

# 根区水质模型在黄土高原旱区冬小麦氮肥管理中的适用性分析

丁奠元<sup>1,2</sup>, 赵英<sup>2,4</sup>, 孙本华<sup>2,4</sup>, 何建强<sup>1,2</sup>, 冯浩<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 杨凌 712100;  
3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

**摘要:** 为利用作物模型模拟寻找田间尺度上合理的氮肥管理措施, 该研究利用黄土高原旱区多年冬小麦-春玉米轮作试验(2004—2011)和两年冬小麦施肥试验(2010—2012)对根区水质模型(root zone water quality model-version 2, RZWQM2)进行率定和验证, 验证该模型在当地的适用性; 并结合当地 56 a 历史气象数据, 利用模型模拟研究旱区冬小麦在不同降水年型下最佳氮肥管理模式。结果表明 RZWQM2 在不同降水年型下均可以较好地模拟黄土高原旱区作物生长发育、产量指标和土壤水分的动态变化, 并且能够较好地模拟不同施肥方式下冬小麦的产量和氮素指标; 黄土高原旱区 120~150 kg/hm<sup>2</sup> (以 N 计)的底肥基本可以满足不同降水年型下冬小麦稳产高产的需要; 冬小麦单次追肥的最佳追肥时期为返青期至拔节期; 在 90 kg/hm<sup>2</sup>底施氮肥的基础上, 丰水年 54~72 kg/hm<sup>2</sup>的追氮量, 平水年 36~54 kg/hm<sup>2</sup>的追氮量, 干旱年 18~36 kg/hm<sup>2</sup>的追氮量, 不但可以满足冬小麦高产的要求, 并且维持氮素收获指数在较高水平。

**关键词:** 模型; 作物; 氮; RZWQM; 旱区; 降水年型; 冬小麦; 施肥方式

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.23.015

中图分类号: S143.1; S146; S161.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-23-0111-11

丁奠元, 赵英, 孙本华, 何建强, 冯浩. 根区水质模型在黄土高原旱区冬小麦氮肥管理中的适用性分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 111—121. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.23.015 <http://www.tcsae.org>  
Ding Dianyuan, Zhao Ying, Sun Benhua, He Jianqiang, Feng Hao. Suitability analysis of nitrogen fertilizer management on dryland of Loess Plateau based on root zone water quality model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(23): 111—121. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.23.015 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

合理施用氮肥可以提高旱区小麦产量, 改善小麦品质<sup>[1-2]</sup>, 但氮肥的不合理施用也会造成氮肥利用率低、环境污染等不良后果<sup>[3-4]</sup>。在中国西北黄土高原地区, 旱地小麦是粮食生产的主要作物之一。然而, 该地区干旱天气频发, 降水的年际变化大, 时空分布不均, 且与冬小麦水分需求规律不吻合, 怎样在这种气候背景下合理施用氮肥就成为该地区农业生产中的重要问题。前人对旱区冬小麦合理的氮肥管理已有较多研究<sup>[5-9]</sup>, 但其研究多集中在短期内, 施氮量处理有限, 很少考虑降水的年际变化与施氮方式和施氮量的互作关系; 研究人员更多地采用旱棚(或盆栽)试验, 然而在此条件下得出的结论往往和田间自然条件下的结论存在差异; 并且冬小麦底肥施氮量、追氮时间和追氮量与降水的耦合关系鲜有报道。

利用作物模型模拟寻找田间尺度上合理的氮肥管理模式是一个较好的研究方法。根区水质模型(root zone water quality model-version 2, RZWQM2)是一款基于过

程的作物模型, 可以对土壤-作物-大气农田系统进行模拟和预测<sup>[10]</sup>, 已在世界各地得到广泛应用<sup>[11-13]</sup>。该模型在中国也有大量试验验证和应用, 主要集中在优化灌溉制度<sup>[14]</sup>、灌溉农田水氮管理<sup>[15]</sup>、土壤剖面水氮运移<sup>[16]</sup>、农田土壤基础性质差异影响水氮过程<sup>[17]</sup>和对作物产量的模拟上<sup>[18]</sup>。目前为止, RZWQM2 还未很好地应用于旱区冬小麦氮肥管理的研究上, 其在西北黄土高原旱区的适用性也有待进一步研究。

鉴于以上研究现状, 笔者拟利用黄土高原旱区连续多年冬小麦-春玉米田间试验数据对 RZWQM2 模型参数进行率定和验证; 在经过率定和验证的水分模块参数的基础上, 利用同一地区连续两年冬小麦施肥试验对 RZWQM2 模型的养分和作物模块参数进行率定和验证, 探究该模型在黄土高原旱区的适用性; 在此基础上, 结合当地 56 a 历史气象数据, 利用该模型模拟研究旱区冬小麦在不同降水年型下最佳氮肥管理模式, 为西北黄土高原旱区氮肥的高效利用提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况与试验设计

试验区地处黄土高原中南部渭北旱塬, 塬面平坦, 海拔 1 220 m 左右。年平均气温为 9.1℃, 年日照时数为 2 230 h。该地区受温带半干旱半湿润性季风气候影响, 旱季雨季分明, 多年平均降水为 578 mm, 其中 55%的降水发生在 7 月至 9 月, 是典型的雨养旱作农业区。土壤为黏壤质黑垆土, 土质疏松, 土层深厚, 土壤理化性质见表 1。

收稿日期: 2015-08-31 修订日期: 2015-10-30

基金项目: 国家 863 计划项目(2013AA102904); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室主任基金(K318009902-1427); “111”项目(B12007)  
作者简介: 丁奠元, 男, 山东潍坊人, 博士生, 主要研究方向为水土资源高效利用。西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100。

Email: ding@nwsuaf.edu.cn

\*通信作者: 冯浩, 男, 研究员, 主要从事水土资源高效利用方面研究。中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100。

Email: nercwsi@vip.sina.com

表 1 土壤不同深度基本理化参数数据

Table 1 Soil physical and chemical parameters at various depths for experimental site

土壤深度 Soil depth/cm	砂粒 Sand ( $\geq 0.05 \sim 2$ mm)	粉粒 Silt ( $\geq 0.002 \sim 0.05$ mm)	黏粒 Clay ( $< 0.002$ mm)	容重 Bulk density/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	饱和含水率 Saturated water content/%	田间持水率 Field capacity/%	凋萎系数 Permanent wilting point/%	有机炭 Organic carbon/%	土壤 pH 值 Soil pH value
0~10	10.03	75.03	14.94	1.27	50.57	28.18	11.24	0.85	8.40
>10~20	10.15	74.69	15.16	1.27	51.69	27.71	9.87	0.73	8.40
>20~30	7.87	73.61	18.52	1.35	47.17	27.91	6.58	0.63	8.50
>30~40	7.87	73.61	18.52	1.35	49.43	28.66	12.34	0.63	8.50
>40~50	7.75	80.16	12.09	1.30	47.55	28.94	10.98	0.55	8.50
>50~60	7.75	80.16	12.09	1.30	47.55	28.94	10.98	0.55	8.50
>60~80	8.90	77.31	13.79	1.25	46.79	29.12	10.91	0.58	8.50
>80~100	8.90	77.31	13.79	1.25	53.58	27.15	8.77	0.58	8.50

冬小麦-春玉米田间试验(2004—2011)在中国科学院长武黄土高原农业生态试验站综合观测场进行(107°40'E, 35°12'N; 表 2)。除了施氮肥(N, 尿素)外, 冬小麦施磷肥( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) 90 kg/hm<sup>2</sup>; 2004 年、2007 年和 2010 年春玉米施磷肥( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) 分别为 39.3、90.0 和 38.7 kg/hm<sup>2</sup>; 全部肥料作为底肥, 播种前一次施入。试验期内作物无灌水, 其耕作和田间管理与当地习惯方式一致。

