doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.017

# 基于 RZWQM 模型的冬小麦-夏玉米水氮管理评价\*

## 李 艳1 刘海军2 黄冠华1

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院,北京100083; 2. 北京师范大学水科学研究院,北京100875)

摘要:利用 2010 和 2011 年在中国科学院通州农田水循环与现代节水灌溉试验基地获取的冬小麦 – 夏玉米轮作条件下不同水肥管理时的试验数据,对 RZWQM(Root zone water quality model)模型中的土壤水分、氮素和作物模块进行率定和验证,模型验证结果表明各土层土壤含水率的均方根误差(*R*<sub>MSE</sub>)和相对误差(*M*<sub>RE</sub>)分别在 0.015 ~ 0.026 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>和 – 6.66% ~ 5.83% 之间变化,土壤贮水量模拟值与实测值一致;冬小麦和夏玉米产量、吸氮量的模拟值与实测值的相对误差(*R*<sub>E</sub>)小于 25%。该结果表明率定和验证后的 RZWQM 模型能够用来模拟华北地区冬小麦 – 夏玉米轮作条件下土壤水、氮及作物动态变化。利用率定和验证后的模型分析对比了常规施氮条件下,不同喷灌灌水频率和传统灌溉方式对作物产量和氮素渗漏的影响。结果表明在灌溉总水量相同的条件下,当 20 cm 蒸发皿累积蒸发量为 30 ~ 70 mm 时开始灌溉,其作物产量高且氮素渗漏量和损失量小。综合考虑作物产量和环境效应,推荐较优的喷灌灌溉频率为累积蒸发量为 30 ~ 70 mm 时开始灌溉。

关键词: 冬小麦-夏玉米 作物产量 NO<sub>3</sub>-N 渗漏 灌水频率 施氮 根系带水质量模型 中图分类号: S154.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)06-0111-10

## Evaluation of Nitrogen and Water Management in Winter Wheat – Summer Maize Cropping System in North China Plain Using RZWQM

Li Yan<sup>1</sup> Liu Haijun<sup>2</sup> Huang Guanhua<sup>1</sup>

(1. College of Water Resources & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract**: The long-time excessive application of N fertilizer caused detrimental effects on soil and groundwater environment in North China Plain (NCP). Therefore, the reasonable water and N managements are essential for the sustainable agricultural production in this region. A two-year field experiment (2010—2011) was carried out in the wheat – maize rotation cropping field at Tongzhou Experimental Base for Water-saving Irrigation Research (TEB), Chinese Academy of Sciences, Tongzhou District, Beijing, China. The collected data in the experiment was used to calibrate and validate the hydrologic, nitrogen and crop growth components of the root zone water quality model (RZWQM). And the validated RZWQM was used to evaluate N fertilizer and water management practices in wheat – maize rotation cropping system under sprinkler irrigation system in NCP. The validation results showed that the  $R_{\rm MSE}$  (root mean square errors) and  $M_{\rm RE}$  (mean relative error) for soil water content ranged from 0.015 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> to 0.026 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> and from – 6.66% to 5.83%, respectively. The simulated soil water storage was close to the measured ones. The relative errors ( $R_{\rm E}$ ) of measured and predicted crops yields and N uptakes of winter wheat and maize were generally less than 25%. The RZWQM was used to simulate the dynamics of soil water and nitrogen in the wheat – maize rotation cropping system under Mater and maize were generally less than 25%.

收稿日期: 2014-08-04 修回日期: 2014-09-26

<sup>\*</sup>国家自然科学基金资助项目(51179005、51479004)

作者简介:李艳,博士生,主要从事农业水肥高效利用机理和技术研究,E-mail: liyan7986@126.com

通讯作者:黄冠华,教授,博士生导师,主要从事灌排理论与技术和水盐动态模拟研究,E-mail: ghuang@ cau. edu. en

management (330 kg/hm<sup>2</sup>). Results showed that the crop yields were higher, however, NO<sub>3</sub>-N leaching and mean N losses were less at irrigation interval with accumulated pan evaporation of 30 ~ 70 mm than those at irrigation interval with pan evaporation of 90 ~ 110 mm. Therefore, sprinkler irrigation interval with pan evaporation of 30 ~ 70 mm was recommended in wheat – maize rotation system in NCP.

