

耕作方式转变对土壤蓄水保墒影响的 RZWQM 模型模拟

丁晋利^{1,2} 武继承^{3,4} 杨永辉^{3,4} 何建强⁵ 冯浩¹

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2. 郑州师范学院地理与旅游学院, 郑州 450044;
3. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002;
4. 农业部作物高效用水原阳科学观测站, 原阳 453514;
5. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 基于 2011—2012 年和 2013—2014 年河南禹州冬小麦长期定位试验, 利用传统耕作、免耕和深松处理下土壤水分、地上部生物量和产量对 RZWQM(Root zone water quality model)模型进行率定和验证, 然后利用率定后的模型模拟传统耕作转变为保护性耕作方式后 0~100 cm 土层贮水量、耗水量、土壤剖面水分平衡及水分利用效率的动态变化。在模型率定和验证中, 土壤分层含水率模拟值和实测值之间的均方根误差(RMSE)分别在 0.009~0.025 cm³/cm³和 0.005~0.054 cm³/cm³范围内变化。模型模拟结果表明 RZWQM 模型能够较好地模拟耕作方式转变后土壤分层水分的动态变化, 4 种不同耕作转变模式(传统耕作分别转变为免耕、免耕+秸秆覆盖、深松、深松+秸秆覆盖)下, 传统耕作转变为免耕后产量最高, 水分利用效率最大, 达 19.3 kg/(hm²·mm)。因此, 该模拟条件下传统耕作转变为免耕的蓄水保墒效果最好。

关键词: 冬小麦; 耕作方式; RZWQM; 土壤水分; 水分利用效率

中图分类号: S154.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)04-0136-10

Simulation of Effects of Tillage Pattern Transformation on Soil Water Conservation with RZWQM Model

Ding Jinli^{1,2} Wu Jicheng^{3,4} Yang Yonghui^{3,4} He Jianqiang⁵ Feng Hao¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. College of Geography and Tourism, Zhengzhou Normal University, Zhengzhou 450044, China 3. Institute of Plant Nutrition and Resource & Environmental Science, Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China
4. Yuanyang Experimental Station of Crop Water Use, Ministry of Agriculture, Yuanyang 453514, China
5. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A two-year (2011—2012 and 2013—2014) field experiment was carried out at Yuzhou City of Henan Province, China. The experiment data were used to calibrate and validate the RZWQM (Root zone water quality model) model for its simulation of soil water distributions, above ground biomass and wheat yield under different tillage treatments (conventional tillage, no-tillage and subsoil tillage). The calibrated RZWQM model was then used to simulate the dynamics of soil water storage in the 0~100 cm soil layer, crop water consumption, water balance and water use efficiency when conventional tillage was transformed to four types of conservation tillage patterns, including no-tillage, no-tillage with straw mulching, subsoil, and subsoil with straw mulching. The root mean square errors of soil water content were 0.009~0.025 cm³/cm³ for model calibration and 0.005~0.054 cm³/cm³ for model validation, respectively. Simulation results showed that the RZWQM model was able to simulate the dynamics of soil

收稿日期: 2015-09-02 修回日期: 2015-10-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2013AA102904)和国家自然科学基金项目(U1404404)

作者简介: 丁晋利(1978—), 女, 博士生, 郑州师范学院讲师, 主要从事土壤生态与节水农业研究, E-mail: jin5689@163.com

通信作者: 冯浩(1970—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土资源高效利用研究, E-mail: nercwsi@vip.sina.com

water content when tillage method was transformed from conventional tillage to the four conservation tillage patterns. Wheat yield was the highest for transformation of conventional tillage to no-tillage, and the water use efficiency could reach 19.3 kg/(hm²·mm). Therefore, no-tillage was the best conservation tillage method for soil moisture conservation among the four conservation tillage patterns.

Key words: winter wheat; tillage patterns; RZWQM; soil water; water use efficiency

引言

河南省半干旱、半湿润易旱区耕地面积 440 万 hm², 占全省耕地面积的 64%, 水资源匮乏、季节性干旱一直是限制河南省农业发展的主要因素^[1]。传统农业连年翻耕, 土壤持水能力减弱, 腾发量加强, 不利于土壤蓄水保墒^[2]。而具有节水抗旱作用的保护性耕作是以秸秆覆盖处理和免耕播种技术为核心的新型耕作方法, 能保持水土、增加土壤水分、改善土壤质量和提高作物产量, 有利于农业生产的可持续发展^[3]。大量研究表明, 以免耕为代表的各种保护性耕作措施在增加土壤有机质, 改善土壤结构, 增加土壤持水性、抗蚀性和通透性等方面具有明显效果^[4-7]。然而, 目前关于土壤蓄水保墒能力的研究多集中于不同耕作方式之间的比较, 很少涉及耕作方式转变前后蓄水保墒效果的对比, 特别是传统耕作转变为保护性耕作后土壤蓄水保墒效果的研究较少。此外, 现有研究多采用大田试验方法, 耕作试验周期长, 难度大, 系统研究耕作方式转变的蓄水保墒效果耗费人力物力, 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。RZWQM (Root zone water quality model) 模型综合了气象、土壤、作物、管理等模块, 采用系统分析方法和计算机模拟技术, 克服了传统农业试验方法的缺陷, 能够模拟各种因素对农田水氮过程的影响^[8], ANAPALLI 等^[9]和 MALONE 等^[10]已成功利用 RZWQM 研究了不同耕作措施对土壤-作物系统的影响。另外, 该模型已在华北平原等地区进行了有效的校验和成功的应用^[11-15]。

本文利用 RZWQM 模型模拟多年传统耕作转变为保护性耕作后土壤水分、作物产量和水分利用效率的变化, 重点分析耕作方式转变后 0~100 cm 土壤贮水量、耗水量、土壤剖面水分平衡、水分利用效率及小麦生长期水分胁迫和作物产量的变化特征, 揭示保护性耕作措施对土壤蓄水保墒的调控作用, 以为河南省筛选适宜的耕作方式提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 长期定位试验

冬小麦长期定位试验在河南省中部节水农业禹州试验基地 (34.16°N, 113.15°E, 海拔高度 150 m)

进行。该地区多年平均降水量 674.9 mm, 其中 60% 以上集中在夏季, 存在较严重的春旱、伏旱和秋旱; 土壤为褐土, 土壤母质为黄土性物质, 耕层有机质 12.3 g/kg、全氮 0.80 g/kg、水解氮 47.82 mg/kg、速效磷 6.66 mg/kg、速效钾 114.8 mg/kg。