利用中子探测仪(Neutron probe, CN503B)测量 1 m 深土层的水分含量变化。观察记录冬小麦和春玉米各物候期, 在越冬期、返青期、拔节期和抽穗期分别测定计算冬小麦叶面积指数(leaf area index, LAI)和地上部生物量干质量; 分别在五叶期、拔节期、抽穗期和成熟期测定玉米的 LAI 和地上部生物量干质量。模型所需的 1956—2012 年气象资料从长武黄土高原农业生态试验站的自动气象站获取。

表 2 冬小麦-春玉米田间试验

Table 2 Field experiment of winter wheat-spring maize

年份 Years	作物 Crop	品种 Cultivars	N 肥用量 N application rate/ ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	播种时间 Sowing date	播种量 Seeding density/ ( $\text{seeds}\cdot\text{m}^{-2}$ )	收获日期 Harvest time
2004	春玉米 Spring maize	金穗 2001 Jinsui 2001	138	2004-04-16	5	2004-09-06
2004—2005	冬小麦 Winter wheat	长武 89134 Changwu 89134	138	2004-09-25	350	2005-06-20
2005—2006	冬小麦 Winter wheat	长武 89134 Changwu 89134	138	2005-09-26	350	2006-06-22
2007	春玉米 Spring maize	沈单 10 Shendan 10	138	2007-04-22	5	2007-09-18
2007—2008	冬小麦 Winter wheat	长早 58 Changhan 58	138	2007-09-21	350	2008-06-20
2008—2009	冬小麦 Winter wheat	长早 58 Changhan 58	138	2008-09-17	350	2009-06-22
2010	春玉米 Spring maize	先玉 335 Xianyu 335	138	2010-04-24	5.5	2010-09-11
2010—2011	冬小麦 Winter wheat	长早 58 Changhan 58	138	2010-09-25	350	2011-06-25

2010—2012 两年冬小麦施肥试验(表 3)布设在综合观测场几公里外的长武县丁家镇十里铺村进行(107°45'E, 35°12'N), 选取农户习惯施肥和传统施肥两个处理(表 3), 农户习惯施肥用于模型率定, 传统施肥用于模型验证。两年试验中, 分别于 2010 年 9 月 23 日

和 2011 年 9 月 27 日播种, 分别于 2011 年 6 月 27 日和 2012 年 6 月 30 日机械收获。冬小麦收获时秸秆全部移走, 收获后 1 周翻耕一次, 耕深为 40 cm, 经过夏闲, 下一季小麦播种前 2 周再旋耕整地一次, 耕深为 15 cm。冬小麦品种为长武 521, 具体取样和测定项目参阅李强等<sup>[19]</sup>。

表 3 2010—2012 年长武冬小麦施肥试验基本信息

Table 3 Basic information about two-year fertilizer experiment of winter wheat in Changwu (2010—2012)

处理 Treatment	模型调参 Model adjusting	N 肥用量 N application rate/( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )		施磷量 $\text{P}_2\text{O}_5$ application rate/ ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )	播种量 Seeding density/ ( $\text{seeds}\cdot\text{m}^{-2}$ )	行宽 Line width/cm
		播前 Before sowing	返青前 Before turning green			
农户习惯施肥 Current farmer's habitual fertilization	率定 Calibration	162	0	105	150	20
传统施肥 Conventional fertilization	验证 Validation	112	50	105	150	20

注: 返青前追施氮肥时间为每年 2 月 20 日, 数据来源于李强等<sup>[19]</sup>。

Note: The topdressing N fertilizer was applied on February 20 before turning green, Data cited by Li Qiang et al<sup>[19]</sup>.

## 1.2 模型简介

RZWQM2 模型是美国农业部大平原系统研究所研发, 包括由 6 个子模块: 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。RZWQM2 中嵌套了农业决策支持系统 (decision support system for agrotechnology transfer-version 4.0, DASST4.0) 模型, 用来模拟作物生长发育过程和最终产量。本文中以 DSSAT 4.0 中的 CERES-WHEAT 和 CERES-MAIZE 模块来分别模拟冬小麦和春玉米的生长过程。

RZWQM2 模型输入初始数据主要有气象数据 (每日最高温度、最低温度、平均相对湿度、风速、降水和净辐射量等)、试验田块的土壤物理性质 (土壤剖面的土壤质地、容重、饱和含水率和土壤水分特征曲线参数等)、土壤化学性质 (土壤硝态氮含量、铵态氮含量、土壤有机质等)、模型模拟的初始土壤数据 (土壤表面残茬量、土壤剖面的含水率和温度) 和试验中田间管理措施 (播种时间、播种量、收获时间、灌溉处理、施肥处理和耕作处理等)。模型参数调试以水分模块、养分模块和作物模块依次迭代进行, 未观测参数采用模型缺省值。

## 1.3 模型率定与验证

本研究率定和验证过程采用 RZWQM2 中内嵌的 PEST 软件<sup>[20]</sup>和试错法<sup>[12]</sup>相结合的方式。首先利用黄土高原旱区 8a 冬小麦-春玉米田间试验数据, 以 2008—2011 年田间试验数据进行模型参数率定, 以 2004—2007 年田间试验数据进行模型参数验证。其次, 利用两年冬小麦施肥试验数据, 在率定和验证后的水分模块参数的基础上, 对 RZWQM2 的养分模块和作物模块参数再次进行率定和验证 (试错法), 以期得到适用于黄土高原旱区冬小麦不同施肥方式下的 RZWQM2 模型, 其中以连续两年农户习惯施肥数据进行率定, 以连续两年传统施肥处理数据进行验证 (表 3)。

在冬小麦-春玉米田间试验 (2004—2011 年) 利用 PEST 调参过程中, 冬小麦和春玉米均只设置一个品种参数; PEST 调参结束后, 利用试错法针对不同品种参数进行微调; 最后在模型的率定和验证过程中, 冬小麦品种长武 89134 和长旱 58 使用同样的作物遗传特性参数; 3 个玉米品种分别使用不同的作物遗传特性参数。在两年的冬小麦施肥试验中 (2010—2012 年), 基于冬小麦-春玉米田间试验 (2004—2011 年) 中调试好的土壤水分模块参数, 对冬小麦品种长武 521 运用试错法进行作物遗传特性参数进行调试, 在 RZWQM2 中得到合适的长武 521 的遗传特性参数, 并用这套遗传参数进行相关模拟研究。

利用均方根误差 (root mean square error, RMSE)、一致性指标  $d$ 、平均相对误差 (mean relative error, MRE) 和相对误差 (relative error, RE) 评估模型模拟效果, 计算公式如下

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}, \quad (1)$$

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

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)}{O_i} \times 100\%, \quad (3)$$

$$RE = \frac{P_i - O_i}{O_i} \times 100\%。 \quad (4)$$

式中  $P_i$  为第  $i$  个模拟值,  $O_i$  为第  $i$  个实测值,  $O_{avg}$  为平均实测值,  $n$  为模拟值或实测值的个数。

## 1.4 模型应用

该试验首先根据干旱指数 (drought index, DI) 将 1956—2012 年冬小麦生育期内降水 (9 月至次年 6 月) 划分为丰水年 ( $DI \geq 0.35$ )、平水年 ( $-0.35 < DI < 0.35$ ) 和干旱年 ( $DI \leq -0.35$ ), 其计算公式如下<sup>[21]</sup>

$$DI = (P - M) / \sigma。 \quad (5)$$

式中  $P$  为冬小麦生育期内降水量, mm;  $M$  为 1956—2012 年冬小麦生育期内平均降水量, mm;  $\sigma$  为 1956—2012 年冬小麦生育期内降水量的标准差。