Key words: Winter wheat – summer maize Crop yields NO<sub>3</sub>-N leaching Irrigation frequencies N application RZWQM

## 引言

化肥尤其是氮肥对于提高作物产量有着重要作 用。我国氮肥用量从 1980 年的 9.3×10<sup>6</sup> t 增加到 2012 年的 2.40×10<sup>7</sup> t,同时粮食总产量从 3.206× 10<sup>8</sup> t 增加到了 5.896×10<sup>8</sup> t<sup>[1]</sup>。冬小麦-夏玉米轮 作是华北地区主要的种植模式,该地区氮肥的过多 施用已经是很普遍的现象<sup>[2-3]</sup>。研究表明过多的施 氮量并不能进一步提高作物产量,过多的氮素会残 留在土壤中,也会通过气态形式损失到大气中,或者 通过径流或深层渗漏进入地表水和地下水,对土壤、 大气、水体产生不良影响<sup>[4-8]</sup>。华北地区一些地方 的地下水已经被农田渗漏损失的氮素所污染<sup>[9-10]</sup>。

水肥的合理管理对于提高作物产量和减小环 境污染有着重要意义。许多学者在华北地区研究 了氮肥水平对作物生长和环境的影响,得出当施 氮量高于  $400 \text{ kg/(hm}^2 \cdot a)$  时, 土壤 剖面氮素 累积 量和渗漏量将显著增加,而作物产量并未进一步 增加:夏玉米季由于降雨较大常有氮素淋洗出根 区,冬小麦季传统的大水漫灌也会产生氮素淋洗 损失[11-15]。这些关于氮肥的研究中灌溉几乎都 是基于传统灌溉方式(一次灌水量多,灌水频率 低)实施的。然而关于优化喷灌条件下不同水、氮 管理对土壤氮素分布和渗漏的研究还不充分。另 外利用田间试验研究大量水肥组合得出不同地区 较为合理的水肥管理制度将耗费大量时间和经 费,因此利用数学模型模拟寻找田间尺度上合理 的水肥管理是一个较好的解决措施。根系带水质 量模型(Root zone water quality model, RZWQM)已 在世界不同地区被证实具有合理模拟土壤水氮动 力学、作物生长和产量的能力。房全孝等[16]和 Wang 等<sup>[17]</sup>研究了该模型在华北地区冬小麦-夏玉 米轮作系统中的应用。目前为止,RZWQM 模型还 未很好地应用于定量分析喷灌不同灌水频率条件 下施氮量对作物产量和土壤氮素渗漏的影响。因 此,本文利用2 a 田间试验数据率定和验证 RZWOM 模型,并利用率定和验证后的模型模拟喷 灌不同灌水频率条件下不同施氮量对作物和土壤 氮素的影响,提出经济效益较优和环境危害较小 的合理水氮管理模式。

## 1 材料与方法

## 1.1 试验地概况与试验设计

试验于2009年10月—2011年9月在中国科学院地理科学与资源研究所通州农田水循环与现代节水灌溉试验基地(39°40′N,116°49′E,海拔高度约20m)进行。试验区属暖温带半湿润大陆性季风气候,多年平均气温11~12℃,多年平均日照时数2459h,多年平均降水量为620mm,主要集中在6—8月份。土壤质地主要为粉砂壤土,耕作层平均土壤干容重约为1.35g/cm<sup>3</sup>,土壤有机质质量分数为1.3%,土壤盐分平均质量比为1.0g/kg,地下水位年平均埋深在11m左右。

试验区为典型的冬小麦-夏玉米轮作种植区,调 研得到当地单季作物的施氮量约为 330 kg/hm<sup>2</sup>。为 了获取较优的施氮量,本试验的施氮量在当地基础 上设置了 4 个水平, 分别为 N1 (110 kg/hm<sup>2</sup>)、N2  $(220 \text{ kg/hm}^2)$  N3  $(330 \text{ kg/hm}^2)$  N4  $(440 \text{ kg/hm}^2)$ , 同时设置1个不施氮处理(N0)作为对照。在试验 中,所有氮素均以追肥的方式施入,所施氮素肥料为 尿素。冬小麦季节,分别在返青期、抽穗期和灌浆期 随喷灌施肥,各次施肥量占总量的比例分别为 40%、40%和20%;夏玉米季节,分别在7月末和8 月末结合降水追肥,2次追肥量占总量比例各为 50%。每个处理设置3个重复,每个重复小区面积 为8m×8m,试验采用随机排列布置。冬小麦季采 用喷灌进行灌溉,灌溉水量和灌溉时间采用刘海军 等<sup>[18]</sup>提出的方法确定,即当冠层上方 20 cm 蒸发皿 水面蒸发量累积达到 40 mm 时开始灌水,灌溉水量 为累积蒸发量与降水量差值的 0.65 倍。由于该灌 溉计划综合考虑了气象蒸发条件(包括降水),因此 计算得到的灌溉水量可以保障作物生长不受土壤水 分胁迫的影响<sup>[18]</sup>。试验期间的总灌溉水量 2010 年 和 2011 年分别为 224.8、247.1 mm, 灌水量分布如 图1所示。冬小麦品种为"科农199",播种量为 262.5 kg/hm<sup>2</sup>,小麦行距为17.7 cm。夏玉米品种为 "农大 108", 玉米播种量为 37.5 kg/hm<sup>2</sup>, 行距 60 cm,种植密度约为10 株/m<sup>2</sup>。