长期定位试验始于 2006 年, 选取其中 2 年 (2011—2012 年和 2013—2014 年) 小麦季试验数据用于本研究。该试验采用单因素随机区组设计, 共 3 个处理, 分别为传统耕作、免耕 (无秸秆) 和深松, 每个处理设 3 次重复。种植的冬小麦品种为“矮抗 58”, 每年的播种时间为 10 月中旬, 收获时间为次年 5 月下旬, 行距 23 cm, 基本苗 244 万株/hm², 拔节期灌水 60 mm。冬小麦播种前施用过磷酸钙 (P₂O₅ 105 kg/hm²)、钾肥 (纯钾 75 kg/hm²) 及氮肥 (纯氮 75 kg/hm²), 一次性底施。小区面积 36 m² (长、宽各 6 m)。

1.2 测定项目和方法

(1) 土壤含水率

土壤体积含水率通过水分测定仪 (DZN2-1 型, 中国电子科技集团公司第二十七研究所) 测定, 测定深度为 0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm 和 80~100 cm 土层, 每 10 d 观测一次。另外, 在冬小麦拔节期、孕穗期、扬花期和收获期用土钻取 0~100 cm 土层土样, 每 20 cm 一层, 装入铝盒中称鲜土质量, 然后, 放入干燥箱 (110℃) 干燥至质量恒定后称量, 计算土壤质量含水率。

(2) 小麦生物量及产量

小麦收获时采取植株样, 取样标准为 1 m 样段, 折合成每公顷生物量; 同时每小区沿对角线选取长势均匀的 3 点, 每点取 4 m² 植株样, 脱粒, 风干, 称量计产。

(3) 土壤贮水量

土壤贮水量^[16-17]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利用情况。1 m 深土层贮水量计算式为

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

(1)

式中 W——土壤贮水量, mm
W_i——第 i 层土壤质量含水率, %
D_i——第 i 层土壤容重, g/cm³
H_i——第 i 层土层厚度, cm

n ——1 m 深土层含水率测定层数

(4)水分利用效率(WUE)

水分利用效率^[18-19](WUE)指蒸散的每单位(mm)水分在单位面积上所生产的经济产量,其计算式为

WUE = Y/ET (2)

其中 ET = I + P + U - R - F ± ΔS (3)

式中 Y——经济产量,kg/hm²

ET——作物生长期间的耗水量,mm

I——时段内灌水量,mm

P——时段内有效降水量,mm

U——地下水通过毛管作用上移补给作物水量,mm

R——地表径流量,mm

F——深层渗漏量,mm

ΔS——收获期与播种期0~100 cm 土壤贮水量之差,mm

该试验区地下水埋深4 m 以下,可视为地下水补给量为零,U 值可忽略不计。由于径流量R 和深层渗漏量F 不易测量,通过RZWQM 模型计算得出。

(5)水分胁迫系数

当作物生长过程受到水分胁迫时,实际蒸腾速率小于潜在蒸腾速率。在稳态条件下,蒸腾的减少将引起光合作用呈正比地降低,因此,水分胁迫系数可用作物实际蒸腾速率和潜在蒸腾速率的比值来表示^[20],即

C_w = T_a/T_p (4)

式中 C_w——水分胁迫系数

T_a——实际蒸腾速率,g/(m²·h)

T_p——潜在蒸腾速率,g/(m²·h)

1.3 RZWQM 模型

(1)模型概述

RZWQM 模型由美国农业部下属的农业研究局于1992 年研发并推出RZWQM1.0 版本,之后不断地修改和完善,最新推出的版本为RZWQM2。该模型是综合性的农业模型,在模拟农业管理措施对土壤-植物系统的影响方面具有独有的优势^[21-23]。耕作是重要的农业管理措施之一,RZWQM 模型中可根据实际情况设置耕作深度、耕作时间并选择适宜的农用器具。在此基础上,模型通过耕作深度影响土壤结构、土壤水力学特性及作物残差还田量来实现对耕作措施模拟。

(2)模型输入参数

该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。农田管理包括播种收获日期、密度、水分管理、耕作方式;2011—2012 年和2013—2014 年逐日气象数据从中国气象科学数据共享服

务网(<http://cdc.nmic.cn/home.do>)获取,包括最低气温、最高气温、风速、相对湿度和日照时数;作物参数首先采用模型中与试验区冬小麦最相近的作物品种参数作为缺省值,其他参数采用模型默认值。土壤饱和和导水率(K_s)、田间持水量(FC)、永久萎蔫点(PWP)等土壤水力学参数为田间实测数据,其他土壤数据主要来自《河南土壤》。

1.4 模型的率定和验证

由于2013 年10 月—2014 年6 月小麦生育期土壤含水率、地上部生物量和作物产量数据全面,因此选用这一季的土壤含水率、地上部生物量和产量用于模型的率定。首先将实测的土壤饱和和导水率(K_s)、田间持水量(FC)、永久萎蔫点(PWP)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,通过比较分析土壤分层含水率模拟效果,采用试错法手动调整土壤剖面水力参数的取值,从而保证模型率定结果在允许误差范围内。作物品种参数采用RZWQM 自带的PEST 参数调试程序调试小麦参数PIV、PID、P5、PHINT、G1、G2 和G3,优化作物生长发育期、作物产量和生物量的模拟结果(表1)。

表 1 冬小麦作物品种遗传参数

Tab.1 Genetic parameters of winter wheat

参数	取值范围	调整后数值
春化敏感系数 PIV/d	0 ~ 90	48.73
光周期敏感系数 PID/(%·h ⁻¹)	0 ~ 300	123
灌浆期特性系数 P5/(℃·d)	300 ~ 800	491.3
籽粒数特性系数 G1/(粒·g ⁻¹)	10 ~ 35	22.2
标准籽粒质量 G2/mg	30 ~ 70	52.81
成熟期单株茎穗质量 G3/g	1 ~ 3	1.924
出叶间隔特性系数 PHINT/(℃·d)	70 ~ 95	89.58

在参数率定的基础上,利用2011 年10 月—2012 年6 月的实测数据用于模型的验证。本研究不涉及氮素的校验。

1.5 耕作方式转变方案

以2011 年传统耕作试验实测数据为初始条件,应用2006—2011 年逐日气象数据模拟连续5 年传统耕作方式下土壤水分动态变化特征及作物产量,并以此作为耕作方式转变前的对照值。在此基础上,利用2011—2012 年逐日气象数据模拟传统耕作转变为保护性耕作后土壤含水率动态变化及作物产量,进而比较耕作方式转变后土壤含水率及产量的差异,分析不同耕作转变模式下土壤蓄水保墒效果。结合河南省保护性耕作措施实施情况,设置4 种耕作转变模式:传统耕作(Conventional tillage, CT)转变为免耕(No-tillage, NT);传统耕作转变为免耕+秸秆覆盖(6 000 kg/hm²)(No-tillage and straw

mulching of 6 000 kg/hm², NS);传统耕作转变为深松(Subsoil tillage, ST);传统耕作转变为深松+秸秆覆盖(6 000 kg/hm²)(Subsoil tillage and straw mulching of 6 000 kg/hm², SS)。其中,传统耕作选择的机具为旋耕机,耕作深度为 15 cm;免耕选择的机具为免耕机,耕作深度为 0 cm;深松耕作选择的机具为深松机,耕作深度为 35 cm。

