4 2013—2015 年玉米生育期内 0—120 cm

不同土层储水比例动态变化

2.3 土壤储水亏缺度和亏缺补偿度动态变化

从 3 种不同比例复配土在 2013—2015 年不同土层土壤储水亏缺度动态变化来看(图 5—7),各比例之间水分亏缺度并无规律性的差异,但随着种植年限的增加,各比例水分亏缺度均显著降低,土壤储水能力显著改善,直至 2015 年全部转为负值,即土壤不再处于水分亏缺状态。按照分层来看,在 2014 年,各比例 0—40 cm 和 80—120 cm 土层均已进入不亏缺状态,而 40—80 cm 土层则直至 2015 年才脱离水分亏缺状态,即该层次水分亏缺状态改善最慢。而从土壤储水亏缺补偿度结果来看(图 8),1:5 比例复配土补偿度最低,1:2 比例补偿度最高,但不同年份之间没有显著的规律性变化。

3 讨论与结论

土壤水分是黄土高原农业发展、植被建设的首要限制因子,并受大气降水和土壤质地等因素的影响^[19]。一般认为,同等气候条件下,土壤中物理性黏粒含量越低,则土壤储水越少^[20]。风沙土因其中砂粒平均含量高达 95%,黏粒含量最低不足 1%^[11],土壤颗粒缺乏良好的胶结性,保水蓄水能力极差,土壤储水量较小,严重限制了植物生长,影响农业发展和植被恢复。砒砂岩作为毛乌素地区与风沙土相间共存的一种物质,其中粉粒含量高达 58%,黏粒含量可达到 7.6%^[11]。通过与风沙土按照一定比例混合后,可有效改善风沙土的质地。而颗粒构成的改善,会进而促进土壤多方面物理、化学性质的良性化发展。

在本研究中,砒砂岩与沙在 1:1,1:2,1:53 种比例下混合后,土壤储水量都随着种植年份的增加呈增加趋势,且砒砂岩所占比例越高,则其储水能力越好、储水量越高(图 2—3)。这主要是随着砒砂岩比例增加,复配土中黏粒和粉粒含量增加,土壤的胶结性增强,土壤蓄水能力相应增强,土壤失水速率降低^[21]。同时,随着种植年份的增加,由于有机肥的施入和作物秸秆还田的共

同作用,土壤有机质含量提升,土壤保蓄能力持续改善^[12,22-23],同时这可能也是导致不同比例复配土储水能力差异性随着种植年份增加而减小的原因之一,甚至可能导致未来不同复配比例上作物产量差异性减小。