图 1 试验期间降雨灌溉及气象数据

Fig. 1 Precipitation, irrigation and meteorological data during experimental periods (a) 2010 年 (b) 2011 年

## 1.2 取样和测定

采用率定后的 TDR (TDR100, Campbell Scientific, Inc., USA)系统观测土壤体积含水率。 N1、N2、N3、N4处理每小区分别埋设6个探针,埋设 深度分别为15、25、60、80、100、120 cm。该系统每 30 min 采集一次信号,数据保存在 CR1000 数据采 集器内(Campbell Scientific, Inc., USA)。在作物生 长期间每个生育阶段取土样测量土壤氮素含量,取 样深度一般为 1.2 m,收获时取样深度一般为 3 m, 每 20 cm 为一层。取样时分别在每个处理的 3 个重 复小区各布置一个采样点,采集完土样的洞用相同 质地的土壤填充,同时在 30 cm 深度处放置小石块 或砖块以防止下次在同一位置采样。土壤硝态氮采 用紫外分光光度计法测量<sup>[19]</sup>。

冬小麦收获时每小区取5m<sup>2</sup>的样方获取籽粒产 量,取其均值计算小麦籽粒产量。当地夏玉米主要 用作青贮饲料,故夏玉米的产量以地上部分鲜生物 量计算,收获时每小区取30株玉米记录地上部分鲜 生物量,根据种植密度换算夏玉米产量。作物吸氮 量根据收获时作物氮素浓度和作物生物量计算,采 用半微量开氏法测定作物氮素浓度<sup>[20]</sup>。

利用试验站的小型气象站自动采集气象数据,包括太阳辐射、空气温湿度、风速等,降水采用雨量 筒测量,2a试验期间气象数据如图1所示。2010和 2011年小麦生育期内降水量分别为160.5、102.2 mm, 与历史资料相比分别属降水正常和降水较少年型。

### 1.3 模型介绍

RZWQM模型由美国农业研究中心(ARS)在 20世纪80年代为了更好地了解根区水流与地下水 污染的关系,总结已有模拟水质模型的基础上创建 的。该模型可以模拟水文过程、农业管理措施、作物 生长和化学物质变化等以及他们之间的相互作用。 RZWQM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 生长模块和管理操作模块,各模块间相互影响。模 型同时以2个时间尺度进行模拟,一是以日为时间 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,同时计算土壤表层蒸发和作物蒸 腾以及潜在蒸散;二是以小时为时间步长,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 质的入渗、传输和径流以及杀虫剂的淋失、热量传输 和植物氮素吸收等<sup>[21]</sup>。

## 1.4 模型率定与验证

RZWQM 模型输入初始数据主要有土壤含水 率、土壤温度、土壤表面残茬量、土壤硝态氮含量、土 壤容重、土壤有机质等,试验过程中未观测参数采用 模型缺省值。本文利用 2010 年和 2011 年的田间试 验数据分别率定和验证 RZWQM 模型中的水分模 块、氮素模块和作物模块。由于土壤水分、氮素迁移 和转化、作物生长是相互作用的,因此在模型率定时 采用迭代率定方法。本文模型率定过程采用 Hanson等<sup>[22]</sup>和 Cameira等<sup>[23]</sup>描述的模型率定方 法。模型率定和验证的先后顺序是水分模块、作物 模块和氮素模块。土壤水分模块和氮素模块率定时 主要通过对比实测和模拟的不同土层土壤含水率和 土壤氮素含量来实现。作物模块的率定主要通过对 比实测和模拟的地上部分生物量、产量、作物吸氮量 来实现。本文中分别选用 DSSAT4.0 作物模块和 Generic crop growth module 作物模块模拟冬小麦和 夏玉米生长。利用4个统计检验标准评估模型模拟 效果,分别为均方根误差( $R_{MSE}$ )、平均相对误差 ( $M_{RE}$ )、一致性指标(d)和相对误差( $R_E$ )。其计算 式为

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

$$M_{\rm RE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{P_i - O_i}{O_i} \times 100\%$$
(2)

$$d = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (|P_i - O_{avg}| + |O_i - O_{avg}|)^2}$$
(3)

