

砒砂岩改良风沙土对作物产量影响的 RZWQM2 模型模拟

孙增慧^{1,2} 韩霁昌^{1,3} 毛忠安^{1,3} 王欢元^{1,3} 胡雅^{1,3}

(1. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 西安 710075; 2. 陕西省土地整治重点实验室, 西安 710064;
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: 基于 2012—2013 年陕西省榆林市榆阳区小纪汗乡玉米大田试验结果, 利用不同复配比例的砒砂岩改良风沙土(砒砂岩与风沙土按体积比 1:1(T1)、1:2(T2)、1:5(T3)混合)处理下土壤水分、地上部生物量、叶面积指数和产量数据对 RZWQM2(Root zone water quality model 2)模型进行校正和验证, 然后利用验证后的模型模拟不同复配比的土壤水分动态和玉米产量变化。模型校正和验证结果表明, 土壤分层含水量模拟值和实测值之间的均方根误差(RMSE)分别在 0.011 ~ 0.042 cm³/cm³和 0.008 ~ 0.029 cm³/cm³ 范围内变化; 地上生物量模拟值和实测值之间的 RMSE 分别在 512 ~ 1 245 kg/hm²和 598 ~ 1 461 kg/hm²之间变化; 作物产量的模拟值与观测值之间的 RMSE 变化范围分别为 84 ~ 249 kg/hm²和 71 ~ 485 kg/hm²。模型模拟结果表明, RZWQM2 模型能够较好地模拟砒砂岩改良风沙土对作物产量的影响, 3 种砒砂岩改良风沙土配比中, 砒砂岩与风沙土的体积比为 1:2 处理(T2)下玉米产量最高, 1990—2013 年的平均产量为 3 527 kg/hm², 变化范围为 880 ~ 7 206 kg/hm²。因此, 砒砂岩与风沙土的体积比为 1:2 复配模式下对玉米增产的效果较优, 该复配模式可作为该地区砒砂岩改良风沙土复配比例的推荐选择。

关键词: 砒砂岩; 风沙土改良; 产量; RZWQM2 模型

中图分类号: S154.4; S156 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)07-0235-09

Simulation of Effects of Pisha Sandstone on Improving Corn Yield in Sandy Soil with RZWQM2 Model

SUN Zenghui^{1,2} HAN Jichang^{1,3} MAO Zhongan^{1,3} WANG Huanyuan^{1,3} HU Ya^{1,3}

(1. Shaanxi Province Land Engineering Construction Group, Xi'an 710075, China
2. Shaanxi Key Laboratory of Land Consolidation, Xi'an 710064, China

3. Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Land and Resources, Xi'an 710075, China)

Abstract: Serious desertification caused by human activity and climate change, in addition to water loss and soil erosion related to Pisha sandstone in the Mu Us sandy land, lead to severe scarcity of soil and water resources, which causes worse local agricultural conditions accordingly. Many physical properties of Pisha sandstone is complementary with that of sand, Pisha sandstone is therefore supposed to be blended to enhance water productivity and arability of sandy land. The root zone water quality model 2 (RZWQM2) was calibrated and validated based on 2-year experimental data for composite soils prepared at three ratios of Pisha sandstone to sand (1:1, 1:2 and 1:5), and then used to estimate potential yield (Yp) and rainfed potential yield (Yp(r)), along with yield gap (YG(r)) of corn (*Zea mays* L.) by using the weather data from 1990 to 2013 in Mu Us sandy land. The mean simulated Yp(r) of corn in the compound soil at a ratio of 1:2 (Pisha sandstone: sand) was significantly higher than that of the compound soil at 1:1 and 1:5 ratios, respectively. There was no difference in the simulated Yp(r) between those of the 1:1 and 1:5 ratios of Pisha sandstone to sand. The mean simulated Yp(r) of corn was 2 551 kg/hm², 3 527 kg/hm² and 2 924 kg/hm² and the YG(r) was 6 071 kg/hm², 5 096 kg/hm² and 5 698 kg/hm² at 1:1, 1:2 and 1:5 ratios, respectively. The results showed the potential of Pisha

收稿日期: 2018-01-04 修回日期: 2018-01-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504705)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102278502)和陕西省土地工程建设集团有限责任公司内部科研项目(DJNY2018-23)

作者简介: 孙增慧(1987—),男,工程师,博士,主要从事土地工程和土壤物理研究,E-mail: sunzenghui061@126.com

通信作者: 韩霁昌(1966—),男,研究员,博士,主要从事土地工程研究,E-mail: 249475181@qq.com

sandstone as amendment on improving corn yield in Mu Us sandy land. Further research into the long-term effect of Pisha sandstone on soil chemical, biological properties and soil microbial community structure is required to gain a better understanding of the mechanism of Pisha sandstone as amendment for increasing crop yield in Mu Us sandy land, China.

Key words: Pisha sandstone; aeolian sandy soil improvement; yield; RZWQM2 model

0 引言

毛乌素沙地位于鄂尔多斯高原东南部和陕北黄土高原以北,总面积 3.98 万 km²,是我国四大沙地之一^[1]。不合理的农业活动和过度放牧导致毛乌素地区草地严重退化、土地沙化及生产力低下等问题频发。砒砂岩是毛乌素沙地一种重要的伴生岩,总面积约 1.67 万 km²,其岩层结构松散,是由古生代二叠纪、中生代三叠纪、侏罗纪和白垩纪的厚层砂岩、砂页岩和泥质砂岩混合组成。砒砂岩岩层厚度小、压力低,成岩程度低、沙粒间胶结程度及结构强度差,易受侵蚀和发生水土流失,被称为“环境癌症”^[2-5]。探索和开发适用于毛乌素沙地砒砂岩和沙土地的整理模式,是该地区社会和环境发展的迫切需求。