在 RZWQM2 中, 共设置了 0、30、60、90、120、150、180 和 210 kg/hm<sup>2</sup> 8 个底肥施氮 (尿素) 水平情景, 通过模型模拟比较不同降水年型的冬小麦产量、作物水分利用效率 (water use efficiency, WUE)、冬小麦籽粒吸氮量和氮素收获指数, 定量分析不同降水年型下不同底肥施氮量对小麦生长的影响。

在合适的底肥施氮量基础上 (底肥施氮量不变), 分别在小麦返青前期 (每年 3 月 5 日)、拔节前期 (每年 4 月 5 日) 和抽穗前期 (每年 4 月 25 日) 3 个生育时期设置底追比为 5:1、5:2、5:3、5:4 和 5:5 的 5 个追氮量 (尿素) 水平情景, 通过比较冬小麦产量、WUE 和冬小麦籽粒中的氮含量寻找最佳追氮生育期。

通过比较不同降水年型下冬小麦产量、WUE、冬小麦籽粒吸氮量和氮素收获指数, 分析不同追氮量对冬小麦生长和氮肥利用的影响。氮素收获指数=籽粒吸氮量/植株总吸氮量; WUE=籽粒产量/蒸发蒸腾量。试验中采用 Excel2010、SPSS15.0 和 SigmaPlot 10.0 分别对数据进行处理、分析和作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 RZWQM2 在黄土高原旱区适用性评价

#### 2.1.1 作物产量指标的率定与验证

作物产量的模拟值和实测值均分布在 1:1 线附近, 具有较好的一致性, 其 RE 均接近或小于实测值的标准差 (图 1a)。除了 2005—2006 年冬小麦地上部生物量之外, 其余年份中 RZWQM2 均能较好地模拟作物地上部生物量 (图 1b)。2005—2006 年冬小麦地上部生物量模拟较差的原因可能是冬小麦生育期内累计光合有效辐射量比多年平均值 (1956—2012 年) 减少 13.3%, 限制了模型中冬小麦的叶片的光合作用, 导致模型严重低估了地上部生物量。

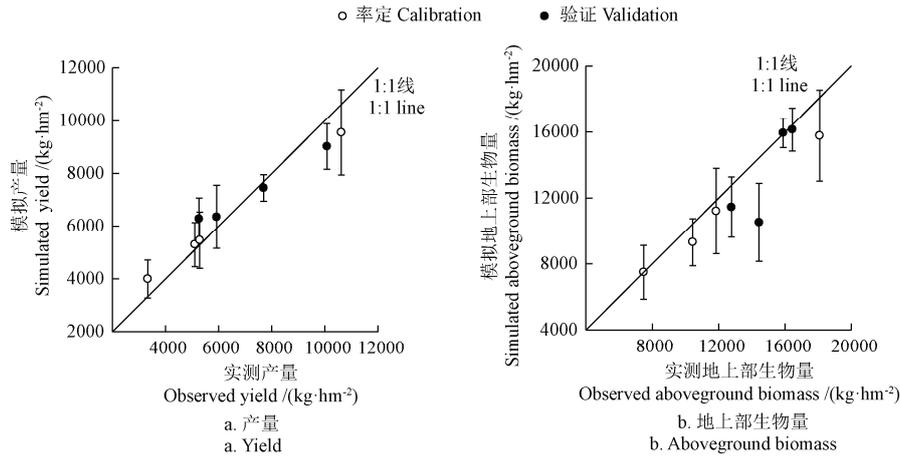


图1 作物产量和地上部生物量模拟值与实测值之间的关系

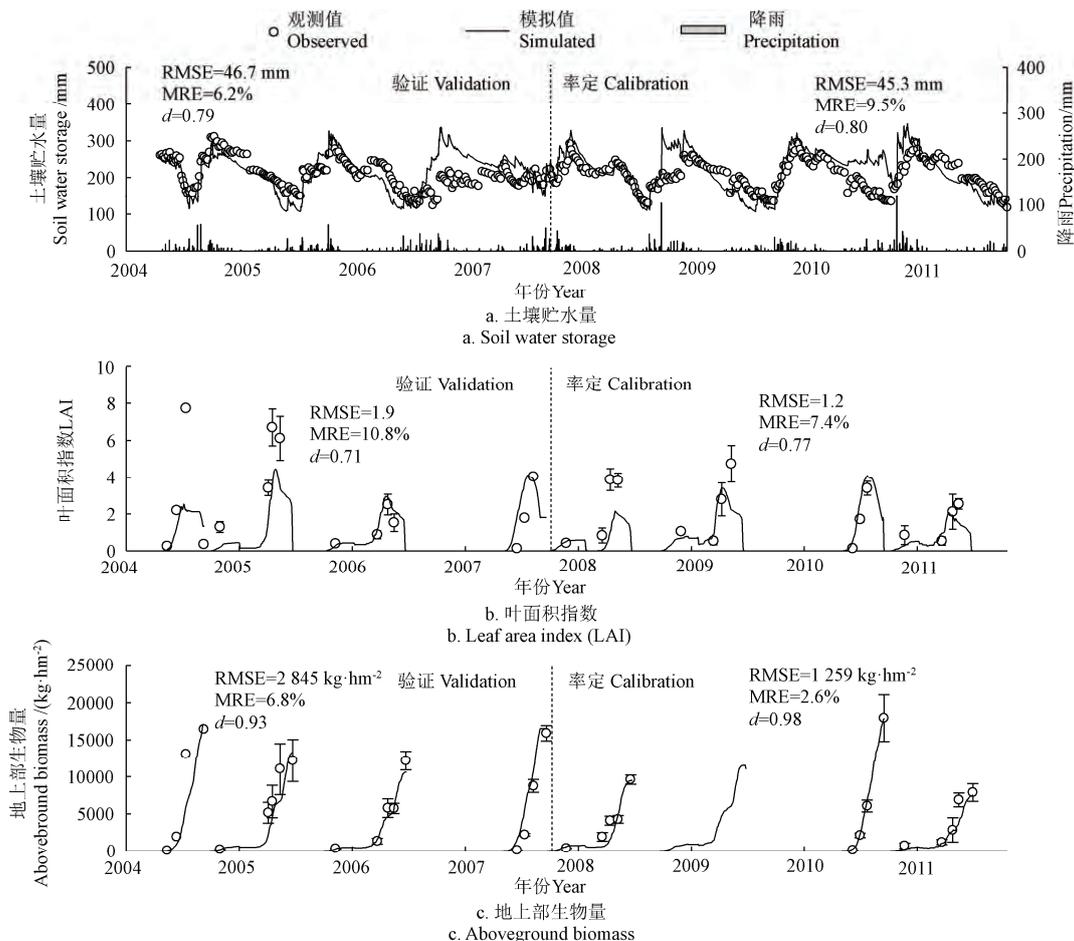
Fig.1 Correlation analysis between observed and simulated values of grain yield and aboveground biomass

### 2.1.2 土壤水分动态和作物生长动态的率定与验证

在冬小麦-春玉米试验中, 0~100 cm 土壤贮水量的模拟值与实测值变化趋势呈现出较好的一致性(图 2a), 模型率定过程中的 RMSE、MRE 和  $d$  分别为 45.3 mm、9.5% 和 0.80, 验证过程中的 RMSE、MRE 和  $d$  分别为 46.7 mm、6.2% 和 0.79, 这表明模型较好地反映了土壤水

分含量随降水的动态变化。

冬小麦和春玉米的 LAI 模拟值与观测值随时间呈相似动态变化(图 2b), 率定过程中的 RMSE、MRE 和  $d$  分别为 1.2、7.4% 和 0.77, 验证过程中的 RMSE、MRE 和  $d$  分别为 1.9、10.8% 和 0.71, 模型较好地模拟了 LAI 随时间的动态变化。但是小麦 LAI 模拟结果较玉米季模



注: RMSE、MRE 和  $d$  分别为均方根误差、平均相对误差和一致性指标。以 2008-2011 年田间试验数据进行模型参数率定, 以 2004-2007 年田间试验数据进行模型参数验证。

Note: RMSE, MRE and  $d$  were the root mean square error, index of agreement and mean relative error, respectively. Data from 2008-2011 were used for model calibration, and data from 2004-2007 were used for model validation.