1.6 模拟效果评价指标

模型输出的变量主要有:逐日的土壤剖面体积含水率、地上部分生物量和作物产量。模型模拟效

果采用均方根误差(RMSE)和相对误差(MRE)两个统计指标来评价,其中 RMSE 主要反映模拟效果的绝对无偏性和极值效应,MRE 主要反映模拟效果的相对无偏性。

2 结果与分析

2.1 模型率定

经过率定,利用 RZWQM 模型对传统耕作、免耕和深松土壤剖面分层土壤水分(0~100 cm)的模拟结果与田间实测值相近(图 1),其 RMSE 分别为

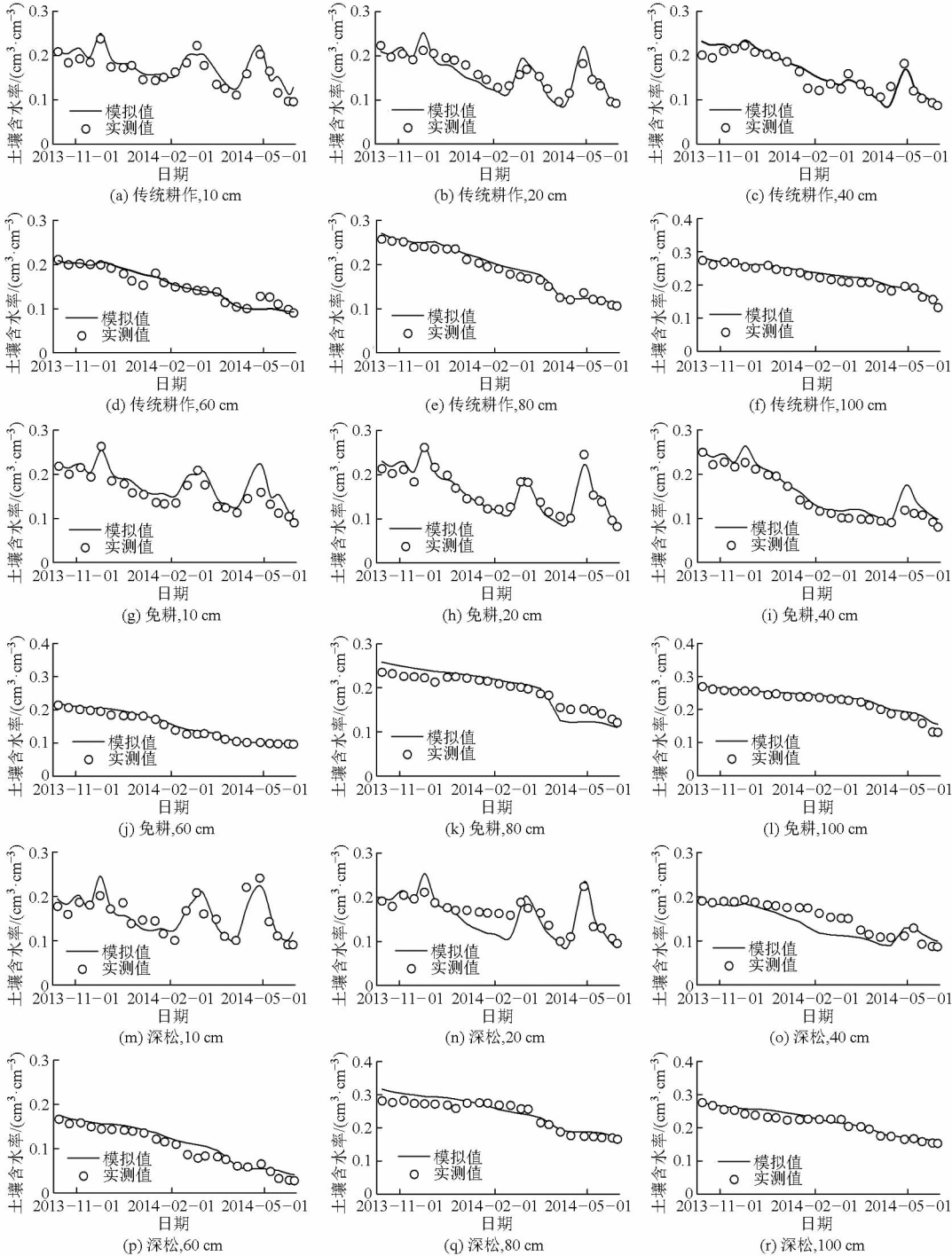


图 1 传统、免耕和深松分层土壤含水率实测值与模拟值对比

Fig. 1 Comparisons of simulated and observed soil water contents under conventional tillage, no-tillage and subsoil tillage

0.010 ~ 0.019 cm³/cm³、0.009 ~ 0.023 cm³/cm³ 和 0.011 ~ 0.025 cm³/cm³,模型的相对误差 MRE 分别介于 4.1% ~ 11.2%、4.3% ~ 13.4% 和 4.4% ~ 14.3% 之间。但是深松较免耕和传统耕作模拟效果较差,尤其在 20 cm 和 40 cm 土层,其 RMSE 分别为 0.025 cm³/cm³和 0.024 cm³/cm³,MRE 分别为 12.4% 和 14.3% (图 1n、1o),这可能是由于试验地区 20 ~ 40 cm 存在犁底层影响了土壤水分运移。另外,传统耕作、免耕和深松的模拟结果均显示,表层土壤(10 ~

40 cm)受降水或灌溉的影响明显,土壤含水率波动较大,而深层(60 ~ 100 cm)土壤含水率变化平缓。

传统耕作、免耕和深松处理地上部生物量和产量的模拟值和实测值相近(表 2),其中,不同耕作处理地上部生物量的 RMSE 分别为 1 524.4、864.0、1 189.0 kg/hm²,模型的相对误差 MRE 分别为 9.7%、7.8%、10.7%;产量的 RMSE 分别为 382.2、28.6、426.8 kg/hm²,MRE 分别为 6.6%、0.5%、7.1%。深松的地上部分生物量和产量率定效果较差。