很多学者研究表明,砒砂岩与沙复配可以形成新土壤^[6-8]。主要是在毛乌素沙地就地取材,将砒砂岩与沙这两种“危害”变为资源。风沙土通体无结构,干湿状况下均有较大的透水性,其保水性能差;砒砂岩因含有大量的蒙脱石,在遇水时迅速膨胀,有较好的持水和保水性能,可作为一种天然的保水剂^[9]。将砒砂岩与沙按不同比例混合,可得到具有保水透气的混合土壤,满足农业生产^[10]。然而,目前关于砒砂岩与沙混合成土的研究多集中在复配土的物理性状,对作物产量的影响研究较少。此外,大田作物产量研究试验周期长、难度大,系统研究长期条件下砒砂岩改良风沙土对作物产量的影响耗费人力物力,不利于研究的进一步开展,而模型模拟则提供了一种新方法。

农业系统模型整合了土壤-作物-大气连续系统中的土壤水分运移、养分循环、热量传递等复杂机理过程,是评价和扩展试验结果的重要手段^[11]。美国农业部开发的 RZWQM2 (Root zone water quality model 2) 模型,整合了作物根区所有影响作物生长的物理、化学和生物过程^[12-16]。在模拟农田水分、养分循环和作物生长发育方面具有明显的优势,已成为评价农业生产和生态环境的重要工具^[17-19]。通过对模型参数的率定,模型能够较准确预测不同土壤、气候以及施肥灌溉处理下作物产量差异及土壤含水量状况等^[20-22]。该模型在我国华北和东北

地区已经进行了一些应用尝试,如 WANG 等^[23]利用 RZWQM2 模型优化污水灌溉条件下冬小麦-夏玉米的施肥措施;文献[24-26]模拟了不同灌溉制度下作物产量及水分利用效率;丁晋利等^[21]利用 RZWQM2 模型模拟了耕作方式转变对土壤蓄水保墒的影响,SUN 等^[27]和 LI 等^[28]研究了东北地区不同土壤质地类型以及灌溉制度对作物产量的影响。已有的研究多侧重于灌溉和施肥量的利用效率,应用模型评估风沙土改良模式对作物产量影响的研究还鲜有报道。因此,本文利用 2 年田间试验数据率定和验证 RZWQM2 模型,并利用率定和验证后的模型模拟多年砒砂岩改良风沙土对作物产量的影响,分析砒砂岩与沙不同配比后土壤水分的动态变化和作物产量的变化特征,探索砒砂岩改良风沙土不同对比对作物产量影响的规律,提出增产效果较优的砒砂岩改良风沙土的复配模式,以期为毛乌素沙地砒砂岩改良风沙土提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与试验设计

试验田位于陕西省榆林市榆阳区小纪汗乡(109°29'28"E,38°28'23"N,海拔 1 210 m)。该地区位于陕西北部,毛乌素沙漠南端。年均气温 8.1℃,大于等于 10℃的积温 3 307.5℃,年均无霜期 154 d,年均降水量 413.9 mm,65% 的降水集中在 7—9 月(图 1)。年均日照时间 2 879 h。属于典型中温带半干旱大陆性季风气候。试验所用的砒砂岩与风沙土均取自当地,供试土壤理化性状见表 1。

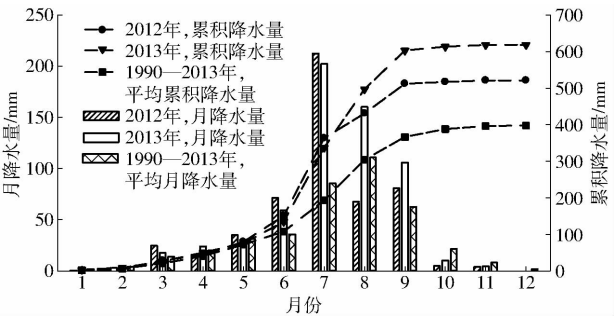


图 1 试验区每月降水量和累积降水量
Fig.1 Monthly precipitation and accumulation in 2012 and 2013 at Yulin Experimental Station
田间试验在 2012 年和 2013 年进行。将采集的

表 1 试验区风沙土和砒砂岩物理性状

Tab.1 Primary physical properties of aeolian sandy soil and Pisha sandstone in study site

材料	质地	砂粒质量 分数/%	粉粒质量 分数/%	粘粒质量 分数/%	容重/ (g·cm ⁻³)	pH 值	阳离子交换量/ (cmol·kg ⁻¹)	有机质质量比/ (g·kg ⁻¹)
风沙土	沙土	95.4	4.1	0.5	1.60	7.4	3.86	2.93
砒砂岩		34.9	58.1	7.0	1.40	8.1	45.79	1.74

砒砂岩与沙按照体积比 1:1 (T1)、1:2 (T2) 和 1:5 (T3) 充分混合,待用。在 2012 年玉米种植前,将每个试验小区 0~30 cm 的土壤全部替换为按比例充分混合的复配土壤。每个试验小区面积为 50 m² (5 m×10 m),设 3 个重复,采用完全随机区组排列。小区种植玉米品种为“先玉 335”,播种密度为 60 000 株/hm²,行距 60 cm。每年播种时间为 5 月中旬,9 月下旬进行收获。播种前施入基肥(磷酸二铵 300 kg/hm²、尿素 150 kg/hm²)。所有小区均采用当地农民传统的水肥管理措施。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 土壤含水量

土壤体积含水量采用时域反射仪 TDR (Trime-IPH,IMKO)测定,探头长度 20 cm。测定管为长 200 cm、直径 8 cm 的 PVC 管,使用配套安装工具垂直埋于测定位置。测定点位于玉米行间,所测定土层深度分别为 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 和 100~120 cm。所有小区每 7 d 测定一次土壤体积含水量,降雨后加测。