图2 土壤贮水量(0~100 cm)、作物叶面积指数和地上部生物量模拟值与实测值的对比

Fig.2 Comparisons between observed and simulated soil water storage (0-100 cm), leaf area index (LAI), and aboveground biomass

拟结果差, 原因可能是小麦季为旱季, 模型中土壤的干旱因子限制了冬小麦生长, 导致冬小麦 LAI 较小, 因此模型中冬小麦对干旱因子的响应需要进一步改善<sup>[22]</sup>。

模型充分模拟了作物地上部生物量随作物生长的动态变化(图 2c), 率定过程中的 RMSE、MRE 和  $d$  分别为 1 259 kg/hm<sup>2</sup>、2.6%和 0.98, 验证过程中的 RMSE、MRE 和  $d$  分别为 2 845 kg/hm<sup>2</sup>、6.8%和 0.93。

### 2.1.3 冬小麦不同施肥方式下的 RZWQM2 的率定和验证

两年冬小麦施肥试验中, 不管是率定过程还是验证过程, 地上部生物量、产量、地上部吸氮量和籽粒吸氮量的实测值和模拟值均非常接近(表 4)。在整个率定过

程和验证过程中, 除了 2010—2011 年的地上部吸氮量和籽粒吸氮量之外, 其他参数的 RE 均小于 12.6%, 这表明 RZWQM2 可以较好地模拟黄土高原旱区冬小麦不同施肥方式下的产量指标和作物对氮素的吸收。

以上分析表明 RZWQM2 可以在不同降水年型(2004—2005、2008—2009 和 2010—2011 年为干旱年, 2002—2003 和 2005—2006 年为平水年, 2007—2008 年为丰水年)下均能较准确地模拟作物生长发育的动态过程及其产量, 较好地模拟土壤水分的动态变化, 因此 RZWQM2 适用于西北黄土高原旱区作物的模拟研究。

表 4 两年冬小麦施肥试验地上部生物量、产量、地上部吸氮量和籽粒吸氮量的实测值和模拟值对比

Table 4 Comparisons between observed and simulated aboveground biomass, yield, N uptake of shoot and N uptake of grain in two-year fertilizer experiment of winter wheat

参数 Parameter	年份 Year	率定过程 Calibration			验证过程 Validation		
		实测值 Observed	模拟值 Simulated	相对误差 RE/%	实测值 Observed	模拟值 Simulated	相对误差 RE/%
地上部生物量 Aboveground biomass/(kg·hm <sup>-2</sup> )	2010—2011	9 469a	9 281	2.0	10 693b	9 347	12.6
	2011—2012	13 191a	14 189	7.6	13 971a	14 965	7.1
产量 Yield/(kg·hm <sup>-2</sup> )	2010—2011	4 149a	4 620	11.3	4 791a	4 676	2.4
	2011—2012	6 478a	5 902	8.9	6 816a	6 206	8.9
地上部吸氮量 N uptake of shoot/(kg·hm <sup>-2</sup> )	2010—2011	116a	115	1.0	143b	115	19.8
	2011—2012	152a	148	2.8	154a	159	3.1
籽粒吸氮量 N uptake of grain/(kg·hm <sup>-2</sup> )	2010—2011	90a	95	6.1	114b	96	16.0
	2011—2012	122a	123	0.9	123a	130	5.5

注: 同一行实测值后不同小写字母表示两个处理的 LSD 检验在  $P<0.05$  水平上差异显著。

Note: Different small letters following observed values in the same row show significant difference between the two treatments at  $P<0.05$  level.

## 2.2 冬小麦生长对不同底肥施氮量的响应

计算表明 1956—2012 年长武地区冬小麦生育期内平均降水为 363.9 mm, 冬小麦生育期内降水量大于 398 mm 的年份划分为丰水年, 降水量小于 329 mm 的年份划分为干旱年。在 1956—2012 年的 56 a 中, 丰水年有 18 a, 平水年有 16 a, 干旱年有 22 a。

不同降水年型下冬小麦产量、WUE 和籽粒吸氮量随着施氮量的增加均不断增加(图 3a, 3b 和 3c)。当施氮量小于 60 kg/hm<sup>2</sup>时, 冬小麦产量和 WUE 在不同降雨年型下差别很小; 当施氮量为 60~120 kg/hm<sup>2</sup>时, 平水年的冬小麦产量和 WUE 比丰水年的大, 枯水年的最小; 当施氮量为大于 120 kg/hm<sup>2</sup>时, 丰水年的冬小麦产量和 WUE 最大, 平水年次之, 枯水年最小(图 3a 和 3b)。不同降水年型下冬小麦的产量和 WUE 可以以施氮量 90 kg/hm<sup>2</sup>为界划分为两个阶段, 当施氮量小于 90 kg/hm<sup>2</sup>时, 冬小麦的产量和 WUE 呈现出快速增加的趋势; 当施氮量超过 90 kg/hm<sup>2</sup>时, 冬小麦的产量和 WUE 的增加趋于缓慢, 这种趋势在平水年和干旱年尤为明显(图 3a 和 3b)。

当施氮量小于 90 kg/hm<sup>2</sup>时, 在不同降水年型下籽粒吸氮量差别不大; 当施氮量为 90~150 kg/hm<sup>2</sup>时, 平水年的籽粒吸氮量略大于丰水年的值, 当施氮量大于 150 kg/hm<sup>2</sup>时, 丰水年的籽粒吸氮量大于平水年的值(图 3c)。其中原因可能是施氮量为 90~150 kg/hm<sup>2</sup>时, 平水年的水肥耦合条件更好地促进了冬小麦对氮素的吸收和转化, 从而提高了籽粒吸氮量。籽粒吸氮量在丰水年

和平水年随着底肥施氮量的增加不断增加; 当施氮量大于 120 kg/hm<sup>2</sup>时, 干旱年籽粒吸氮量增速变缓(图 3c)。

冬小麦氮素收获指数随着底肥施氮量的增加在不同降水年型中呈现出不同的变化趋势(图 3d)。在丰水年, 当施氮量大于 30 kg/hm<sup>2</sup>时, 氮素收获指数随着底肥施氮量的增加不断增加, 直到施氮量为 180 kg/hm<sup>2</sup>以后趋于稳定。平水年氮素收获指数随着施氮量的增加(施氮量大于 30 kg/hm<sup>2</sup>)呈现出先增加后减小的趋势, 其值在施氮量为 90~180 kg/hm<sup>2</sup>时处于高值水平。当施氮量大于 30 kg/hm<sup>2</sup>时, 干旱年氮素收获指数随着施氮量的增加也呈现出先增加后减小的趋势, 在施氮量为 60~150 kg/hm<sup>2</sup>氮素收获指数处于高值水平。考虑到黄土高原旱区降水的年际变化和氮肥资源的有效利用, 笔者认为 120~150 kg/hm<sup>2</sup>的底肥施氮量基本可以满足不同降雨年型下冬小麦稳产高产的需要。