表 2 地上部生物量和产量率定的 RMSE 和 MRE

处理	地上部生物量				产量			
	模拟值 /(kg·hm ⁻²)	实测值 /(kg·hm ⁻²)	RMSE /(kg·hm ⁻²)	MRE /%	模拟值 /(kg·hm ⁻²)	实测值 /(kg·hm ⁻²)	RMSE /(kg·hm ⁻²)	MRE /%
传统耕作	10 301	11 372	1 524.4	9.7	6 166	5 784	382.2	6.6
免耕	10 112	10 976	864.0	7.8	6 076	6 048	28.6	0.5
深松	9 827	11 016	1 189.0	10.7	5 524	5 950	426.8	7.1

2.2 模型验证

模型验证中,传统耕作、免耕和深松耕作方式下不同深度土壤含水率模拟值与实测值间的 RMSE 分别为 0.018 ~ 0.053 cm³/cm³、0.005 ~ 0.031 cm³/cm³、0.014 ~ 0.054 cm³/cm³,相对误差 MRE 分别为 9.3% ~ 33.4%、2.1% ~ 15.5% 和 4.7% ~ 19.6%。

其中,免耕土壤分层含水率整体模拟效果最好,但从免耕不同土层比较,模拟效果最差的出现在免耕的表层 0 ~ 10 cm(图 2a),测量值出现了几个偏差较大的点,可能是由于土壤的时空变异造成的。房全孝等^[24]和孙怀卫等^[25]在模拟土壤水分随深度的变化时,也发现由于土壤的表层属性变化会

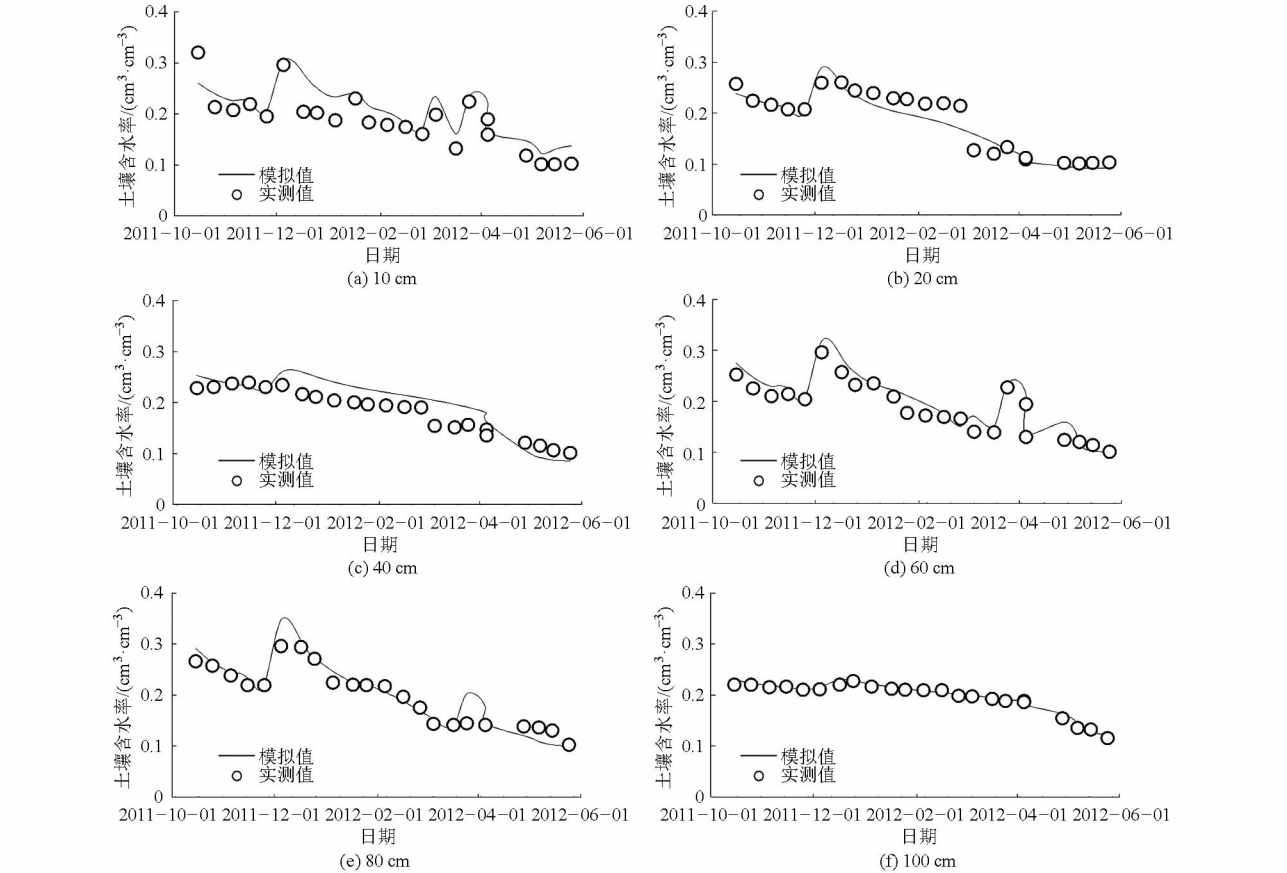


图 2 免耕分层土壤含水率实测值与模拟值对比

Fig.2 Comparisons of simulated and observed soil water contents under no-tillage

造成模拟时误差较大,且土壤含水率的模拟效果随着土壤深度的增加可逐步改善,这与本研究结果一致。

传统耕作、免耕和深松地上部生物量验证过程中模拟值与实测值间的 RMSE 分别为 645.2、1 512、1 864 kg/hm² (表 3)。另外,深松的产量模拟效果较

差,其 RMSE 为 224.8 kg/hm²。总体来看,传统耕作、免耕和深松的验证效果稍逊率定结果。此外,模拟产量与实测产量具有较好的相关关系(图 3),回归方程线性斜率为 0.902 2 ($P < 0.001$), R^2 为 0.815 7,这也表明耕作处理下作物产量模拟值和实测值较一致。

表 3 不同处理观测值与模拟值统计对比

处理	0 ~ 10 cm 土壤含水率/(cm ³ ·cm ⁻³)			生物量/(kg·hm ⁻²)			产量/(kg·hm ⁻²)		
	实测值	模拟值	RMSE	实测值	模拟值	RMSE	实测值	模拟值	RMSE
传统耕作	0.183	0.189	0.031	12 268	12 913	645.2	7 242.6	7 333.3	183.7
免耕	0.186	0.208	0.031	14 407	12 895	1 512	7 531.4	7 405.7	144.5
深松	0.190	0.164	0.052	12 886	11 022	1 864	7 083.3	6 867.3	224.8