1.2.2 玉米生长与产量

试验过程中,按生育期测定玉米叶面积及地上部生物量,成熟期测定产量。叶面积采用测量尺直接量取叶长和最大叶宽,通过叶长、最大叶宽和 0.75 的乘积计算得到。叶面积指数为单位土地面积上植物叶片总面积占土地面积的倍数,即叶面积指数等于叶片总面积除以土地面积。地上部生物量测定是在各生育期每小区选取 1 m² 内的植株,将地上部取回实验室,105℃ 下杀青 1 h,之后在 75℃ 下干燥 48 h 后称干质量,测定生物量。产量测定是在玉米成熟期,每个小区取 20 m² 样方,全部收获测定其产量。最后产量换算为含水率为 14% 的标准值。

1.2.3 土壤贮水量

土壤贮水量客观地反映了土壤水分的真实值,可以系统地研究不同时段各试验处理的土壤水分情况。1.2 m 深土层贮水量计算公式为

$$W = \sum_{i=1}^n 10 W_i H_i$$

(1)

式中 W——土壤贮水量,mm
W_i——第 i 层土壤体积含水量,cm³/cm³

H_i——第 i 层土层厚度,cm
n——1.2 m 深土层含水量测定层数

1.3 RZWQM2 模型

1.3.1 模型概述

RZWQM2 模型是由美国农业部农业系统研究所开发的一个农业综合性模型。它包括的生物、物理、化学过程可以用来预测水力及化学响应并评价农业管理对作物产量及土壤水质的影响。模型由 6 个子模块组成,包括物理运移模块、化学反应模块、养分循环模块、杀虫剂反应模块、作物生长和管理操作模块,各模块间相互影响。模型中的物理模块用 Green-Ampt 方程描述土壤水分入渗过程;V-G 模型描述土壤水分特征曲线;Richards 方程描述分层土壤间水分再分布情况。选择 DSSAT 4.0 模型中的 CERES-Maize 模型来模拟玉米生长情况。模型同时以 2 个时间尺度进行模拟:①以日为时间步长,计算养分、有机肥以及灌溉和耕作方式对农业生产系统的影响,同时计算土壤蒸发和作物蒸腾以及潜在蒸散。②以小时为时间步长,模拟土壤水分运移过程,主要包括土壤水分的再分布、化学物质入渗、传输和径流以及杀虫剂的淋失、热量传输和植物氮素吸收。

1.3.2 模型输入参数

RZWQM2 模型需要输入农田管理、气象数据、作物相关参数及土壤数据。农田管理包括播种与收获日期、密度、水肥管理等。1990—2013 年的逐日气象数据从榆林气象站获取,包括最高气温、最低气温、风速、相对湿度、日照时数和降水数据。作物参数首先采用模型中与实验区玉米最相近的作物品种参数缺省值,其他参数采用模型默认值。土壤质地、饱和导水率、水分特征曲线为实测数据。

1.4 模型的校正与验证

模型校正过程中首先对模型的土壤水分模块进行校正,然后校正作物参数模块。利用 2012 年的试验数据进行模型参数校正,用 2013 年的试验数据进行模型参数验证。首先将实测的土壤饱和导水率、田间持水量、萎蔫点以及土壤水分特征曲线等水力学参数作为初始条件输入模型,通过比较土壤分层含水量模拟效果,采用试错法手动调整土壤剖面水力参数的取值,从而保证模型校正结果在允许的误差范围内(表 2)。

表 2 砒砂岩与沙不同比例混合后土壤性状及水力学参数
Tab.2 Primary physical properties of three compound soils in study site

砒砂岩与沙 体积比	深度/cm	砂粒质量 分数/%	粉粒质量 分数/%	粘粒质量 分数/%	容重/ (g·cm ⁻³)	饱和导水率/ (cm·d ⁻¹)	孔径分布 指数	田间持水量/ (cm ³ ·cm ⁻³)	萎蔫点/ (cm ³ ·cm ⁻³)
1:1(T1)	0~15	46.8	44.9	8.2	1.38	46.5	0.350	0.174	0.093
	15~30	69.6	18.1	12.3	1.46	73.4	0.350	0.207	0.053
	30~120	95.4	4.1	0.5	1.61	151.4	0.229	0.128	0.045
1:2(T2)	0~15	64.7	30.0	5.3	1.43	73.4	0.201	0.226	0.083
	15~30	77.0	13.5	9.5	1.52	90.0	0.304	0.228	0.087
	30~120	95.4	4.1	0.5	1.61	151.4	0.229	0.128	0.045
1:5(T3)	0~15	74.8	20.1	5.1	1.54	38.0	0.244	0.247	0.087
	15~30	81.9	12.7	5.4	1.59	49.5	0.270	0.235	0.081
	30~120	95.4	4.1	0.5	1.61	151.4	0.229	0.128	0.045

作物品种参数采用 RZWQM2 自带的 PEST 参数调试程序调试玉米参数 P1、P2、P5、G2、G3 和 PHINT(表 3),优化玉米生育期、作物产量和生物量的模拟结果。在模型验证过程中利用 3 个评价指标来评价模型的模拟结果:模拟和实测结果的均方根误差(RMSE)、决定系数(R^2)和模型有效系数(ME),当 ME 值为 1 时模型模拟效果最优。相关计算公式为

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}$$
$$R^2 =$$

$$\left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - O_{avg})(P_i - P_{avg})}{\left[\sum_{i=1}^N (O_i - O_{avg})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^N (P_i - P_{avg})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2$$

$$M_E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - O_{avg})^2}$$

式中 P_i ——第 i 个模拟值 O_i ——第 i 个观测值
 O_{avg} ——观测平均值 P_{avg} ——模拟平均值
 N ——观测值或者模拟值的个数