$$R_{\rm E} = \frac{P_i - O_i}{O_i} \times 100\% \tag{4}$$

式中 *P<sub>i</sub>、O<sub>i</sub>*——第*i*个模拟值、实测值 *O<sub>uvu</sub>*——平均实测值

n----模拟值或实测值个数

## 1.5 模型应用

RZWQM 模型率定和验证都满足一定精确度 后,该模型即可以用来模拟不同水氮管理模式下作 物和土壤氮素对水、氮的响应。目前为止,华北平原 氮素研究中水分灌溉基本是基于传统的灌溉方式进 行的,即灌水频率低,一次灌水量较大(每次灌水 60 mm 或者更多),这样在冬小麦季也常有部分水和 氮素淋洗出作物根层(0~100 cm)<sup>[13,24]</sup>。本试验采 用优化的喷灌灌水方式(灌水频率高,单次灌水量 不超过40mm),可以控制冬小麦季土壤水、氮运移 深度,减少水、氮渗漏损失。为了定量分析不同灌水 频率条件下施氮对作物产量和氮素损失的影响,利 用率定和验证后的 RZWQM 模型模拟了 2010— 2011 年试验期间不同喷灌灌水频率对作物产量和 氮素渗漏的影响。设置了6个喷灌灌水频率,即当 累积水面蒸发量达 30、40、50、70、90、110 mm 时开 始灌溉,单次灌水量为累积蒸发量与降水量差值的 0.65 倍。累积蒸发量达 110 mm 情景下灌水频率和 单次灌水量与传统灌溉方式相似,可作为传统灌溉 方式分析。每种情景总灌水量一致,2010和2011 年冬小麦季总灌溉水量分别为 224.8、247.1 mm,施 肥量与当地的施肥量一致,即本试验中 N3 处理,夏 玉米季水、氮管理与田间试验一致。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤水分率定及验证

表1为模型率定和验证过程中不同土层土壤含 水率的实测值和模拟值比较结果,图2为率定和验 证过程中0~120 cm 土壤贮水量实测值和模拟值。 由表1可知率定和验证过程中不同土层土壤含水率 的 *R*<sub>MSE</sub> 从 0.026 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> (0~25 cm)降低到 0.015 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> (100~120 cm),总体表现为土壤含 水率的模拟结果随土壤深度的增加逐步改善;不同 土层土壤含水率  $M_{\text{RE}}$ 的变化范围为 - 6.66% ~ 5.83%。一致性指标(d)在 0.65以上。这说明不同土层土壤含水率模拟值与实测值拟合程度较好。图 2 表明模型率定和验证过程中土壤贮水量模拟值与实测值的点均匀分布在 1:1线附近,模拟值与实测值的回归线决定系数分别为 0.81 和 0.90,回归线斜率接近于 1(0.98 和 1.00),说明该模型能够很好地模拟土壤贮水量。模型中的土壤特性和水分参数见表 2。

表1 率定和验证过程中各层土壤含水量的  $R_{MSE}$ 、 $M_{RE}$ 和 d 值

Tab. 1  $R_{\text{MSE}}$ ,  $M_{\text{RE}}$  and d values of soil water content at different soil depths during calibration and validation processes

在凸	统计检验标准	土层深度/cm					
平切		15	25	60	80	100	120
	$R_{\rm MSE}/({\rm cm}^3\cdot{\rm cm}^{-3})$	0.025	0.023	0.023	0.018	0.021	0.016
2010	$M_{\rm RE}/\%$	1.23	0.98	-2.46	- 3. 20	- 5.26	2.77
	d	0.87	0.86	0.81	0.78	0.72	0.83
	$R_{\rm MSE}/({\rm cm}^3\cdot{\rm cm}^{-3})$	0.024	0.026	0.012	0.019	0.026	0.015
2011	$M_{\rm RE}$ /%	5.83	4.80	2.16	- 3. 87	- 6. 66	0.76
	d	0.85	0.85	0.93	0.70	0.65	0.80



图 2 N3 处理 0~120 cm 土壤贮水量实测值与模拟值

Fig. 2 Measured and simulated soil water storage in  $0 \sim 120$  cm soil profile for N3 treatment

(a) 2010 年率定过程 (b) 2011 年验证过程

#### 表 2 试验区土壤特性(颗粒组成和容重)和率定后的土壤参数

## Tab. 2 Soil physical properties (soil particle size distribution and bulk density) and

calibrated soil parameters of experimental area

土层深度		颗粒组成/%		容重	饱和导水率	田间持水率	凋萎点
/cm	$0.\ 05\ \sim 2\ \mathrm{mm}$	0.002 ~0.05 mm	小于 0.002 mm	$/(g \cdot cm^{-3})$	$/(\operatorname{cm} \cdot \operatorname{h}^{-1})$	$/(\mathrm{cm}^3\cdot\mathrm{cm}^{-3})$	$/(\mathrm{cm}^3\cdot\mathrm{cm}^{-3})$
0 ~ 20	41	53	6	1.43	1.08	0.320	0.15
$20 \sim 40$	36	57	7	1.43	0.98	0.317	0.15
$40 \sim 60$	33	47	20	1.41	0.68	0.336	0.17
$60 \sim 100$	31	55	14	1.41	1.58	0.354	0.21
$100 \sim 120$	43	51	6	1.41	1.86	0.378	0. 22
120 ~ 160	38	55	7	1.38	1.20	0.378	0. 22
$160 \sim 180$	69	28	3	1.35	0.68	0.417	0.21
$180\sim 200$	23	63	14	1.32	0.68	0.443	0.21
200 ~ 220	16	72	12	1.25	0.20	0.469	0. 23
$220 \sim 300$	10	76	14	1.32	0. 20	0.445	0.21