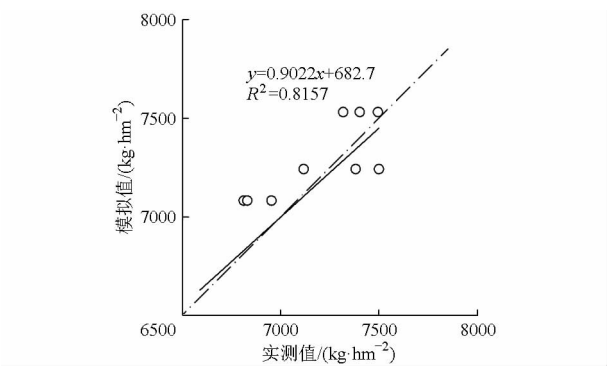


图 3 传统耕作、免耕和深松处理产量模拟值和实测值对比

Fig. 3 Comparison of simulated and observed wheat yield under conventional tillage, no-tillage and subsoil tillage

2.3 耕作方式转变对冬小麦生产的影响

2.3.1 小麦生长期内 0 ~ 100 cm 土层含水率变化

模拟结果显示免耕 NT、免耕 + 秸秆覆盖 NS、深松 ST 和深松 + 秸秆覆盖 SS 在小麦生育期内 0 ~ 100 cm 土壤贮水量总体均呈减小趋势,至灌浆期时降到最低点(图 4)。NT、NS、ST 和 SS 这 4 种耕作方式不同生育期 0 ~ 100 cm 平均土壤贮水量依次为 195.6、191.8、230.3、210.0 mm,与 CT(保持传统耕作不变,即对照)相比,NT 和 ST 处理下 0 ~ 100 cm 土壤水分相差不大,而 NS 和 SS 处理土壤贮水量分别增加 16.2% 和 6.0% (图 4b)。其中,在小麦苗期(2011 年 10 月下旬),与 CT 相比,NT、NS 和 SS 处理下 0 ~ 100 cm 土壤贮水量均有所增加,NS 和 SS 分别提高 17.8% 和 10.3%;在分蘖期(11 月上旬),NT 和 ST 的贮水量较传统耕作略有下降,而 NS 和 SS 贮水量则分别提高 15.9% 和 9.8%;在拔节期(2012-03-24)、孕穗期(2012-04-29)、扬花期(2012-05-06)和收获期(2012-05-30),NS 和 SS 土壤贮水量均比传统耕作贮水量高,其中扬花期贮水量由大到小为 SS、NS、ST、CT、NT,在灌浆期

(2012-05-16) SS 的贮水量较传统耕作提高 21.7%,达到最大值。模拟结果表明 NS 和 SS 具有较强的蓄水保墒效果。

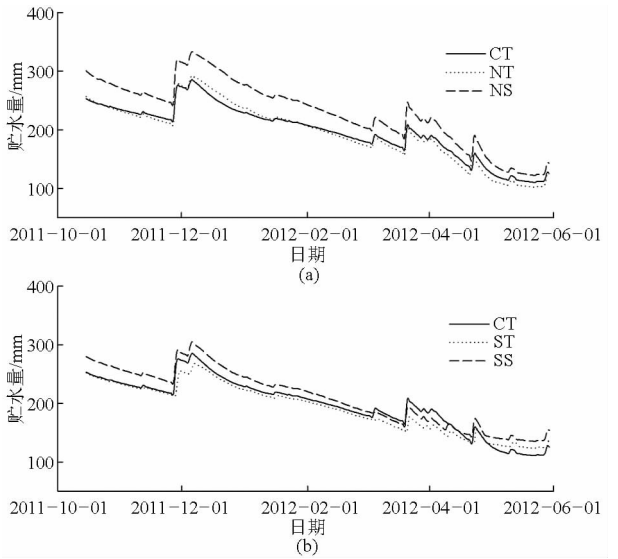


图 4 转变耕作方式后 0 ~ 100 cm 土壤贮水量的变化

Fig. 4 Soil water storage after changing tillage at depths of 0 ~ 100 cm

CT、NT、NS、ST 和 SS 处理下冬小麦耗水量由大到小为 NS、NT、CT、SS、ST(表 4)。NT 和 NS 比 CT 耗水量增加了 6.5% 和 7.1%, NS 耗水量最大,ST 的耗水量最小,这与王小彬等^[26]得出的深松耗水量较大的结论不一致,这可能是由于模型低估了深松的贮水量并高估了深松的渗漏量所致(表 5)。

CT、NT、NS、ST 和 SS 处理下模拟产量分别为 7 012.6、7 689.8、7 567.9、6 527.3、6 479.6 kg/hm²,由大到小为 NT、NS、CT、ST、SS(表 4)。其中,NT 和 NS 处理的产量较 CT 提高了 6.9% 和 5.9%。相比 CT,NT 处理地上生物量和籽粒产量水分利用效率最高,分别为 32.9、19.3 kg/(hm²·mm),NS 地上部生物量水分利用效率和籽粒产量水分利用效率略高

表 4 耕作方式转变对冬小麦耗水量和水分利用效率的影响

Tab.4 Effects of changing tillage patterns on water consumption and water use efficiency of winter wheat

处理	播种期贮水量/mm	降水量/mm	灌水量/mm	收获期贮水量/mm	耗水量/mm	地上部生物量/(kg·hm ⁻²)	籽粒产量/(kg·hm ⁻²)	WUE/(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	
								生物量	籽粒产量
CT	255.7	242.5	60	126.6	373.1	11 613	7 012.6	31.1	18.7
NT	268.2	242.5	60	127.8	397.4	13 091	7 689.8	32.9	19.3
NS	272.2	242.5	60	127.8	399.8	13 022	7 567.9	32.5	18.9
ST	252.0	242.5	60	139.3	347.5	10 810	6 527.3	31.1	18.7
SS	253.5	242.5	60	139.4	348.7	11 174	6 479.6	32.0	18.5

表 5 耕作方式转变后剖面水分平衡

Tab.5 Water balance of soil profiles in fields before and after changing tillage patterns

处理	降水量	灌溉量	蒸发量	蒸腾量	渗漏量	径流量
CT	242.5	60	98.7	271.1	60.3	4.2
NT	242.5	60	120.7	279.1	45.3	1.5
NS	242.5	60	115.2	286.4	47.1	1.5
ST	242.5	60	98.7	227.6	68.7	40.3
SS	242.5	60	95.8	231.4	58.9	40.3