表 3 玉米作物品种遗传参数
Tab.3 Genetic parameters of corn

参数	取值范围	调整后数值
幼苗期生长特性 P1/d	200~350	290
光周期敏感特性 P2/h ⁻¹	0.2~1.0	0.34
灌浆期特性 P5/(℃·d)	600~900	670
玉米的单株最大穗粒数 G2/(粒·g ⁻¹)	650~900	760
潜在灌浆速率 G3/(mg·d ⁻¹)	5.0~11.0	11.0
出叶间隔特性参数 PHINT/(℃·d)	35~65	35.2

1.5 作物产量模拟

以 2012 年的试验实测数据作为初始条件,应用 1990—2013 年逐日气象数据模拟 24 a 砒砂岩改良

风沙土不同复配比例的作物生长情况和耗水规律。模拟试验中不考虑养分对玉米的胁迫,假设每年玉米播种、收获 的日期都相同,分别在 5 月上旬和 9 月下旬。通过在 RZWQM2 模型中设定雨养(无灌溉)和充分灌溉 2 种方式,分析砒砂岩改良风沙土不同复配比例处理下的玉米产量潜力规律和增产潜力。

2 结果与分析

2.1 模型率定

对 2012 年试验数据进行率定,RZWQM2 模型对 T1、T2 和 T3 处理土壤剖面分层土壤水分(0~120 cm)的模拟值与田间实测值相近,其中 RMSE 分别为 0.011~0.021 cm³/cm³、0.017~0.042 cm³/cm³和 0.014~0.032 cm³/cm³,模型有效系数 ME 分别介于 0.444~0.801、0.462~0.787 和 0.394~0.883 之间(表 4)。各处理模拟的土壤贮水量(0~120 cm)

表 4 各层土壤模拟值与实测值之间的模型有效系数和均方根误差
Tab.4 Model efficiency (ME) and root mean square error (RMSE) for soil water content in each layers in 0~120 cm soil profile predicted by RZWQM2

深度/cm	2012 年			2013 年		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3
0~20	ME	0.453	0.765	0.394	0.631	0.408
	RMSE/					
	(cm ³ ·cm ⁻³)	0.017	0.034	0.025	0.026	0.017
20~40	ME	0.801	0.543	0.814	0.804	0.712
	RMSE/					
	(cm ³ ·cm ⁻³)	0.011	0.029	0.021	0.019	0.014
40~60	ME	0.743	0.628	0.883	0.985	0.703
	RMSE/					
	(cm ³ ·cm ⁻³)	0.014	0.018	0.014	0.018	0.012
60~80	ME	0.594	0.787	0.757	0.824	0.735
	RMSE/					
	(cm ³ ·cm ⁻³)	0.013	0.017	0.016	0.018	0.011
100~120	ME	0.444	0.462	0.690	0.538	0.616
	RMSE/					
	(cm ³ ·cm ⁻³)	0.021	0.042	0.032	0.009	0.011

结果与观测值呈相似的变化趋势(图 2),T1、T2 和 T3 处理的 RMSE 分别为 4.6、4.8、7.5 mm; R^2 分别

为 0.89、0.96 和 0.90;ME 分别为 0.86、0.92 和 0.78。

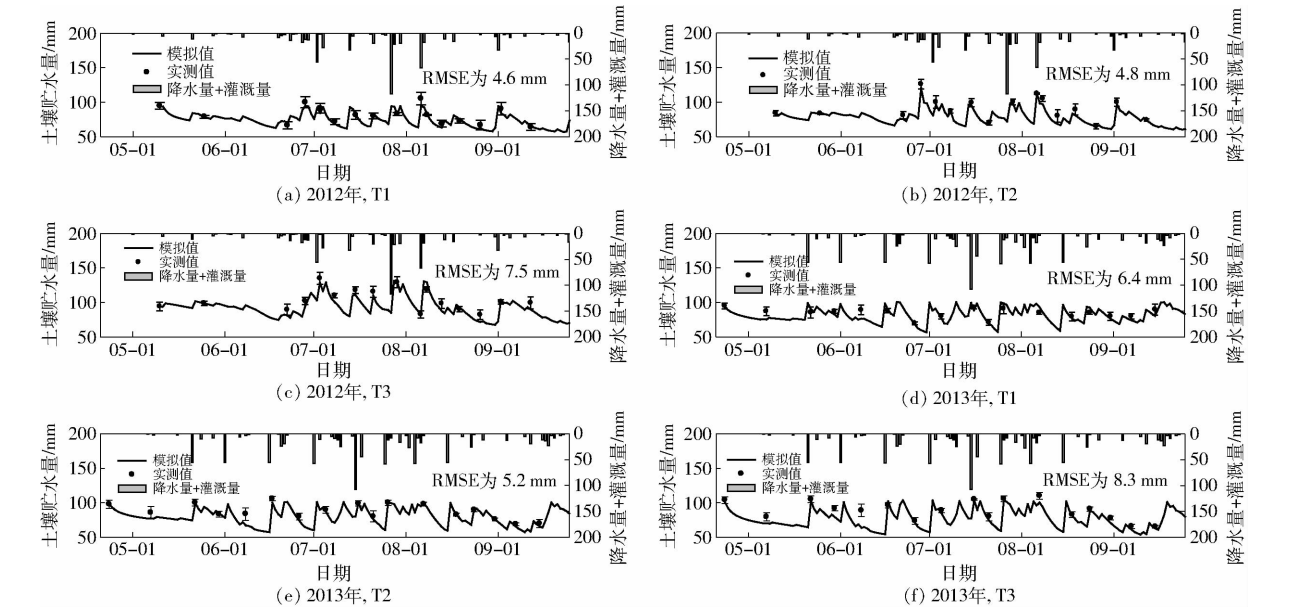


图 2 砒砂岩改良风沙土不同配比下土壤贮水量(0 ~ 120 cm)实测值与模拟值对比

Fig. 2 Comparison of measured and simulated soil water storages (0 ~ 120 cm depth) in three treatments