## 2.2 土壤氮素率定及验证

图 3、图 4 分别为 2010 年 N2 处理土壤剖面硝 态氮含量的实测值和模拟值(率定过程)以及 2011 年 N4 处理土壤剖面硝态氮含量的实测值和模拟值 (验证过程)。从图 3、图 4 可以看出率定和验证过 程中土壤硝态氮模拟值剖面分布趋势和实测值分布 趋势相同,且两数值大小相近。同时还可以看出在 优 化喷灌条件下冬小麦季土壤 硝态氮主要在 100 cm 以上土层变化,而夏玉米季由于大量降水致 使土壤硝态氮淋洗出作物主要根区(0~100 cm), 并且随着时间推移淋洗出根区土壤的硝态氮将进 一步往深处土层运移(如图4f土壤硝态氮运移前锋 位置较图3f土壤硝态氮运移前锋位置深)。图3、 图4结果说明该模型能够较好地模拟土壤氮素剖面 分布及土壤氮素运移。模型中有关氮素部分的参数 见表3。





## 2.3 作物产量、生物量和吸氮量率定及验证

表4为模型率定和验证过程中作物产量、生物 量、吸氮量的实测值和模拟值之间的相对误差。由 表4可以看出冬小麦籽粒产量、干生物量和吸氮量 模拟值与实测值的相对误差几乎均小于15%,模拟 效果较好。夏玉米率定过程中模拟值与实测值之间 相对误差几乎均小于25%。总体上该模型可以在 合理程度内模拟冬小麦-夏玉米生长。相应的作物 参数见表5。

#### 2.4 模型应用

利用率定后的 RZWQM 模型,模拟当地施氮量

(330 kg/hm<sup>2</sup>)条件下不同灌水频率时的小麦籽粒产量、小麦吸氮量、玉米干生物量、玉米吸氮量、氮素渗漏量以及氮素损失量,如图 5 所示。由图 5a ~ 5d 可以看出 2010 年和 2011 年,当累积蒸发皿蒸发量在 30 ~ 70 mm 之间灌水时,小麦籽粒产量和小麦吸氮量变化较小,而当累积蒸发皿蒸发量大于 70 mm 时灌溉,小麦籽粒产量和吸氮量显著降低。玉米季由于降雨较多灌溉较少,各情景下玉米干生物量和玉米吸氮量变化较小。模拟结果显示 2011 年小麦籽粒产量和玉米干生物量均高于 2010 年,这可能主要 是受气象条件(包括降水)的影响。Yu 等<sup>[25]</sup>研究

%



图 4 N4 处理土壤硝态氮含量预测值与实测值比较(2011 年验证过程)



#### 表 3 率定后的氮素转化参数

氮素转化过程	速率系数	默认值	率定后值
氨挥发	氨挥发常数	$1\ 000\ \sim 4\ 000$	1 000
尿素水解	水解系数 /(s·d <sup>-1</sup> )	$1.0 \times 10^{-9}$	$1.0 \times 10^{-8}$
硝化反应	硝化系数 /(s·d <sup>-1</sup> ·organism <sup>-1</sup> )	$1.0 \times 10^{-13}$	$1.0 \times 10^{-13}$
反硝化反应	反硝化系数 /(s·d <sup>-1</sup> ·organism <sup>-1</sup> )	2. 5 × 10 $^{-4}$	2. 5 × 10 $^{-4}$

## 表 4 率定和验证过程中实测和模拟的作物指标相对误差 R<sub>E</sub>

年份	作物指标	施氮处理				
		N1	N2	N3	N4	
	小麦籽粒产量	4.2	- 1. 9	- 2. 6	- 5. 6	
	小麦干生物量	7.2	3.3	- 3.8	- 15. 8	
2010(率定)	小麦吸氮量	7.5	- 0. 5	-1.6	- 14. 8	
	玉米干生物量	0.4	- 3.0	- 11. 0	- 5. 2	
	玉米吸氮量	- 5. 9	- 3. 2	- 18. 6	- 3. 5	
	小麦籽粒产量	24.5	23.9	7.4	11.6	
	小麦干生物量	5.2	-4.4	- 5. 5	-4.8	
2011(验证)	小麦吸氮量	- 7. 5	- 6. 4	- 13. 5	- 15.4	
	玉米干生物量	-21.3	- 13. 5	- 24. 7	- 25.6	
	玉米吸氮量	- 16. 2	- 22, 4	-21.4	-23.0	