于 CT,SS 处理下籽粒水分利用效率低于 CT,主要是因为其模拟产量偏低。

2.3.2 土壤剖面水分平衡分析

不同耕作处理土壤剖面水分平衡模拟结果见表 5。农田水分的主要补给来源是降水和灌溉,消耗项主要是土面蒸发和作物蒸腾。处理(CT、NT、NS、ST 和 SS)小麦季平均蒸发蒸腾量分别为 369.8、399.8、401.6、326.3、327.2 mm,由大到小为 NS、NT、CT、SS、ST。其中,NS、SS 分别与 NT、ST 相比,土壤蒸发量较小而作物蒸腾量较大,这也说明秸秆覆盖具有减小蒸发量的作用。

水分损失途径主要有地表径流和深层渗漏。CT、NT、NS、ST、SS 处理下,农田年平均地表径流量分别为 4.2、1.5、1.5、40.3、40.3 mm(表 5),ST 和 SS 径流量较其他处理大。这可能是 RZWQM 模型缺少表面储水计算功能,未考虑积水缓慢入渗造成的^[27]。另外,NT 和 NS 的径流量相同,ST 和 SS 处理径流量也无差异,说明 RZWQM 在模拟径流量时,未考虑秸秆覆盖对径流的减弱作用。各耕作处理中水分渗漏量最大的处理为 ST,这可能是由于 RZWQM 考虑了深松耕作产生大孔隙的原因造成的。NT 的渗漏量最小,具有明显的保墒作用。综合来看,CT、NT、NS、ST、SS 处理年度水分损失总量(地表径流量 + 渗漏量)分别为 64.5、46.8、48.5、109.0、99.2 mm,由小到大为 NT、NS、CT、SS、ST。

当剖面有效贮水量下降至较低水平时,作物会受到水分胁迫。图 5 为不同耕作处理下小麦受到的水分胁迫系数,0 表示无水分胁迫,数值越大说明受到的水分胁迫越大。从图 5 可以看出,小麦在苗期

到孕穗期之间无水分胁迫,孕穗期之后,不同处理均受到水分胁迫,在扬花期 ST 和 SS 处理受到的水分胁迫最大,这可能是由于水分损失引起的,这也是 ST 和 SS 处理小麦模拟产量偏低的主要原因。

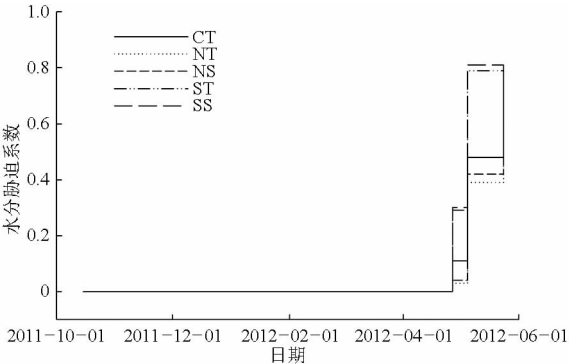


图 5 不同处理小麦水分胁迫系数对比

Fig.5 Comparison of water stress coefficient in winter wheat growth season under different tillage patterns

3 讨论

不同耕作方式对土壤扰动程度不同导致土壤容重有所差异^[5,28-30],从而影响农田降水入渗和土壤水分蒸发条件,致使不同耕作方式的蓄水保墒能力不同。其中,免耕^[7,31-33]能够保留地表残茬覆盖减少地面径流,提高土壤导水率,增加降水入渗,减少翻耕时土壤水分散失,因而有效保持水分,具有良好的蓄水保墒作用;而深松则可打破犁底层,加深耕层而不翻动土层,创造虚实并存的耕层结构,提高土壤蓄水抗旱能力^[34-35]。张丽华等^[36]研究发现轮作田生育期内免耕和深松处理 0~200 cm 土层平均土壤贮水量分别较翻耕提高 6.7% 和 1.9%;各施肥条件下作物产量、WUE 和纯收益均以深松处理最高。毛红玲等^[17]研究也表明冬小麦生育期内免耕、深松较翻耕处理 0~200 cm 土层土壤 2 年平均贮水量分别增加了 5.5% 和 4.5%,2 年平均水分利用效率深松较翻耕和免耕分别提高了 4.9% 和 11.8%,2 年平均产量深松较翻耕和免耕分别增加了 4.3% 和 7.1%。这与付国占等^[37]和吕美蓉等^[38]的研究结果一致。本研究模拟结果则不尽相同,模拟结果表明由传统耕作转变为免耕和深松 0~100 cm 贮水量

无明显增加,而转变为免耕+秸秆覆盖和深松+秸秆覆盖后分别提高土壤贮水量 16.2% 和 6.0%,这与刘婷等^[39]、黄明等^[40]和 SU 等^[41]的研究结果趋于一致。但模拟结果也表明由传统耕作转变为免耕的水分利用效率最高,达 $19.3 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$,远高于侯贤清等^[42]和李友军等^[43]的研究结果,这主要是因为本研究计算耗水量时考虑了深层渗漏量和径流量,致使耗水量降低,水分利用效率增大。另外,深松和深松+秸秆覆盖处理模拟产量较低,这可能是由于 RZWQM 模型缺少表面储水计算功能,过高估计了深松+秸秆覆盖的水分径流量和土壤深层渗漏量,致使小麦后期受水分胁迫较大,从而低估了深松+秸秆覆盖的产量,这与 MA 等^[27]的研究结论一致。

虽然本文利用 RZWQM 模型实现了由传统耕作转变为保护性耕作后土壤水分的动态变化,较好地模拟了免耕和免耕+秸秆覆盖的蓄水保墒效果,但是由于未对氮素进行校验,对于 RZWQM 模型的养分模块计算缺乏充分的数据来反演参数,因此参数有待进一步调整。另外,RZWQM 模型本身未考虑秸秆对径流的减弱作用,因此,也有待于进一步修正。此外,本研究主要模拟了转变保护性耕作方式后的短期蓄水保墒效果,今后着重模拟转变保护性耕作后不同年限条件下土壤水分的长期动态变化。

4 结论

(1) RZWQM 模型能够较好地模拟传统耕作和免耕土壤水分运动情况,但对深松的模拟效果略差。在率定过程中,传统耕作、免耕和深松土壤含水率模拟值与实测值间的 RMSE 分别为 $0.010 \sim 0.019 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 、 $0.009 \sim 0.023 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 、 $0.011 \sim 0.025 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,模型的相对误差 MRE 分别为 4.1% ~ 11.2%、4.3% ~ 13.4% 和 4.4% ~ 14.3%;不同耕作处理 RMSE 在验证阶段模拟结果稍逊于率定结果。