土壤水分模拟校正后,对作物参数进行校正,结果表明,T1、T2 和 T3 处理作物产量的模拟值与观测值相似,其 RMSE 分别为 249、98、84 kg/hm²。T1、T2 和 T3 处理叶面积指数的模拟值与实测值相近(图 3),其中 RMSE 分别为 0.15、0.14 和 0.10, R^2 分

别为 0.97、0.97 和 1, R^2 分别为 0.96、0.97 和 0.99。T1、T2 和 T3 处理作物生物量的模拟值与实测值相近(图 3),其中 RMSE 分别为 643、512、1 245 kg/hm², R^2 均为 0.99,ME 分别为 0.98、0.99 和 0.91。

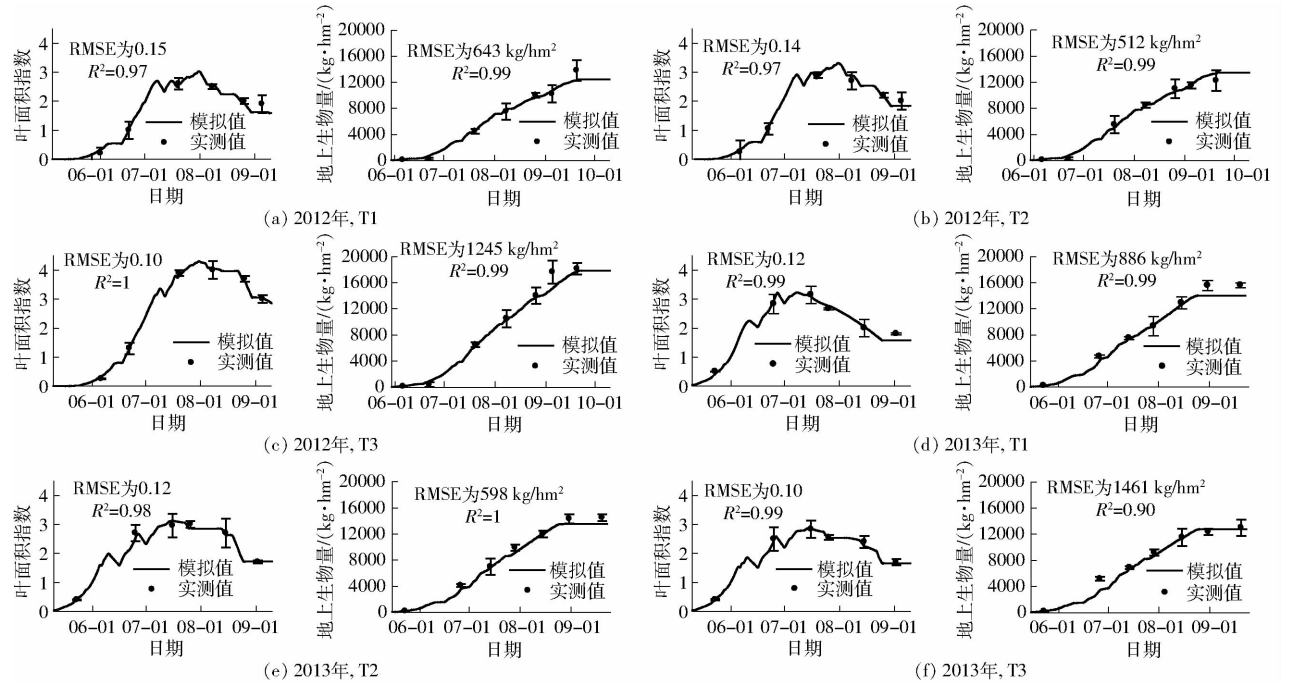


图 3 砒砂岩改良风沙土不同配比下叶面积指数、地上生物量实测值与模拟值对比

Fig. 3 Comparison of measured and simulated leaf area index and above-ground biomass in three treatments

2.2 模型验证

利用 2013 年的试验数据进行模型验证,RZWQM2 模型对 T1、T2 和 T3 处理土壤剖面不同深

度土壤水分的模拟值与田间实测值的 RMSE 分别为 0.009 ~ 0.026 cm³/cm³、0.011 ~ 0.017 cm³/cm³ 和 0.008 ~ 0.029 cm³/cm³,模型有效系数 ME 分别介

于 0.538 ~ 0.985、0.408 ~ 0.735 和 0.381 ~ 0.989 之间(表 4)。总体来看,各处理分层土壤含水量模拟效果均较好。但从不同土层比较,模拟效果最差的出现在表层 0 ~ 20 cm,房全孝等^[24]和 SUN 等^[27]在模拟土壤水分随深度的变化时,也发现由于土壤表层属性变化会造成模拟时误差较大,且土壤含水量的模拟效果随着土壤深度的增加逐步改善,这与本研究结果一致,同样的结果在丁晋利等^[21]和孙怀卫等^[29]的研究结果中出现。T1、T2 和 T3 处理土壤贮水量模拟结果与观测值的 RMSE 分别为 6.4、5.2、8.3 mm; R^2 分别为 0.54、0.88 和 0.83;ME 分别为 0.69、0.77 和 0.64。T1、T2 和 T3 处理产量验证过程中模拟值与实测值间的 RMSE 分别为 71、485、123 kg/hm²。不同处理叶面积指数模拟值与实测值的 RMSE 分别为 0.12、0.12 和 0.10; R^2 分别为 0.99、0.98 和 0.99,ME 分别为 0.98、0.98 和 0.99(图 3)。不同处理地上生物量模拟值与实测值的 RMSE 分别为 886、598、1 461 kg/hm²; R^2 分别为 0.99、1 和 0.90,ME 分别为 0.97、0.99 和 0.86。在房全孝等^[24]和 HU 等^[30]研究中,作物产量模拟结果的 RMSE 在 550 ~ 670 kg/hm²之间,生物量模拟结果的 RMSE 在 1 370 ~ 1 880 kg/hm²之间,与本研究的结果相似。表明本研究模拟砒砂岩改良风沙土处理下土壤含水量、作物生长状况和产量的模拟效果均较优。