## 2.3 冬小麦生长对追肥时期和追氮量的响应

为节省劳动成本, 充分发挥氮肥的利用效率, 根据当地传统施肥模式, 本试验设置了一次追施氮肥的情景, 以施氮量 90 kg/hm<sup>2</sup>底肥为基础, 研究冬小麦最佳追肥时期和最佳追氮量。在返青、拔节和抽穗时期分别追施氮肥, 冬小麦产量、WUE 和籽粒吸氮量均随着追氮量的增加而增加(图 4)。在返青和拔节时期追肥时, 冬小麦产量、WUE 和籽粒吸氮量均较大。因此冬小麦单次追肥的最佳追肥时期为返青期至拔节期。在以下研究中, 以施氮量 90 kg/hm<sup>2</sup>底肥为基础, 在返青期追施氮肥, 研究冬小麦的最佳追氮量。

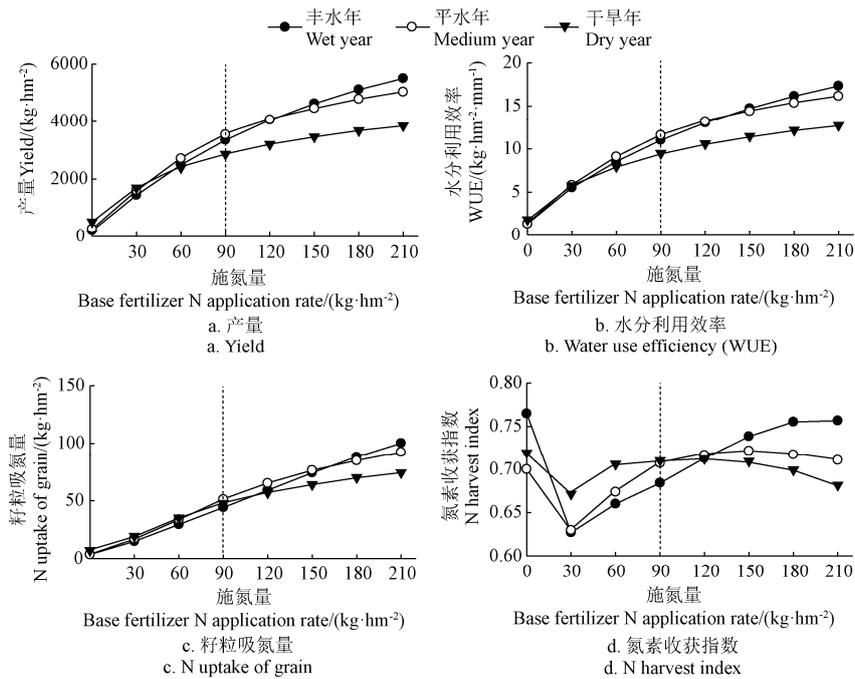


图3 不同降水年型下冬小麦产量、水分利用效率、籽粒吸氮量和氮素收获指数对底肥施氮量的响应 (1956-2012年的平均值)

Fig.3 Response of winter wheat yield, WUE, N uptake of grain and N harvest index in different rainfall years to base fertilizer N application rate (mean value of 56 years from 1956 to 2012)

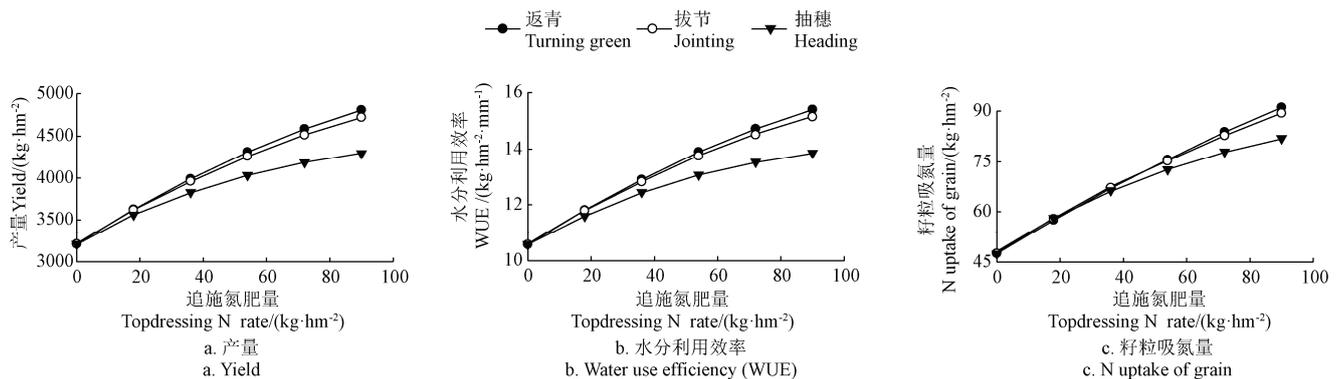


图4 冬小麦产量、水分利用效率和籽粒吸氮量对不同生育期追氮量的响应 (1956-2012年的平均值)

Fig.4 Response of wheat yield, WUE and N uptake of grain to topdressing N rate in different growing stages (mean value of 56 years from 1956 to 2012)

随着冬小麦返青期追氮量的增加,不同降水年型下的冬小麦的产量、WUE和籽粒吸氮量均不断增加(图5a、5b和5c);当追氮量小于 $27\text{ kg/hm}^2$ 时,平水年的冬小麦产量和WUE最大,丰水年的值次之,枯水年的值最小;当追氮量大于 $27\text{ kg/hm}^2$ 时,丰水年的冬小麦的产量和WUE最大,其次是平水年,枯水年的值最小(图5a和5b)。冬小麦的产量和WUE的增加可以以追施氮量 $36\text{ kg/hm}^2$ 为界划分为两个阶段,当追氮量小于 $36\text{ kg/hm}^2$ 时,冬小麦的产量和WUE呈现出快速增加的趋势,当追氮量大于 $36\text{ kg/hm}^2$ 时,冬小麦的产量和WUE的增速变慢,在平水年和干旱年尤为明显(图5a和5b)。

当追氮量不大于 $18\text{ kg/hm}^2$ 时,平水年的冬小麦籽粒吸氮量最大,其次是枯水年,丰水年的值最小;当追氮量为 $18\sim 54\text{ kg/hm}^2$ 时,平水年的冬小麦籽粒吸氮量最大,丰水年的值次之,枯水年的值最小;当追氮量大于

$54\text{ kg/hm}^2$ 时,丰水年的冬小麦籽粒吸氮量最大,平水年次之,枯水年的值最小(图5c)。

丰水年的氮素收获指数随着追氮量的增加而增加,在追氮量增加到 $72\text{ kg/hm}^2$ 后,氮素收获指数逐渐趋于稳定水平(图5d)。平水年和干旱年的氮素收获指数随着追肥施氮量的增加,呈现出先增加后减小的变化趋势。平水年的氮素收获指数在追氮量为 $36\text{ kg/hm}^2$ 时达到最高峰值;当追氮量小于 $18\text{ kg/hm}^2$ 时,干旱年的氮素收获指数维持在0.71附近,当追氮量大于 $18\text{ kg/hm}^2$ 时,氮素收获指数迅速减小(图5d)。因此,笔者认为在底肥施氮量 $90\text{ kg/hm}^2$ 的基础上,丰水年 $54\sim 72\text{ kg/hm}^2$ 的追氮量,平水年 $36\sim 54\text{ kg/hm}^2$ 的追氮量,干旱年 $18\sim 36\text{ kg/hm}^2$ 的追氮量,不仅可以基本满足冬小麦在不同降水年型下稳产高产的需要,还能维持较高氮素收获指数。