## 表 5 率定后的作物参数

Tab. 5 Calibrated crop parameters

小麦参数 (DSSAT4.0)	数值	玉米参数(Generic crop growth module)	数值
春化作用特性 PIV	50	主动吸收氮速率/(g·株 <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	3.0
光周期特性 PID	70	光合作用转化为呼吸作用的比例/d <sup>-1</sup>	0.04
灌浆期特性 P5/(℃·d)	500	生物量叶面积转化吸收/(g·m <sup>-2</sup> )	10.0
籽粒数特性 G1/(粒・g <sup>-1</sup> )	28	生殖期阶段对光合作用的影响系数	0.98
潜在麦粒质量 G2/mg	26	育种阶段对光合作用影响系数	0.95
成熟期潜在单茎穗质量 G3/g	1.5	最大扎根深度/m	1.8
出叶间隔特性 PHINT/(℃・d)	95	最小气孔阻力/(s·m <sup>-1</sup> )	200
		氮充足指数	1
		富余吸氮系数	1.1



氮素渗漏量以及氮素损失量模拟值



得出作物产量受降水、太阳辐射和温度的影响。李 克南等<sup>[26]</sup>研究发现冬小麦产量与辐射呈极显著正 相关关系。本文中冬小麦灌溉制度是根据田间实际 的蒸发能力(蒸发皿水面蒸发量)和降水量制定,该 灌溉水量可以保障作物不受土壤水分的胁迫<sup>[18]</sup>,因 此在不受土壤水分胁迫的条件下,2a冬小麦产量差 异可能主要受气温和辐射影响。图1显示小麦返青 期2011年空气温度和净辐射均高于2010年,这有 利于促进小麦返青生长,进而为高产奠定基础。 2010年玉米季降水较少,而2011年玉米季降水较 多(图1)。当地玉米季平均多年降水量约430 mm, 2010年玉米季偏干旱,降水量223 mm,2011年降水 量基本在多年平均降水量附近(406 mm),较合适的 降水使得2011年玉米干生物量高于2010年。

由图 5e、图 5f 可以看出 2 a 试验期间当累积蒸 发量从 30 mm 增加到 70 mm 灌溉时,每年和年均氮 素渗漏量及氮素损失量变化均很小;而当累积蒸发 量增加到 90~110 mm 时开始灌溉,每年和年均氮 素渗漏量及氮素损失量明显增加;与累积蒸发量在 30~70 mm 时灌溉相比,累积蒸发量为 90~110 mm 时灌溉年均氮素渗漏量和损失量分别增加了9.0% 和 7.4%。曹巧红等<sup>[27]</sup>研究也得出与传统灌溉相 比,优化灌溉通过增加灌水频率和减少灌水定额从而 减少水分渗漏和氮素的淋洗。2010年所有情景下氮 素渗漏量和氮素损失量分别在 118~142 kg/(hm<sup>2</sup>·a) 和 139~162 kg/(hm<sup>2</sup>·a)范围内变化,2011 年其变 化范围分别为 174~187 kg/(hm<sup>2</sup>·a)和 211~ 227  $kg/(hm^2 \cdot a)$ 。该氮素渗漏量和损失量与其他学 者在华北地区研究得出的结果相似,如 Nie 等<sup>[28]</sup>在 华北地区研究得出玉米季施氮 375 kg/hm<sup>2</sup>时淋洗出 0~120 cm根区土层的氮素量为 167~229 kg/hm<sup>2</sup>。 图 5e、图 5f 显示 2011 年的氯素渗漏量和损失量要 明显高于2010年,这可能主要是2011年夏玉米季 降水较多且次降水量较大,进而造成较多的氮素渗

漏<sup>[29]</sup>。

考虑产量与氮素损失,推荐喷灌条件下累积 蒸发皿蒸发量达到 30~70 mm 时进行灌溉。累积 蒸发皿蒸发量为 110 mm 的情景下其灌水频率和 单次灌水量与传统灌溉方式相似,因此也可以得 出与传统灌溉方式相比,优化喷灌(累积蒸发量 30~70 mm)可以提高作物产量同时减小环境危 害。

## 3 结论

(1) 模型验证时各土层土壤含水率的  $R_{MSE}$ 和  $M_{RE}$ 分别在 0.015 ~ 0.026 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>和 - 6.66% ~ 5.83%之间变化,土壤贮水量模拟值与实测值之间 决定系数为 0.90,同时趋势线斜率接近于 1。模拟 的土壤氮素剖面分布趋势与实测剖面分布趋势相同,且模拟值与实测值接近。冬小麦籽粒产量、地上部分干生物量、吸氮量的模拟值和实测值相对误差小于15%,夏玉米干生物量、吸氮量的相对误差均小于25%。因此,RZWQM模型可以模拟华北地区冬小麦-夏玉米轮作条件下不同施氮量对作物和土壤水氮的影响。