2.3 雨养产量模拟分析

模拟结果表明,雨养条件下,T2 处理 24 a 的平均产量显著高于($P < 0.01$)T1 和 T3 处理(图 4),T1 与 T3 之间的产量差异不显著($P > 0.05$)。T1 处理 24 a 的平均产量为 2 551 kg/hm²,变化范围为 650 ~ 5 561 kg/hm²,变异系数(CV)为 52.4%;T2 处理 24 a 的平均产量为 3 527 kg/hm²,变化范围为 880 ~ 7 206 kg/hm²,变异系数为 52.0%;T3 处理 24 a 的平均产量为 2 924 kg/hm²,变化范围 747 ~ 6 517 kg/hm²,变异系数为 54.0%。试验区玉米生育期内(5—9 月)年均降水量 350.6 mm,变化范围为 215.9 ~ 552.4 mm,变异系数为 29.0%,属半干旱气候。该地区雨养条件下,作物产量主要受降水的影响,降水相对丰富的年份,作物产量相对较高^[31],这与本研究模拟的结果一致。

2.4 充分灌溉产量与产量差分析

在充分灌溉条件下,T1、T2 和 T3 处理之间模拟产量并无差异(图 4)。这表明在水分充分满足的情况下,砒砂岩改良风沙土措施中,玉米产量不受砒砂岩与沙复配比例的影响。SUN 等^[27]和 LIU 等^[32]研究也得出了在充分灌溉条件下,作物产量不受土壤质

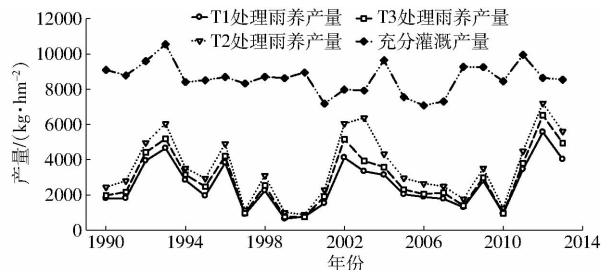


图 4 1990—2013 年砒砂岩改良风沙土不同配比下玉米模拟产量

Fig.4 Simulated potential yield of corn in three compound soils from 1990 to 2013

地类型的影响。模拟的 1990—2013 年间玉米平均产量 8 623 kg/hm²,变化范围 7 076 ~ 10 546 kg/hm²,变异系数为 9.99%,表明该地区的光温条件较适宜玉米生长。T1 处理产量差(充分灌溉产量与雨养产量差值)24 a 平均值为 6 071 kg/hm²,变化范围为 3 078 ~ 8 181 kg/hm²,变异系数为 21.9%;T2 处理产量差平均值为 5 096 kg/hm²,变化范围为 1 433 ~ 8 069 kg/hm²,变异系数为 36.1%;T3 处理产量差平均值为 5 689 kg/hm²,变化范围为 2 122 ~ 8 202 kg/hm²,变异系数为 27.7%。T1、T2 和 T3 处理的雨养产量分别只达到充分灌溉条件下产量的 30%、41% 和 34%。SUN 等^[27]在降雨较丰富的东北风沙土区模拟得到雨养产量达到充分灌溉条件下产量的 67%。本研究中 T1、T2 和 T3 处理的产量差均较大,这是由于该地区降雨较少。但相比于 T1 和 T3 处理,T2 的产量差最小,这说明 T2 处理相对于其他处理,有较好的增产效果。

3 讨论

砒砂岩改良风沙土中,砒砂岩含量不同导致土壤容重、水力学参数有所差异,从而影响农田降水入渗和土壤水分蒸发条件,致使不同砒砂岩改良风沙土处理的蓄水保墒能力不同。有研究表明,随着砒砂岩含量的增加,砒砂岩改良风沙土的质地、有机质、饱和导水率等特性均有明显的改善^[8]。随着砒砂岩比例的继续增大,改良的风沙土饱和导水率迅速降低,在砒砂岩风沙土混合比例为(1:5)~(1:2)范围时,饱和导水率降低的趋势迅速减缓。另外,随着砒砂岩含量的增加,改良土的毛管孔隙度也不断升高。毛管孔隙度的增加,增加了土壤保水和持水的能力,从而可为作物生长提供良好的水分条件^[1]。但由于砒砂岩中含有大量的钙蒙脱石,其膨胀性会在一定程度上导致土壤排水孔隙受阻,导致土壤的导水能力下降、通透性变差,从而不利于作物生长^[33]。

本文通过 RZWQM2 模拟 1990—2013 年不同砒砂岩改良风沙土处理的土壤水分状况,结果显现 T2 处理相对于 T1 和 T3 处理具有较高的相对土壤含水量(图 5,图中 VE—V7 表示苗期,V8—V20 表示拔节期,VT—R6 表示抽穗期至成熟期)。这可能是 T2 处理玉米产量优于其他 2 个处理的原因之一。薛江^[34]研究发现,添加砒砂岩可增加土壤的持水性,且添加比例越高,土壤持水性越强,但会导致土壤供水能力的下降,这与本研究模拟的相对土壤含水量结果一致。本研究中,随着砒砂岩含量的增加,土壤