(2) 利用 RZWQM 模型对转变耕作方式后土壤含水率变化的模拟结果表明,与传统耕作相比,免耕+秸秆覆盖和深松+秸秆覆盖能够明显增加 0 ~ 100 cm 土层贮水量;免耕和免耕+秸秆覆盖耗水量比传统耕作分别提高了 6.5% 和 7.1%,产量分别提高了 6.9% 和 5.9%,水分利用效率免耕最高,达 $19.3 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$,免耕+秸秆覆盖次之。从土壤剖面水分平衡分析,免耕和免耕+秸秆覆盖年度水分损失量小于传统耕作,远低于深松和深松+秸秆覆盖,具有较强的蓄水保墒效果。因此,该模拟条件下传统耕作方式转变为免耕蓄水保墒效果最佳,免耕+秸秆覆盖次之。

参 考 文 献

- 1 武继承,张长明,王志勇,等.河南省降水资源高效利用技术研究与应[J].干旱地区农业研究,2003,21(3):152-155. WU Jicheng, ZHANG Changming, WANG Zhiyong, et al. Research and application of techniques of highly-effective utilization of precipitation resource in west Henan[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(3):152-155. (in Chinese)
- 2 HEMMAT A, ESKANDARI I. Conservation tillage practices for winter wheat-fallow farming on a clay loam soil (Calcisols) under temperate continental climate of northwestern Iran[J]. Field Crops Research, 2004, 89(1): 123-133.
- 3 RILEY H C F, BLEKEN M A, ABRAHAMSEN S, et al. Effects of alternative tillage systems on soil quality and yield of spring cereals on silty clay loam and sandy loam soils in the cool, wet climate of Central Norway[J]. Soil & Tillage Research, 2005, 80(1-2):79-93.
- 4 SINGH B, CHANASYK D S, MCGILL W B. Soil water regime under barley with long-term tillage-residue systems[J]. Soil & Tillage Research, 1998, 45(1-2):59-74.
- 5 雷金银,吴发启,王健,等.保护性耕作对土壤物理特性及玉米产量的影响[J].农业工程学报,2008,24(10):40-45. LEI Jinyin, WU Faqi, WANG Jian, et al. Effects of conservation tillage on soil physical properties and corn yield[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(10):40-45. (in Chinese)
- 6 罗珠珠,黄高宝,张国盛.保护性耕作对黄土高原旱地表土容重和水分入渗的影响[J].干旱地区农业研究,2005,23(4):7-11. LUO Zhuzhu, HUANG Gaobao, ZHANG Guosheng. Effects of conservation tillage on bulk density and water infiltration of surface soil in semi-arid area of west Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(4):7-11. (in Chinese)
- 7 张海林,陈阜,秦耀东,等.覆盖免耕夏玉米耗水特性的研究[J].农业工程学报,2002,18(2):36-40. ZHANG Hailin, CHEN Fu, QIN Yaodong, et al. Water consumption characteristics for summer corn under no-tillage with mulch[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2):36-40. (in Chinese)
- 8 CAMEIRA M R, SOUSA P L, FARAHANI H J, et al. Evaluation of the RZWQM for the simulation of water and nitrate movement in Level-Basin, fertigated maize[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1998, 69(4):331-341.
- 9 ANAPALLI S S, NIELSEN D C, MA L W, et al. Effectiveness of RZWQM for simulating alternative great plains cropping systems[J]. Agronomy Journal, 2005, 97(4):1183-1193.

- 10 MALONE R W, LOGSDON S, SHIPITALO M J, et al. Tillage effect on macroporosity and herbicide transport in percolate[J]. *Geoderma*, 2003, 116(1-2):191-215.
- 11 AHUJA L R, ROJAS K W, HANSON J D, et al. Root zone water quality model: modeling management effects on water quality and crop production[M]. Highlands Ranch, CO: Water Resources Publications, 2000.
- 12 孙美, 张晓琳, 冯绍元, 等. 基于 PEST 的 RZWQM2 模型参数优化与验证[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11):146-153. SUN Mei, ZHANG Xiaolin, FENG Shaoyuan, et al. Parameter optimization and validation for RZWQM2 model using PEST method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(11): 146-153. (in Chinese)
- 13 HU C, DELGADO J A, ZHANG X, et al. Assessment of groundwater use by wheat (*Triticum aestivum* L.) in the Luancheng Xian region and potential implications for water conservation in the northwestern North China Plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 60(2): 80-88.
- 14 FANG Q X, 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.
- 15 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]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 111-120. 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]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(6): 111-120. (in Chinese)
- 16 HE J, KUHN N J, ZHANG X M, et al. Effects of 10 years of conservation tillage on soil properties and productivity in the farming-pastoral ecotone of Inner Mongolia, China[J]. *Soil Use and Management*, 2009, 25(2): 201-209.
- 17 毛红玲, 李军, 贾志宽, 等. 旱作麦田保护性耕作蓄水保墒和增产增收效应[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8):44-51. MAO Hongling, LI Jun, JIA Zhikuan, et al. Soil water conservation effect, yield and income increments of conservation tillage measures on dryland wheat field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(8): 44-51. (in Chinese)
- 18 晋小军, 黄高宝. 陇中半干旱地区不同耕作措施对土壤水分及利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5):108-112. JIN Xiaojun, HUANG Gaobao. Effects of different tillage methods on soil water and water use efficiency in semi-arid area of Gansu[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(5): 108-112. (in Chinese)
- 19 江晓东, 李增嘉, 侯连涛, 等. 少免耕对灌溉农田冬小麦/夏玉米作物水、肥利用的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7):20-24. JIANG Xiaodong, LI Zengjia, HOU Liantao, et al. Impacts of minimum tillage and no-tillage systems on soil $\text{NO}_3\text{-N}$ content and water use efficiency of winter wheat/summer corn cultivation [J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(7): 20-24. (in Chinese)
- 20 刘海涛, 胡克林, 李保国, 等. 土壤剖面性质差异对农田水氮过程和作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(7): 1348-1360. LIU Haitao, HU Kelin, LI Baoguo, et al. Effects of soil profile basic properties on water and nitrogen movement and crop yield [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(7):1348-1360. (in Chinese)
- 21 LI Y, WHITE R, CHEN D, et al. A spatially referenced water and nitrogen management model (WNMM) for (irrigated) intensive cropping systems in the North China Plain[J]. *Ecological Modeling*, 2007, 203(3): 395-423.
- 22 BASSO B, CAMMARANO D, TROCCOLI A, et al. Long-term wheat response to nitrogen in a rainfed Mediterranean environment: field data and simulation analysis[J]. *European Journal of Agronomy*, 2010, 33(2): 132-138.
- 23 CONSTANTIN J, BEAUDOIN N, LAUNAY M, et al. Long-term nitrogen dynamics in various catch crop scenarios: test and simulations with STICS model in a temperate climate[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 147: 36-46.
- 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 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)
- 26 王小彬, 蔡典雄, 金轲, 等. 旱坡地麦田夏闲期耕作措施对土壤水分有效性的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(9):1044-1049. WANG Xiaobin, CAI Dianxiong, JIN Ke, et al. Water availability for winter wheat affected by summer fallow tillage practices in sloping dryland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(9):1044-1049. (in Chinese)
- 27 MA L, MALONE R W, HEILMAN P. RZWQM simulated effects of crop rotation, tillage, and controlled drainage on crop yield and nitrate-N loss in drain flow[J]. *Geoderma*, 2007, 140(3):260-271.
- 28 王昌全, 魏成明, 李廷强, 等. 不同免耕方式对作物产量和土壤理化性状的影响[J]. 四川农业大学学报, 2001, 19(2): 152-154, 187. WANG Changquan, WEI Chengming, LI Tingqiang, et al. Effect of different zero tillage on the crop yield and soil property[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2001, 19(2):152-154, 187. (in Chinese)
- 29 张大伟, 刘建, 王波, 等. 连续两年秸秆还田与不同耕作方式对直播稻田土壤理化性质的影响[J]. 江西农业学报, 2009,