(2)不同灌溉频率对作物产量、吸氮量和氮素 渗漏量等影响较大。与累积蒸发皿蒸发量为90~ 110 mm 时灌溉情景相比,累积蒸发皿蒸发量为30~ 70 mm 时进行灌溉,作物产量较高,且氮素渗漏量和 氮素损失量均较小。综合考虑作物产量和氮素渗漏 及氮素损失,得出较优的灌溉频率为累积蒸发皿蒸 发量为30~70 mm 时开始灌溉。

#### 参考文献

- 1 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2013:466,477.
- 2 崔振岭.华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系优化氮肥管理——从田块到区域尺度[D].北京:中国农业大学,2005.
- 3 杜连凤,吴琼,赵同科,等.北京市郊典型农田施肥研究与分析[J].中国土壤与肥料,2009(3):75-78.
- Du Lianfeng, Wu Qiong, Zhao Tongke, et al. Investigation of fertilizer application in different farmlands in suburbs of Beijing[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2009(3): 75 - 78. (in Chinese)
- 4 Ju X T, Liu X J, Zou G Y, et al. Evaluation of pathway of nitrogen loss in winter wheat and summer maize rotation system [J]. Agricultural Sciences in China, 2002, 1(11): 1224 1231.
- 5 Barton L, Colmer T D. Irrigation and fertiliser strategies for minimizing nitrogen leaching from turfgrass [J]. Agricultural Water Management, 2006, 80(1-3): 160-175.
- 6 Zotarelli L, Dukes M D, Scholberg J M S, et al. Tomato nitrogen accumulation and fertilizer use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(8): 1247 - 1258.
- 7 Cui Z L, Zhang F S, Chen X P, et al. In-season nitrogen management strategy for winter wheat: maximizing yields, minimizing environmental impact in an over-fertilization context[J]. Field Crops Research, 2010, 116(1-2): 140-146.
- 8 Badr M A, El-Tohamy W A, Zaghloul A M. Yield and water use efficiency of potato grown under different irrigation and nitrogen levels in an arid region [J]. Agricultural Water Management, 2012, 110: 9-15.
- 9 Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China—contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63(2-3): 117-127.
- 10 Liu G D, Wu W L, Zhang J. Regional differentiation of non-point source pollution of agriculture-derived nitrate nitrogen in groundwater in northern China[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2005, 107(2-3): 211-220.
- 11 吴永成,周顺利,王志敏,等. 华北地区夏玉米土壤硝态氮的时空动态与残留[J]. 生态学报,2005,25(7):1620-1625.
   Wu Yongcheng, Zhou Shunli, Wang Zhimin, et al. Dynamics and residue of soil nitrate in summer maize field of North China
   [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(7): 1620-1625. (in Chinese)
- 12 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.
- 13 Li X X, Hu C S, Delgado J A, et al. Increased nitrogen use efficiencies as a key mitigation alternative to reduce nitrate leaching in North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2007, 89(1-2): 137-147.
- 14 Cui Z L, Zhang F S, Chen X P, et al. On-farm evaluation of an in-season nitrogen management strategy based on soil N<sub>min</sub> test [J]. Field Crops Research, 2008, 105(1-2): 48-55.
- 15 Yang R, Wang X F. Effects of nitrogen fertilizer and irrigation rate on nitrate present in the profile of a sandy farmland in Northwest China[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 11(Part B): 726 732.
- 16 房全孝,于强,王健林.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 Quanxiao, 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)

- 17 Wang X P, Huang G H. 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.
- 18 Liu H J, Yu L P, Luo Y, et al. Responses of winter wheat (*Triticumaestivum* L.) evapotranspiration and yield to sprinkler irrigation regimes[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(4): 483-492.
- 19 Norman R J, Stucki J W. The determination of nitrate and nitrite in soil extracts by ultraviolet spectrophotometry[J]. Soil Science

Society of America Journal, 1981, 45A: 347-353.