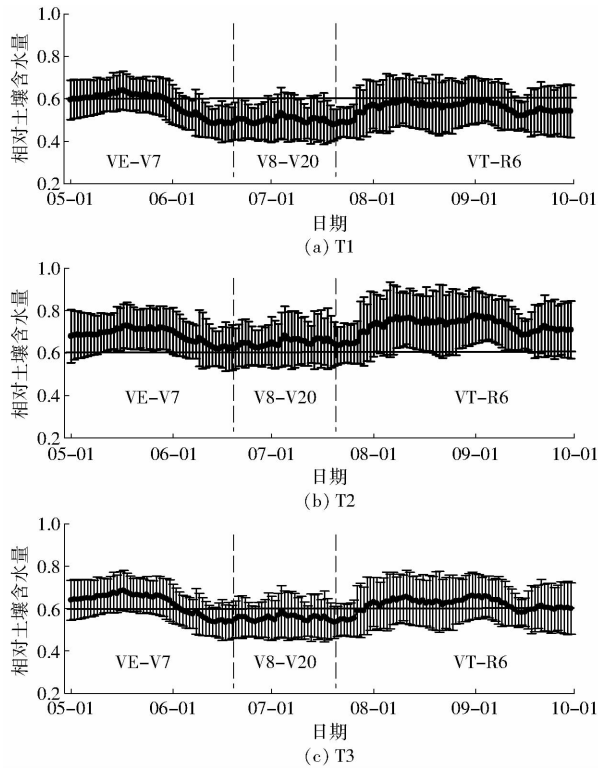


图 5 1990—2013 年砒砂岩改良风沙土不同配比下平均相对土壤含水量

Fig. 5 Simulated mean relative soil water content in root zone at different growth stages in T1, T2 and T3 treatments of 1990—2013

田间持水量增大(表 2),但砒砂岩含量持续增加,土壤的相对含水量则降低(图 5),反而制约作物的生长和降低作物产量。这与 WANG 等^[35]和马文梅^[36]的研究结果一致。

虽然本文利用 RZWQM2 模型实现了砒砂岩改良风沙土作物产量和土壤水分的多年动态变化,较好地模拟了不同砒砂岩改良风沙土措施的蓄水保墒效果,但由于未对氮素模块进行校验,对于 RZWQM2 模型的养分模块计算缺乏数据来反演参数,因此参数可能有待调整。另外,RZWQM2 模型本身未考虑砒砂岩与风沙土之间可能发生的理化反应,因此,也有待进一步修正。建议的砒砂岩与沙复配比例可以达到增产的目的,但受试验处理数量的影响,无法确定该复配模式是否达到了最优,在后续的研究中需要增加水平梯度,使结果尽可能地接近最优。另外,建议在该地区农业生产中进行适当补充灌溉,使砒砂岩改良风沙土复配增产的效果更加显著。

4 结论

(1)RZWQM2 模型能够较好地模拟砒砂岩改良风沙土措施下土壤水分长期动态变化和作物的生长状况,可作为评价砒砂岩改良风沙土的一种有效方法。在模型校验过程中,T1、T2 和 T3 处理土壤贮水量模拟结果与观测值的 RMSE 分别为 6.4、5.2、8.3 mm;产量模拟值与实测值间的 RMSE 为 71、485、123 kg/hm²。

(2)利用校验后的 RZWQM2 模型对不同砒砂岩改良风沙土措施的多年的玉米产量模拟结果表明,T2 处理 24 a 的平均产量比 T1 处理高 976 kg/hm²,比 T3 处理高 603 kg/hm²。多年模拟结果表明,T2 处理在砒砂岩改良风沙土措施中玉米增产效果较优。

参 考 文 献

1 WANG N, XIE J, HAN J, et al. A comprehensive framework on land-water resources development in Mu Us Sandy Land [J]. Land Use Policy, 2014, 40(1): 69–73.

2 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.

3 ZHEN Q, ZHENG J, HE H, et al. Effects of Pisha sandstone content on solute transport in a sandy soil [J]. Chemosphere, 2016, 144: 2214–2220.

4 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. ZHANG Lu, HAN Jichang, MA Zenghui, et al. Texture character study of feldspathic sandstone and sand compound “Soil” [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2014, 23(4): 166–172. (in Chinese)

5 MA W, ZHANG X. Effect of Pisha sandstone on water infiltration of different soils on the Chinese Loess Plateau [J]. Journal of Arid Land, 2016, 8(3): 331–340.

6 HAN J, LIU Y, ZHANG Y. Sand stabilization effect of feldspathic sandstone during the fallow period in Mu Us Sandy Land [J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(4): 428–436.