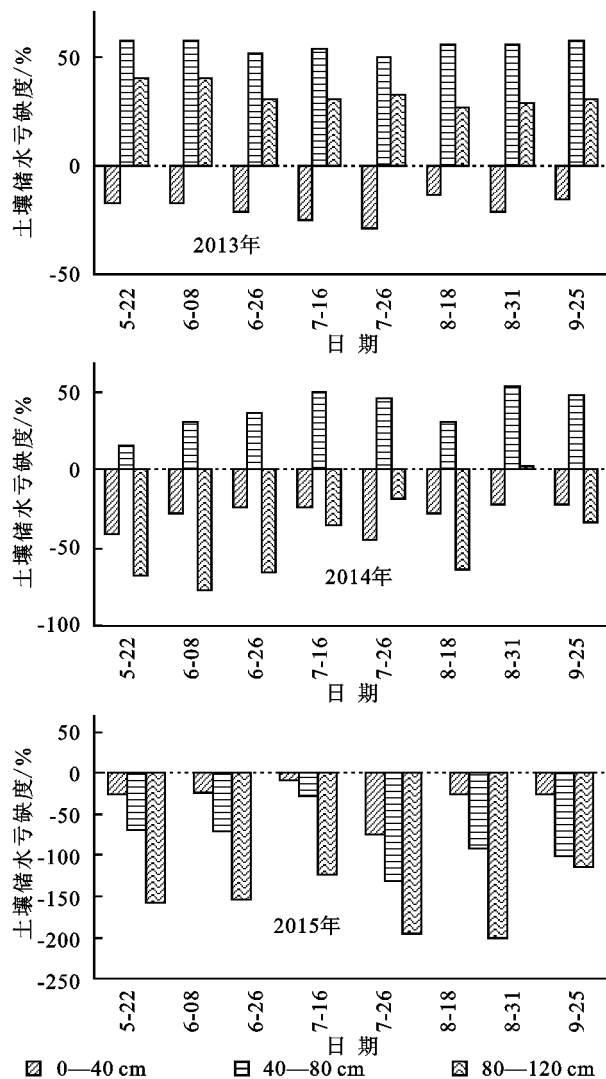


图 5 2013—2015 年玉米生育期内 1:1 比例复配土

不同土层土壤储水亏缺度动态变化

表 2 2013—2015 年玉米全生育期内不同土层储水特征

复配比例	土层深度/cm	2013 年			2014 年			2015 年		
		均值/mm	标准差/mm	变异系数	均值/mm	标准差/mm	变异系数	均值/mm	标准差/mm	变异系数
1 : 1	0—20	37.9	2.4	0.064	40.8	3.4	0.083	39.4	4.9	0.124
	20—40	38.4	1.2	0.032	42.0	2.5	0.059	45.7	10.3	0.225
	40—60	10.8	0.6	0.059	12.5	2.3	0.185	44.1	9.7	0.22
	60—80	10.8	0.7	0.066	15.6	4.0	0.254	41.3	6.6	0.160
	80—100	10.2	0.5	0.050	19.2	4.8	0.252	37.2	8.3	0.224
	100—120	10.6	1.1	0.099	25.5	4.0	0.159	41.9	3.9	0.093
1 : 2	0—20	28.1	3.4	0.120	34.8	1.2	0.035	33.6	2.6	0.078
	20—40	34.1	3.0	0.089	34.8	1.0	0.030	38.0	2.1	0.054
	40—60	11.4	0.6	0.057	12.5	2.3	0.187	43.5	5.9	0.135
	60—80	11.1	0.8	0.069	15.8	3.8	0.242	44.3	9.8	0.221
	80—100	11.1	0.8	0.075	21.1	5.0	0.237	46.4	12.3	0.266
	100—120	11.5	1.3	0.118	26.4	4.3	0.164	46.7	8.7	0.187
1 : 5	0—20	34.9	16.0	0.458	28.6	2.9	0.102	35.7	2.5	0.069
	20—40	25.1	6.4	0.256	29.2	2.7	0.092	43.1	5.6	0.130
	40—60	10.3	0.4	0.040	13.7	2.2	0.160	42.8	6.0	0.140
	60—80	10.6	0.5	0.050	15.7	3.5	0.224	42.1	5.0	0.118
	80—100	10.8	0.6	0.059	19.4	4.8	0.245	43.0	4.4	0.103
	100—120	11.7	1.7	0.142	26.3	3.8	0.146	44.7	2.3	0.051