- 20 Bremner J M. Nitrogen-total [M] // Sparks D L. Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods [M]. Madison, WI: SSSA, 1996, 5: 1085 1121.
- 21 Ma L, Ahuja L R, Ascough II, et al. Integrating system modeling with field research in agriculture: applications of the root zone water quality model (RZWQM) [J]. Advances in Agronomy, 2000, 71: 236 244.
- 22 Hanson J D, Rojas K W, Shaffer M J. Calibrating the root zone water quality model[J]. Agronomy Journal, 1999, 91(2): 171-177.
- 23 Cameira M R, Fernando R M, Ahuja L R, et al. Simulating the fate of water in field soil-crop environment [J]. Journal of Hydrology, 2005, 315(1-4): 1-24.
- 24 Liu X J, Ju X T, Zhang F S, et al. Nitrogen dynamics and budgets in a winter wheat-maize cropping system in the North China Plain[J]. Field Crops Research, 2003, 83(2): 111-124.
- 25 Yu Q, Li L H, Luo Q Y, et al. Year patterns of climate impact on wheat yields [J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(2): 518 - 528.
- 26 李克南,杨晓光,刘园,等. 华北地区冬小麦产量潜力分布特征及其影响因素[J]. 作物学报,2012,38(8):1483-1493. Li Kenan, Yang Xiaoguang, Liu Yuan, et al. Distribution characteristics of winter wheat yield and its influenced factors in North China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012,38(8):1483-1493. (in Chinese)
- 27 曹巧红,龚元石.应用 Hydrus-1D 模型模拟分析冬小麦农田水分氮素运移特征[J].植物营养与肥料学报,2003,9(2):139-145. Cao Qiaohong, Gong Yuanshi. Simulation and analysis of water balance and nitrogen leaching using Hydrus-1D under winter wheat crop[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(2): 139-145. (in Chinese)
- 28 Nie S W, Eneji A E, Chen Y Q, et al. Nitrate leaching from maize intercropping systems with N fertilizer over-dose[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012,11(9): 1555-1565.
- 29 Asadi M E, Clemente R S, Gupta A D, et al. Impacts of fertigation via sprinkler irrigation on nitrate leaching and corn yield in an acid-sulphate soil in Thailand [J]. Agricultural Water Management, 2002,52(3): 197-213.

------

#### (上接第48页)

- 5 阮久宏,李贻斌,荣学文,等. 无人驾驶高速 AWID-AWIS 车辆运动控制研究[J]. 农业机械学报,2009,40(12):37-42. Ruan Jiuhong, Li Yibin, Rong Xuewen, et al. Control of unmanned high-speed AWID-AWIS vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(12):37-42. (in Chinese)
- 6 李文哲,徐绮川.汽车拖拉机学-底盘构造与车辆理论[M].北京:中国农业出版社,2005.
- 7 Masri B Baharom, Khalid Hussain, Andrew J Day, et al. Design of full electric power steering with enhanced performance over that of hydraulic power-assisted steering [J]. Proc IMech E, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2013, 227(3):390 399.
- 8 Dannohl C, Muller S, Ulbrich H, et al. H<sub>x</sub>-control of a rack-assisted electric power steering system [J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(4-6):527-544.
- 9 Tin Lunlam, Qian Huihuan, Xu Yangsheng, et al. Omnidirectional steering interface and control for a four-wheel independent steering vehicle[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2010, 15(3): 329-338.
- 10 Wang J M, Hsieh F. Vehicle yaw-inertia-and mass-independent adaptive steering control [J]. Proc IMech E, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2009, 223(9):1101-1108.
- 11 Simionescu P A, Ilie Talpasanu. Synthesis and analysis of the steering system of an adjustable tread-width four-wheel tractor [J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(5):526-540.
- 12 Zhang Z, Chau K, Wang T Z, et al. Analysis and stabilization of chaos in the electric-vehicle steering system [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(1):118-126.
- 13 Yoshihiro Takita. Drift turning of lateral guided vehicle with sensor steering mechanism (application of a variable kinetic friction model)[J]. 日本機械学会論文集: C編,2002,68(675):3170-3177.
- 14 Jian Xiaogang, Wang Yefeng, Yang Pengchun, et al. Schematic design and research on steering mechanism of drilling robot[M] // Frontier in Information Engineering for Mechanics and Materials,2012:317 - 321.
- 15 刘平义, 宣佳敏, 李海涛, 等. 适应轮距调整车辆的转向机构: 中国, 201310395112.7[P]. 2013-12-25.
- 16 冯其波,崔建英,陈士谦. 基于平行四边形机构的车轮几何参数自动测量方法的研究[J]. 机械工程学报,2004,40(9):190-194. Feng Qibo, Cui Jianying, Chen Shiqian. Novel method for automatically measuring geometric parameters of train wheels based on parallelogram mechanisms [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004,40(9):190-194. (in Chinese)
- 17 孙松林,吴运强,任述光.变型拖拉机转向梯形机构参数最佳值的确定[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版,2003,29(2): 161-162.
  - Sun Songlin, Wu Yunqiang, Ren Shuguang. Determination of optimum parameter s of steering trapezium mechanism of derivative tractor[J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2003,29(2):161-162. (in Chinese)
- 18 窦玲静.高地隙自走式喷雾机轮距可调式转向系统的设计与研究[D].北京:中国农业机械化科学研究院,2012.
- 19 马丽娜,毛恩荣,朱忠祥,等.轮式联合收获机转向桥壳优化设计[J].农业机械学报,2013,44(增刊2):283-287.
   Ma Li'na, Mao Enrong, Zhu Zhongxiang, et al. Optimized design of steering axle housing for wheeled combine harvester[J].
   Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(Supp.2):283-287. (in Chinese)
- 20 农琪,谢亚冬.基于 MATLAB 的叉车曲柄滑块式转向机构的优化设计[J].制造业自动化,2010,32(12):78-79.