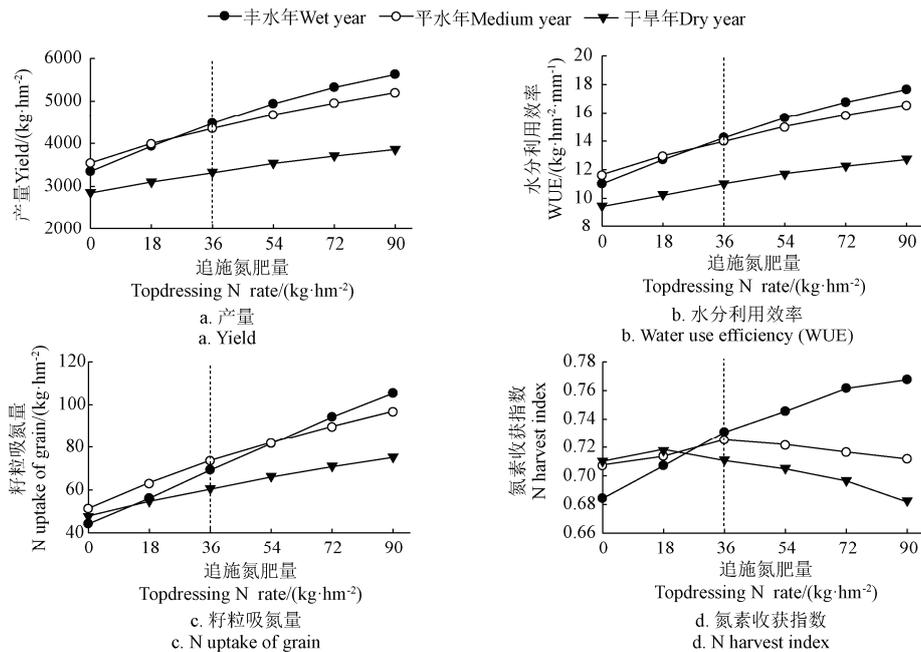


图 5 不同降水年型下冬小麦产量、水分利用效率、籽粒吸氮量和氮素收获指数对返青追氮量的响应 (1956-2012 年的平均值)  
Fig.5 Response of winter wheat yield, WUE, N uptake of grain and N harvest index to topdressing N rates in different rainfall years to turning green (mean value of 56 years from 1956 to 2012)

### 3 讨论

#### 3.1 RZWQM2 在黄土高原的适用性

本研究应用 RZWQM2 对黄土高原旱区连续多年“冬小麦-春玉米”轮作试验和氮肥施肥试验进行了模拟研究。冬小麦-春玉米轮作试验 (2004-2011 年) 中冬小麦实测平均产量分别为 5 925 (2004-2005 年)、5 260 (2005-2006 年)、5 100 (2007-2008 年)、5 281 (2008-2009 年) 和 3 325 kg/hm<sup>2</sup> (2010-2011 年), 两年的冬小麦氮肥试验 (2010-2012 年) 中, 冬小麦实测平均产量为 4 470 (2010-2011 年) 和 6 647 kg/hm<sup>2</sup> (2011-2012 年)。单施底肥时, 施氮量 120 kg/hm<sup>2</sup> 的模拟产量 (1956-2012 年) 分布在 940~7 165 kg/hm<sup>2</sup>, 两个试验的产量均在此模拟产量范围内, 因此, 笔者认为 RZWQM2 的产量模拟值符合实际情况。经过率定和验证, 该模型在不同降雨年型下均较好地模拟了作物的产量、作物的生长动态和土壤的水分动态变化; 并且在不同施肥方式下, RZWQM2 对冬小麦的产量和氮素指标也表现出了较好的模拟效果。因此, RZWQM2 可较好地应用于黄土高原旱作农业区冬小麦-春玉米轮作系统的模拟研究。

#### 3.2 冬小麦适宜的施氮方式

合理的施氮方式和施氮量不仅对作物高产具有重要作用, 而且可以控制和减少氮素损失及污染, 充分利用养分资源, 优化并节省化肥。冬小麦氮素积累量在苗期约占最大累积量的 15%~30%, 表明在苗期冬小麦植株体内需要积累一定的氮量, 也证明了冬小麦施用底肥的必要性<sup>[23]</sup>。但是如果只施底肥, 多达 84%~86.5% 的底肥氮未被作物吸收利用<sup>[24]</sup>。以施底肥为基础, 在关键生育期

追施氮肥, 这样不仅可以增加冬小麦的产量, 而且能显著提高氮肥偏生产力和氮肥生理利用率<sup>[19]</sup>。在本研究中, 不同降水年型下 90 kg/hm<sup>2</sup> 的底肥+18 kg/hm<sup>2</sup> 的追肥 (均以 N 计) 这种施氮模式的产量与单施 120 kg/hm<sup>2</sup> 底肥的产量持平; 底肥 90 kg/hm<sup>2</sup>+追肥 54 kg/hm<sup>2</sup> 施氮方式下的产量, 在不同降水年型下均显著大于单施底肥 150 kg/hm<sup>2</sup> 时的产量, 这表明“底肥+返青追施氮肥”的施肥方式与单施底肥相比, 可以提高肥效, 增加小麦产量, 更适合黄土高原旱区冬小麦的生长。

前人研究表明, 冬小麦的施氮关键期为越冬期和拔节期<sup>[25]</sup>, 而在小麦的孕穗期、开花期和开花后的生育期追肥对产量影响很小<sup>[26]</sup>; 本研究也同样表明在返青-灌浆这一阶段的前期追施氮肥比后期追施氮肥增产效果更好。原因可能为返青后冬小麦迅速生长, 大量吸收氮素, 在返青-灌浆这一阶段的前期追施氮肥有利于满足小麦吸氮高峰的吸氮量, 为小麦后期生长打下基础, 更有助于冬小麦产量的提高。已有研究表明冬小麦氮素积累量主要集中在返青后至灌浆阶段, 约占最大累积量的 50%~60%<sup>[23]</sup>, 因此保证这一阶段冬小麦的氮素供应尤为重要。

#### 3.3 冬小麦适宜的施氮量

施肥过量是中国肥料利用效率低的最主要原因<sup>[27]</sup>。在黄土高原旱区, 长期以来冬小麦都是过量施肥, 严重降低了肥料利用效率<sup>[28]</sup>。过量施肥的后果, 除了出现报酬递减之外, 还潜藏着污染环境的巨大隐患。因此, 既最大限度地保持农业的高产稳产, 又最有效地提高肥料的利用率, 减少化肥的流失, 避免生态环境的破坏和恶化, 是目前氮肥管理的主要目标。

单施底肥时, 在丰水年、平水年和干旱年分别施加

150~180、120~150和60~90 kg/hm<sup>2</sup>的氮肥,这与Guo等<sup>[21]</sup>研究结论基本一致;这种施氮水平不仅可以基本满足冬小麦高产的需要,还能使氮素收获指数维持在较高水平。总体上,120~150 kg/hm<sup>2</sup>的底施氮肥可以满足不同降雨年型冬小麦稳产高产需要,这也验证了Fan等<sup>[29]</sup>的研究结论。与在农民习惯施氮肥162 kg/hm<sup>2</sup><sup>[19,28]</sup>相比,减少12~40 kg/hm<sup>2</sup>的施氮量可以提高肥料利用效率。