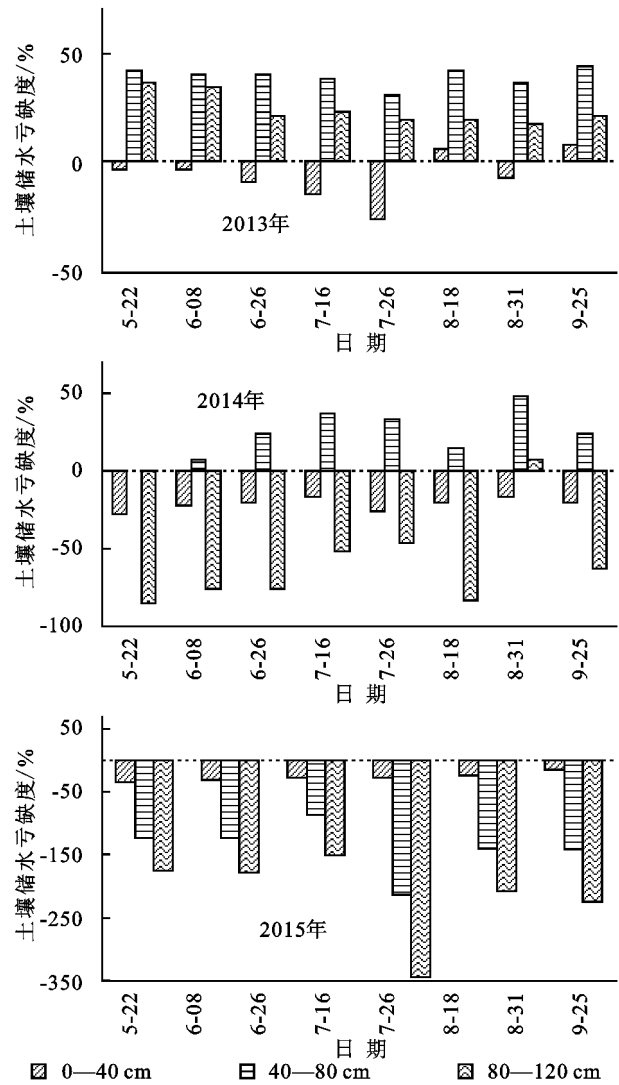


图 6 2013—2015 年玉米生育期内 1 : 2 比例复配土不同土层土壤储水亏缺度动态变化

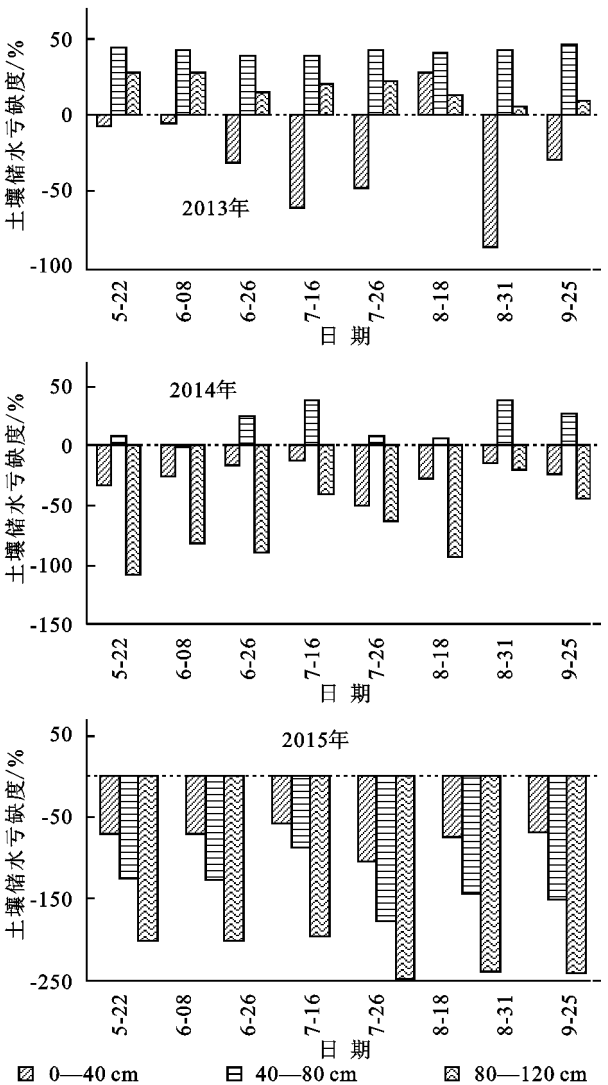


图 7 2013—2015 年玉米生育期内 1 : 5 比例复配土不同土层土壤储水亏缺度动态变化

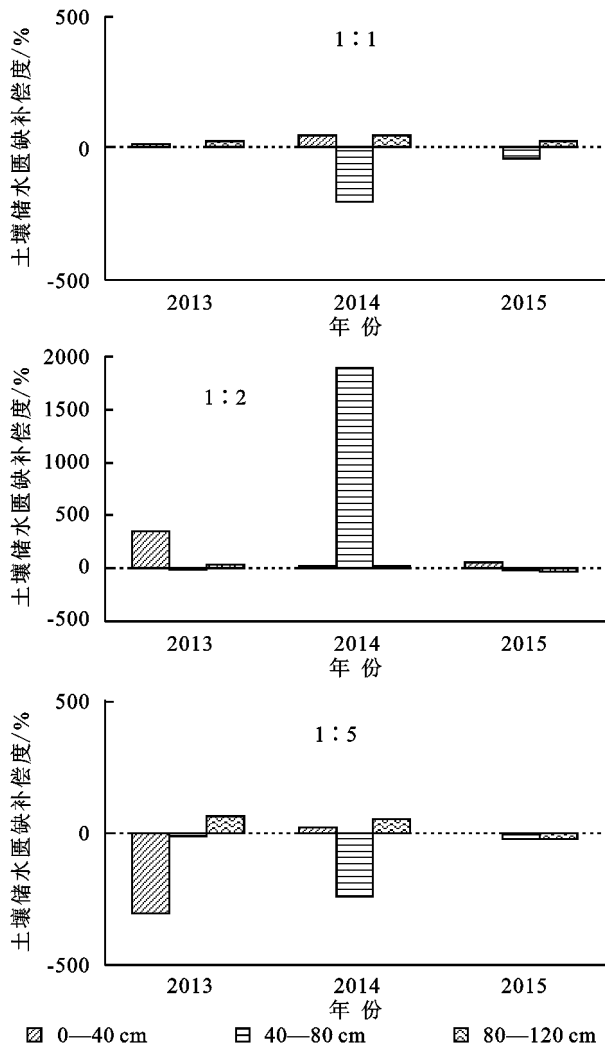


图8 2013—2015年玉米生育期内不同比例复配土
土壤储水亏缺补偿度

1:5比例复配土各土层储水变异系数有稍高于1:1,1:2两比例的趋势,其主要原因可能在于其中砒砂岩比例较低,土壤黏粒含量少,保蓄能力相对较弱,因此水分易损失^[21]。但就土壤水分亏缺度来看,3种比例的趋势基本一致,且相互之间差异性不明显(图5—7)。即随着种植季数的增加,较为合理的单季种植、有机肥撒施等耕种措施,逐步提升了复配土内有机质含量,增加了土壤储水量的同时,改善了土壤水分的亏缺情况,但不同年份之间的储水补偿度没有明显的变化趋势。1:2比例复配土的储水亏缺补偿度有显著高于其他两比例的趋势,即尽管不同复配比例之间土壤亏缺度差异不明显,但综合土壤的储水能力、作物的吸水能力等多种因素,1:2比例的补偿度具有显著优势,而其中的具体原因仍有待进一步的研究。

综上,适量砒砂岩的加入能有效改善风沙土土壤储水能力,并经多年种植后,逐步调节土壤水分至不亏缺状态,显著提升土壤的保水蓄水能力,满足作物

生长需求。在砒砂岩与沙的比例在1:1~1:5范围内,随着砒砂岩所占比例提高,其对风沙土储水特征的改善作用有增强趋势,但趋势不显著。本研究中,因榆林地区气候干旱,且风沙土性质特殊,未经改良的风沙土较难用于作物种植,因此研究中未能将风沙土作为对照处理,未来应在此方面给与进一步验证。

参考文献:

- [1] 王昱程,刘鹏,邵慧杨,等. 保水剂对风沙土水分垂直入渗和含水量的影响[J]. 水土保持通报,2013,33(5):172-175.
- [2] 王斌. 农用保水剂的制备及其在松嫩平原风沙瘠薄农田的应用研究[D]. 长春:吉林大学,2011.
- [3] Entry J A, Sojka R E, Watwood M, et al. Polyacrylamide preparations for protection of water quality threatened by agricultural runoff contaminants [J]. Environmental Pollution, 2002,120(2):191-200.
- [4] 冉艳玲,王益权,张润霞,等. 保水剂对土壤持水特性的作用机理研究[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(5):101-107.
- [5] 张北赢,徐学选,刘文兆. 黄土丘陵沟壑区不同水土保持措施条件下土壤水分状况[J]. 农业工程学报,2009,25(4):54-58.
- [6] Dugan E, Verhoef A, Robinson S, et al. Bio-char from sawdust, maize stover and charcoal: Impact on water holding capacities(WHC)of three soils from Ghana[C] // 19th World Congress of Soil Science, Symposium, 2010,4(2):9-12.
- [7] 肖茜,张洪培,沈玉芳,等. 生物炭对黄土区土壤水分入渗,蒸发及硝态氮淋溶的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(16):128-134.
- [8] 王孟雪,张有利,张玉先. 黑龙江风沙土区不同耕作措施对玉米地土壤水分及产量的影响[J]. 水土保持研究,2011,18(6):245-248.
- [9] Wang N, Xie J, Han J. A sand control and development model in sandy land based on mixed experiments of arsenic sandstone and sand: A case study in Mu Us Sandy Land in China[J]. Chinese Geographical Science, 2013,23(6):700-707.
- [10] Han J, Xie J, Zhang Y. Potential role of feldspathic sandstone as a natural water retaining agent in Mu Us Sandy land, northwest China[J]. Chinese Geographical Science, 2012,22(5):550-555.
- [11] 张露,韩霁昌,马增辉,等. 砒砂岩与沙复配“土壤”的质地性状[J]. 西北农业学报,2014,23(4):166-172.
- [12] 柴苗苗,韩霁昌,罗林涛,等. 砒砂岩与沙混合比例及作物种植季数对复配土壤性质和作物产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2013,41(10):179-184.