- 7 王欢元, 韩霁昌, 罗林涛, 等. 砒砂岩与沙复配成土过程中沙的调控作用 [J]. 土壤通报, 2014, 45(2): 286–290.
WANG Huanyuan, HAN Jichang, LUO Lintao, et al. Regulatory role of sand in soil formation from soft rock and sand [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(2): 286–290. (in Chinese)
- 8 张卫华, 韩霁昌, 王欢元, 等. 砒砂岩对毛乌素沙地风成沙的改良应用研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(10): 122–127.
ZHANG Weihua, HAN Jichang, WANG Huanyuan, et al. The improvement effects of soft rock on sandy soil in Mu Us sandy land [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(10): 122–127. (in Chinese)
- 9 HAN J, ZHANG Y. Land policy and land engineering [J]. Land Use Policy, 2014, 40: 64–68.
- 10 YANG F, BI C, CAO M, et al. Simulation of sediment retention effects of the double seabuckthorn plant flexible dams in the Pisha Sandstone area of China [J]. Ecological Engineering, 2014, 71: 21–31.
- 11 MA L, HOOGENBOOM G, AHUJA G, et al. Evaluation of the RZWQM – CERES – Maize hybrid model for maize production [J]. Agricultural Systems, 2006, 87(3): 274–295.
- 12 LIU Z J, HUBBARD K G, LIN X M, et al. Negative effects of climate warming on maize yield are reversed by the changing of sowing date and cultivar selection in Northeast China [J]. Global Change Biology, 2013, 19(11): 3481–3492.
- 13 FOX G A, SABBAGH G J, MALONE R W, et al. Modeling parent and metabolite fate and transport in subsurface drained fields with directly connected macropores [J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2007, 43(6): 1359–1372.
- 14 FANG Q, MA L, Yu Q, et al. Modeling nitrogen and water management effects in a wheat-maize double-cropping system [J]. Journal of Environmental Quality, 2008, 37(6): 2232–2242.
- 15 MA L, GERRIT H, SASEENDRAN S A, et al. Effects of estimating soil hydraulic properties and root growth factor on soil water balance and crop production [J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3): 572–583.
- 16 MALONE R W, NOLAN B T, MA L, et al. Effects of tillage and application rate on atrazine transport to subsurface drainage: evaluation of RZWQM using a six-year field study [J]. Agricultural Water Management, 2014, 132: 10–22.
- 17 YU Q, FLERCHINGER G N, XU S, et al. Energy balance simulation of a wheat canopy using the RZ – SHAW (RZWQM – SHAW) model [J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(5): 1507–1516.
- 18 MA L, MALONE R W, JAYNES D B, et al. Simulated effects of nitrogen management and soil microbes on soil nitrogen balance and crop production [J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(6): 1594–1603.
- 19 SASEENDRAN S A, NIELSEN D C, LYON D J, et al. Modeling responses of dryland spring triticale, proso millet and foxtail millet to initial soil water in the High Plains [J]. Field Crops Research, 2009, 113(1): 48–63.
- 20 孙美, 张晓琳, 冯绍元, 等. 基于 PEST 的 RZWQM2 模型参数优化与验证 [J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 146–153. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141123&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.023.
- SUN Mei, ZHANG Xiaolin, FENG Shaoyuan, et al. Parameter optimization and validation for RZWQM2 model using PEST method [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 146–153. (in Chinese)
- 21 丁晋利, 武继承, 杨永辉, 等. 耕作方式转变对土壤蓄水保墒影响的 RZWQM 模型模拟 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 136–145. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160419&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.019.
- DING Jinli, WU Jicheng, YANG Yonghui, et al. Simulation of effects of tillage pattern transformation on soil water conservation with RZWQM model [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 136–145. (in Chinese)
- 22 李艳, 刘海军, 黄冠华. 基于 RZWQM 模型的冬小麦-夏玉米水氮管理评价 [J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 111–120. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150617&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.017.
- LI Yan, LIU Haijun, HUANG Guanhua. Evaluation of nitrogen and water management in winter wheat-summer maize cropping system in North China Plain using RZWQM [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 111–120. (in Chinese)
- 23 WANG X, HUANG G. Evaluation on the irrigation and fertilization management practices under the application of treated sewage water in Beijing, China [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(9): 1011–1027.
- 24 房全孝, 于强, 王建林. 利用 RZWQM – CERES 模拟华北平原农田土壤水分动态及其对作物产量的影响 [J]. 作物学报, 2009, 35(6): 1122–1130.
- FANG Quanyao, YU Qiang, WANG Jianlin. Simulating soil water dynamics and its effects on crop yield using RZWQM – CERES in the North China Plain [J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(6): 1122–1130. (in Chinese)
- 25 MA L, AHUJA L R, ISLAM A, et al. Modeling yield and biomass responses of maize cultivars to climate change under full and deficit irrigation [J]. Agricultural Water Management, 2017, 180: 88–98.
- 26 FANG Q, MA L, YU Q, et al. Irrigation strategies to improve the water use efficiency of wheat-maize double cropping systems in North China Plain [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1165–1174.
- 27 SUN Z H, LI Z, LU X, et al. Modeling soil type effects to improve rainfed corn yields in Northeast China [J]. Agronomy

Journal, 2016, 108(2): 1 – 11.

28 LI Z, SUN Z. Optimized single irrigation can achieve high corn yield and water use efficiency in the corn belt of Northeast China [J]. European Journal of Agronomy, 2016, 75:12 – 24.

29 孙怀卫, 杨金忠, 王修贵, 等. 大棚控制排水对土壤水氮变化的影响 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(5):37 – 45.
SUN Huaiwei, YANG Jinzhong, WANG Xiugui, et al. Effects of controlled drainage on soil water and nitrogen changes in greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5):37 – 45. (in Chinese)

30 HU C, SASEENDRAN S A, GREEN T R, et al. Evaluating nitrogen and water management in a double-cropping system using RZWQM [J]. Vadose Zone Journal, 2006, 5(1):493 – 505.

31 摄晓燕, 张兴昌, 魏孝荣. 适量砒砂岩改良风沙土的吸水 and 保水特性 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(14):115 – 123.
SHE Xiaoyan, ZHANG Xingchang, WEI Xiaorong. Improvement of water absorbing and holding capacities of sandy soil by appropriate amount of soft rock [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(14):115 – 123. (in Chinese)

32 LIU Z, YANG X, HUBBARD K G, et al. Maize potential yields and yield gaps in the changing climate of Northeast China [J]. Global Change Biology, 2012, 18(11):3441 – 3454.

33 摄晓燕, 魏孝荣, 魏艳春, 等. 砒砂岩改良风沙土对铵态氮吸附特性影响研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 165 – 173. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151123&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.023.
SHE Xiaoyan, WEI Xiaorong, WEI Yanchun, et al. Effects of soft rock modified sandy soil on NH_4^+ -N adsorption characteristics [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 165 – 173. (in Chinese)

34 薛江. 矿区排土场土壤水分物理特性及其改良研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
XUE Jiang. Moisture physical properties of the soil under the several vegetation restoration models and its improvement in the opencast coal mine dumping [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)

35 WANG H, HAN J, TONG W, et al. Analysis of water and nitrogen use efficiency for maize (*Zea mays* L.) grown on soft rock and sand compound soil [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2016, 97(8):1 – 8.

36 马文梅. 砒砂岩风化物改良土壤水分入渗过程及黑麦草效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
MA Wenmei. Water infiltration process of Pisha sandstone weathering soil and the effects on ryegrass [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)