21(8):53 – 56.

ZHANG Dawei, LIU Jian, WANG Bo, et al. Effects of straw-returning and different tillage modes on physical and chemical properties of direct seeding paddy soil[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2009, 21(8):53 – 56. (in Chinese)

30 程科, 李军, 毛红玲. 不同轮耕模式对黄土高原旱作麦田土壤物理性状的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(18):3800 – 3808.

CHENG Ke, LI Jun, MAO Hongling. Effects of different tillage methods on soil water and crop yield of winter wheat-spring maize rotation region in Weibei highland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(18):3800 – 3808. (in Chinese)

31 郭晓霞, 刘景辉, 张星杰, 等. 不同耕作方式对土壤水热变化的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2010(5):11 – 15, 70.

GUO Xiaoxia, LIU Jinghui, ZHANG Xingjie, et al. Effect of different tillage methods on soil water content and temperature change[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010(5):11 – 15, 70. (in Chinese)

32 彭文英. 免耕措施对土壤水分及利用效率的影响[J]. *土壤通报*, 2007, 38(2):379 – 383.

PENG Wenying. Effect of no-tillage on soil water regime and water use efficiency[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(2):379 – 383. (in Chinese)

33 余海英, 彭文英, 马秀, 等. 免耕对北方旱作玉米土壤水分及物理性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(1):99 – 104.

YU Haiying, PENG Wenying, MA Xiu, et al. Effects of no-tillage on soil water content and physical properties of spring corn fields in semiarid region of northern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1):99 – 104. (in Chinese)

34 黄高宝, 郭清毅, 张仁陟, 等. 保护性耕作条件下旱地农田麦-豆双处理轮作体系的水分动态及产量效应[J]. *生态学报*, 2006, 26(4):1176 – 1185.

HUANG Gaobao, GUO Qingyi, ZHANG Renzhi, et al. Effects of conservation tillage on soil moisture and crop yield in a phased rotation system with spring wheat and field pea in dryland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4):1176 – 1185. (in Chinese)

35 吕巨智, 程伟东, 钟昌松, 等. 不同耕作方式对土壤物理性状及玉米产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(30):38 – 43.

Lǚ Juzhi, CHENG Weidong, ZHONG Changsong, et al. Effects of different cultivation methods on the soil physical properties and yield of maize[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(30):38 – 43. (in Chinese)

36 张丽华, 李军, 贾志宽, 等. 渭北旱塬保护性耕作对冬小麦-春玉米轮作田蓄水保墒效果和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(7):1750 – 1758.

ZHANG Lihua, LI Jun, JIA Zhikuan, et al. Effects of conservation tillage on soil water conservation and crop yield of winter wheat spring maize rotation field in Weibei highland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(7):1750 – 1758. (in Chinese)

37 付国占, 李潮海, 王俊忠, 等. 残茬覆盖与耕作方式对土壤性状及夏玉米水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(1):52 – 56.

FU Guozhan, LI Chaohai, WANG Junzhong, et al. Effects of stubble mulch and tillage managements on soil physical properties and water use efficiency of summer maize[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(1):52 – 56. (in Chinese)

38 吕美蓉, 李增嘉, 张涛, 等. 少免耕与秸秆还田对极端土壤水分及冬小麦产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1):41 – 46.

Lǚ Meirong, LI Zengjia, ZHANG Tao, et al. Effects of minimum or no-tillage system and straw returning on extreme soil moisture and yield of winter wheat[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1):41 – 46. (in Chinese)

39 刘婷, 贾志宽, 张睿, 等. 秸秆覆盖对旱地土壤水分及冬小麦水分利用效率的影响[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2010, 38(7):68 – 76.

LIU Ting, JIA Zhikuan, ZHANG Rui, et al. Effect of straw mulching on soil moisture and water use efficiency of winter wheat in dry land[J]. *Journal of Northwest Agriculture and Forest University: Natural Science Edition*, 2010, 38(7):68 – 76. (in Chinese)

40 黄明, 吴金芝, 李友军, 等. 不同耕作方式对旱作区冬小麦生产和产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(1):50 – 54.

HUANG Ming, WU Jinzhi, LI Youjun, et al. Effects of different tillage management on production and yield of winter wheat in dryland[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(1):50 – 54. (in Chinese)

41 SU Z Y, ZHANG J S, WU W L, et al. Effects of conservation tillage practices on winter wheat water-use efficiency and crop yield on the Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 87(3):307 – 314.

42 侯贤清, 李荣, 韩清芳, 等. 夏闲期不同耕作模式对土壤蓄水保墒效果及作物水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(3):94 – 100.

HOU Xianqing, LI Rong, HAN Qingfang, et al. Effects of different tillage patterns during summer fallow on soil water conservation and crop water use efficiency[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(3):94 – 100. (in Chinese)

43 李友军, 吴金芝, 黄明, 等. 不同耕作方式对小麦旗叶光合特性和水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(12):44 – 48.

LI Youjun, WU Jinzhi, HUANG Ming, et al. Effects of different tillage systems on photosynthesis characteristics of flag leaf and water use efficiency in winter wheat[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(12):44 – 48. (in Chinese)