- [19] 陶云,樊风,段旭,等. 云南不同气候带气温变化特征[J]. 云南大学学报:自然科学版,2013,35(1):652-660.
- [20] 张万诚,郑建萌,马涛,等. 1961—2012年云南省极端气温时空演变规律研究[J]. 资源科学,2015,37(4):710-722.
- [21] 杨晓静,徐宗学,左德鹏,等. 云南省1958—2013年极端气温时空变化特征分析[J]. 长江流域资源与环境,2016,25(3):523-536.
- [22] 秦剑,解明恩,刘瑜,等. 云南气象灾害总论[M]. 北京:气象出版社,1997:1-4.
- [23] 段旭,陶云,段长春. 云南省细网格气候区划及气候代表站选取[J]. 大气科学学报,2011,34(3):336-342.
- [24] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007:63-66.
- [25] Gilbert R O. Statistical methods for environmental pollution monitoring[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1987:208-217.
- [26] Kumar P, Foufoula-Georgiou E. Wavelet analysis in geophysics: An introduction[J]. Wavelets in Geophysics, 1994,4: 1-43.
- [27] 胡丹桂,舒红. 基于协同克里金空气湿度空间插值研究[J]. 湖北农业科学,2014,53(9):2045-2049.
- [28] 孙然好,刘清丽,陈利顶. 基于地统计学方法的降水空间插值研究[J]. 水文,2010,30(1):14-17.
- [29] 许民,王雁,周兆叶,等. 长江流域逐月气温空间插值方法的探讨[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(3):327-333.
- [30] 彭彬,周艳莲,高苹,等. 气温插值中不同空间插值方法的适用性分析:以江苏省为例[J]. 地球信息科学学报,2011,13(4):539-548.
- [31] 郑建萌,张万诚,陈艳,等. 2009—2010年云南特大干旱的气候特征及成因[J]. 大气科学,2015,35(4):488-496.
- [32] 万云霞,张万诚,肖子牛. 近百年云南纵向岭谷区气温的时空变化特征[J]. 自然灾害学报,2009,18(5):183-188.
- [33] 王佳琳,潘志华,韩国琳,等. 1961—2010年中国0cm地温变化特征及其与气温变化的关系[J]. 资源科学,2016,38(9):1733-1741.
- [34] 周刊社,罗骥翮,杜军,等. 西藏高原地温对气温变化的响应[J]. 中国农业气象,2015,36(2):129-138.
- [35] 张慧智,史学正,于东升,等. 中国土壤温度的季节性变化及其区域分异研究[J]. 土壤学报,2009,46(2):227-234.
- [36] 陈月娟,张弘,周任君,等. 西太平洋副热带高压的强度和位置与亚洲地表温度之关系[J]. 大气科学,2001,25(4):515-522.
- [37] 段旭,李英,孙晓东. 昆明准静止锋结构[J]. 高原气象,2002,21(2):205-209.
- [38] 杜小玲,蓝伟. 两次滇黔准静止锋锋区结构的对比分析[J]. 高原气象,2010,29(5):1183-1195.
- [39] 卫万顺,郑桂森,栾英波. 北京平原区浅层地温场特征及其影响因素研究[J]. 中国地质,2010,37(6):1733-1739.
- [40] 庞强强,赵林,李述训. 局地因素对青藏公路沿线多年冻土区地温影响分析[J]. 冰川冻土,2011,33(2):349-356.
- [41] 周绍毅,劳炜,苏志,等. 1961—2010年广西浅层地温变化特征[J]. 西南农业学报,2012,25(4):1372-1375.
- [42] 陈超,周广胜. 1961—2010年阿拉善左旗气温和地温的变化特征分析[J]. 自然资源学报,2014,29(1):91-103.

(上接第110页)

- [13] 罗林涛,程杰,王欢元,等. 玉米种植模式下砒砂岩与沙复配土氮素淋失特征[J]. 水土保持学报,2013,27(4):58-61.
- [14] 李娟,韩霁昌,李晓明. 砒砂岩与沙复配成土对小麦光合生理和产量的影响[J]. 麦类作物学报,2014,34(2):203-209.
- [15] 摄晓燕,张兴昌,魏孝荣. 适量砒砂岩改良风沙土的吸水和保水特性[J]. 农业工程学报,2014,30(14):115-123.
- [16] 张北赢,徐学选,刘文兆. 黄土丘陵沟壑区不同水保措施条件下土壤水分状况[J]. 农业工程学报,2009,25(4):54-58.
- [17] 孟秦倩,王健. 延安丘陵沟壑区果园土壤储水量动态研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(11):161-164.
- [18] 王进鑫,黄宝龙,罗伟祥. 黄土高原人工林地水分亏缺的补偿与恢复特征[J]. 生态学报,2004,24(11):2395-2401.
- [19] 李玉山,喻宝屏. 土壤深层储水对作物稳产、增产的作用[J]. 中国农业科学,1965,6(3):40-43.
- [20] 韩仕峰. 从土壤的储水能力分析黄土高原的植被建设[J]. 中国水土保持,1992,12(16):45-49.
- [21] 张磊,齐瑞鹏,张应龙,等. 砒砂岩风化物对土壤水分特征曲线及蒸发的影响[J]. 土壤学报,2015,52(1):77-86.
- [22] 金风霞,麻冬梅,刘昊焱,等. 不同种植年限苜蓿地土壤环境效应的研究[J]. 干旱地区农业研究,2014,32(2):73-77.
- [23] Ai C, Liang G, Sun J, et al. Reduced dependence of rhizosphere microbiome on plant-derived carbon in 32-year long-term inorganic and organic fertilized soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015,80(80):70-78.