在90 kg/hm<sup>2</sup>底施氮肥的基础上,在丰水年54~72 kg/hm<sup>2</sup>的追氮量,在平水年36~54 kg/hm<sup>2</sup>的追氮量,在干旱年18~36 kg/hm<sup>2</sup>的追氮量,可以同时满足冬小麦高产增产和肥料高效利用的要求。本研究中推荐施氮量随着降雨年型降水量的递减而递减,这与Guo等<sup>[21]</sup>和Rasmussen和Rohde<sup>[30]</sup>研究结果相似;与传统施肥(底肥112 kg/hm<sup>2</sup>的氮肥+返青追施50 kg/hm<sup>2</sup>的氮肥)<sup>[19,28]</sup>相比,施氮量可以在丰水年减少0~18 kg/hm<sup>2</sup>,在平水年减少18~36 kg/hm<sup>2</sup>,在干旱年减少36~54 kg/hm<sup>2</sup>,这对当地农民在实际农业生产中合理施用氮肥具有一定的指导意义。

#### 3.4 冬小麦生育期内降水-氮肥耦合关系

水肥存在显著耦合效应,只有在适宜的土壤水分与养分条件下才能获得较高的产量<sup>[31]</sup>。在本研究中,当底肥施氮量小于90 kg/hm<sup>2</sup>时,冬小麦的产量和WUE在不同降雨年型下随着施氮量增加迅速增加;而当施氮量超过90 kg/hm<sup>2</sup>时,冬小麦产量和WUE在丰水年持续增加,而其在干旱年和平水年的增速明显趋于缓慢。在施加底肥基础上,冬小麦的产量和WUE随着追氮量的增加也表现出类似的变化:在追氮量小于36 kg/hm<sup>2</sup>时,不同降雨年型下冬小麦的产量和WUE随着追氮量增加迅速增加;在追氮量超过36 kg/hm<sup>2</sup>后,平水年和干旱年的小麦产量和WUE的增加逐渐趋于缓慢。

在黄土高原旱作农业区,只有合理的水肥配合,才能以水促肥,以肥调水,达到水分和养分的高效利用<sup>[25]</sup>。以上结果表明在干旱条件下,增施氮肥只有有限的增产效应;在雨养条件下增施氮肥的增产效应随着小麦生育期内降水的减少而减小<sup>[30]</sup>。这是因为对于一定量的氮肥,必须有与之相适应的水分条件才能促进养分的溶解、迁移和吸收运输,充分发挥氮素的增产作用<sup>[25]</sup>。

氮肥和降水有相互促进的作用,降水的增加可以增加化肥的肥效,适量的增加氮肥可以增加降水的利用效率<sup>[5]</sup>。但是在降水较少的条件下,施氮量的增加并不能持续地引起冬小麦产量增加,有可能导致氮肥利用率的迅速下降,甚至还会引起籽粒产量的降低,这表明在一定条件下施氮量与籽粒产量可能具有负效应<sup>[30]</sup>。因此只有在合适的土壤水分条件下,增施氮肥的增产作用才能充分显现。

冬小麦的施氮量随着生育期内降水量的增加而增加,虽然可以增加产量,但也增加了氮素淋洗流失的风险<sup>[4]</sup>。在黄土高原旱区土壤水分是作物生长的主要限制因子之一。高量的氮肥带来高产的同时,也显著增加了土壤水分的消耗<sup>[32]</sup>。在这种背景下,有机无机肥料的施肥可以

改善土壤的保水保肥作用<sup>[29]</sup>;此外结合耕作措施<sup>[33-34]</sup>、作物轮作<sup>[35]</sup>和覆盖措施<sup>[36-37]</sup>等,增加土壤的蓄水保墒作用,才能有效保证本地区农业的持续发展。本研究主要探讨了不同降雨年型下小麦生长对底肥施氮量、追肥时间和追氮量的响应,对于氮肥与有机肥料配施,氮肥在不同耕作和农艺措施下对小麦生长的影响有待进一步研究。

## 4 结论

本研究利用连续多年冬小麦-春玉米轮作试验和两年冬小麦施肥试验验证了RZWQM2在黄土高原旱区的适用性;并利用根区水质模型(root zone water quality model-version 2, RZWQM2)模拟研究了不同底肥施氮量、不同追肥时间和不同追氮量对冬小麦产量、水分利用效率(water use efficiency, WUE)和氮素利用效率的影响,得到如下结论:

1) RZWQM2在黄土高原旱区不同降雨年型下,均可以较好地模拟作物的产量指标、土壤水分和作物生长动态变化,并且可以模拟不同施肥方式下冬小麦的产量指标和作物对氮素的吸收。因此,RZWQM2可较好地应用于黄土高原旱作农业区冬小麦-春玉米轮作系统的模拟研究。

2)“底肥+返青追施氮肥”的施氮模式比单施底肥的模式更适合黄土高原旱区冬小麦的生产。在90 kg/hm<sup>2</sup>底施氮肥的基础上,丰水年54~72 kg/hm<sup>2</sup>的追氮量,平水年36~54 kg/hm<sup>2</sup>的追氮量,干旱年18~36 kg/hm<sup>2</sup>的追氮量,不仅可以基本满足冬小麦在不同降雨年型下稳产高产的需要,还能使氮素收获指数维持较高水平,是兼顾小麦产量、效益和生态安全的较优氮肥管理模式。本研究的结论基于模型模拟的结果,接下来将在田间进行进一步的验证。

### [参 考 文 献]

- [1] 蔡艳,郝明德.黄土高原长期施肥对小麦籽粒蛋白质营养品质的影响[J].核农学报,2013,27(9):1378-1384.  
Cai Yan, Hao Mingde. Effect of long-term fertilization on the nutritional quality of wheat protein in dryland of Loess Plateau[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2013, 27(9): 1378-1384. (in Chinese with English abstract)
- [2] 石玉,于振文,李延奇,等.施氮量和底追肥比例对冬小麦产量及肥料氮去向的影响[J].中国农业科学,2007,40(1):54-62.  
Shi Yu, Yu Zhenwen, Li Yanqi, et al. Effects of nitrogen fertilizer rate and ratio of base and topdressing on winter wheat yield and fate of fertilizer nitrogen[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(1): 54-62. (in Chinese with English abstract)
- [3] 袁京,李国学,李荣花,等.小麦/玉米轮作体系中不同施肥方法下的养分淋溶排污系数测算[J].农业环境科学学报,2015,34(4):738-744.  
Yuan Jing, Li Guoxue, Li Ronghua, et al. Calculating discharge coefficients for soil nutrients in wheat-maize rotation system under different fertilization practices[J].

- Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(4): 738—744. (in Chinese with English abstract)
- [4] 陈磊, 郝明德, 李占斌. 黄土高原旱地长期施肥对土壤硝态氮淋失的影响[J]. 水土保持研究, 2014, 21(2): 43—46. Chen Lei, Hao Mingde, Li Zhanbin. Effect of long-term application of fertilizers on nitrate accumulation in the Loess Plateau dryland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(2): 43—46. (in Chinese with English abstract)
- [5] 苗果园, 尹钧, 高志强, 等. 旱地小麦降水年型与氮素供应对产量的互作效应与土壤水分动态的研究[J]. 作物学报, 1997, 23(3): 263—270. Miao Guoyuan, Yin Jun, Gao Zhiqiang, et al. Study on the combined effects of simulated rainfalls and nitrogen treatments on the yield and soil moisture dynamic change of rain-fed winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 1997, 23(3): 263—270. (in Chinese with English abstract)
- [6] 金轲, 汪德水, 蔡典雄, 等. 水肥耦合效应研究 I. 不同降雨年型对 N、P、水配合效应的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(1): 1—7. Jin Ke, Wang Deshui, Cai Dianxiong, et al. Response and interaction for water and fertilizer I. Interaction of N, P and water in the year of different precipitations[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1999, 5(1): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [7] 金轲, 汪德水, 蔡典雄, 等. 水肥耦合效应研究 II. 不同 N、P、水配合对旱地冬小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(1): 8—13. Jin Ke, Wang Deshui, Cai Dianxiong, et al. Response and interaction for water and fertilizer II. The effect of different compositions of N, P and water on the yield of winter wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1999, 5(1): 8—13. (in Chinese with English abstract)
- [8] 武天云, 王生录, 邓娟珍, 等. 陇东旱塬地区冬小麦水肥效应耦合模拟研究[J]. 西北农业学报, 1995, 4(2): 69—72. Wu Tianyun, Wang Shenglu, Deng Juanzhen, et al. Simulation of effects of nitrogen applying on different rainfall on dryland winter wheat in Longdong[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 1995, 4(2): 69—72. (in Chinese with English abstract)
- [9] 汪玉磊, 杨劲松, 杨晓英. 水肥耦合对冬小麦产量、品质和氮素利用的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(6): 31—33. Wang Yulei, Yang Jinsong, Yang Xiaoying. Effects of the coupling of water-fertilizer on winter wheat grain yield and its quality and apparent N uses[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(6): 31—33. (in Chinese with English abstract)
- [10] Ahuja L R, Rojas K W, Hanson J D, et al. Root Zone Water Quality Model[M]. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications, LLC, 2000.
- [11] Fang Q, Ma L, Flerchinger G, et al. Modeling evapotranspiration and energy balance in a wheat-maize cropping system using the revised RZ-SHAW model[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 194: 218—229.
- [12] Howden S M, Soussana J F, Tubiello F N, et al. Adapting agriculture to climate change [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2007, 104: 19691—19696.
- [13] Ma L, Trout T J, Ahuja L R, et al. Calibrating RZWQM2 model for maize responses to deficit irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2012, 103: 140—149.
- [14] 房全孝, 王建林, 于舜章. 华北平原小麦-玉米两熟制节水潜力与灌溉对策[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 37—44. Fang Quanyao, Wang Jianlin, Yu Shunzhang. Water-saving potential and irrigation strategies for wheat-maize double cropping system in the North China Plain [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(7): 37—44. (in Chinese with English abstract)
- [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 with English abstract)
- [16] 薛长亮, 张克强, 张国印, 等. 应用 RZWQM 模型模拟华北玉米土壤剖面水氮迁移及淋溶特征[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2179—2186. Xue Changliang, Zhang Keqiang, Zhang Guoyin, et al. Simulating migration and leaching of water and nitrogen in maize soil profile in North China Plain with RZWQM model[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(11): 2179—2186. (in Chinese with English abstract)
- [17] 刘海涛, 胡克林, 李保国, 等. 土壤剖面基础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 with English abstract)
- [18] 孙美, 张晓琳, 冯绍元, 等. 基于 PEST 软件 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 with English abstract)
- [19] 李强, 王朝辉, 李富翠, 等. 氮肥管理与地膜覆盖对旱地冬小麦产量和氮素利用效率的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(1): 93—100. Li Qiang, Wang Zhaohui, Li Fucui, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on yield and nitrogen use efficiency in winter wheat growing on dryland with plastic film mulching[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(1): 93—100. (in Chinese with English abstract)
- [20] Doherty J. PEST: Model Independent Parameter Estimation[M]. Brisbane, Australia: Watermark Numerical Computing, 2010.

- [21] Guo S, Zhu H, Dang T, et al. Winter wheat grain yield associated with precipitation distribution under long-term nitrogen fertilization in the semiarid Loess Plateau in China[J]. *Geoderma*, 2012(189/190): 442—450.
- [22] 姚宁, 周元刚, 宋利兵, 等. 不同水分胁迫条件下 DSSAT-CERES-Wheat 模型的调参与验证[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(12): 138—150.  
Yao Ning, Zhou Yuangang, Song Libing, et al. Parameter estimation and verification of DSSAT-CERES-Wheat model for simulation of growth and development of winter wheat under water stresses at different growth stages[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(12): 138—150. (in Chinese with English abstract)
- [23] 陈祥, 同延安, 亢欢虎, 等. 氮肥后移对冬小麦产量、氮肥利用率及氮素吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(3): 450—455.  
Chen Xiang, Tong Yanan, Kang Huanhu, et al. Effect of postponing N application on the recovery and N absorption of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(3): 450—455. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刘学军, 赵紫娟, 巨晓棠, 等. 基施氮肥对冬小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响[J]. *生态学报*, 2002, 22(7): 1122—1128.  
Liu Xuejun, Zhao Zijuan, Ju Xiaotang, et al. Effect of N application as basal fertilizer on grain yield of winter wheat, fertilizer N recovery and N balance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(7): 1122—1128. (in Chinese with English abstract)
- [25] 翟丙年, 李生秀. 冬小麦产量的水肥耦合模型[J]. *中国工程科学*, 2002, 4(9): 69—74.  
Zhai Bingnian, Li Shengxiu. The model of water and nitrogen coupling in winter wheat yield[J]. *Engineering Science*, 2002, 4(9): 69—74. (in Chinese with English abstract)
- [26] Strong W M. Effect of late application of nitrogen on the yield and protein content of wheat[J]. *Animal Production Science*, 1982, 22(115): 54—61.
- [27] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915—924.  
Zhang Fusuo, Wang Jiping, Zhang Weifeng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measured for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915—924. (in Chinese with English abstract)
- [28] 薛澄, 王朝辉, 李富翠, 等. 渭北旱塬不同施肥与覆盖栽培对冬小麦产量形成及土壤水分利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(21): 4395—4405.  
Xue Cheng, Wang Zhaohui, Li Fucui, et al. Effects of different fertilization and mulching cultivation methods on yield and soil water use of winter wheat on Weibei dryland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(21): 4395—4405. (in Chinese with English abstract)
- [29] Fan T, Stewart B A, Yong W, et al. Long-term fertilization effects on grain yield, water-use efficiency and soil fertility in the dryland of Loess Plateau in China[J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2005, 106(4): 313—329.
- [30] Rasmussen P E, Rohde C R. Tillage, soil depth, and precipitation effects on wheat response to nitrogen[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(1): 121—124.
- [31] 张凤翔, 周明耀, 徐华平, 等. 水肥耦合对冬小麦生长和产量的影响[J]. *水利与建筑工程学报*, 2005, 3(2): 22—24.  
Zhang Fengxiang, Zhou Mingyao, Xu Huaping, et al. Effects of water and fertilizer coupling on growing and yield of winter wheat[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2005, 3(2): 22—24. (in Chinese with English abstract)
- [32] Huang M, Dang T, Gallichand J, et al. Effect of increased fertilizer applications to wheat crop on soil-water depletion in the Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 58(3): 267—278.
- [33] 柏炜霞, 李军, 王玉玲, 等. 渭北旱塬小麦玉米轮作区不同耕作方式对土壤水分和作物产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(5): 880—894.  
Bai Weixia, Li Jun, Wang Yuling, et al. 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*, 2014, 47(5): 880—894. (in Chinese with English abstract)
- [34] 李荣, 侯贤清. 深松条件下不同地表覆盖对马铃薯产量及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(20): 115—123.  
Li Rong, Hou Xianqing. Effects of different ground surface mulch under subsoiling on potato yield and water use efficiency[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(20): 115—123. (in Chinese with English abstract)
- [35] 孙剑, 李军, 王美艳, 等. 黄土高原半干旱偏旱区苜蓿-粮食轮作土壤水分恢复效应[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(6): 33—39.  
Sun Jian, Li Jun, Wang Meiyan, et al. Effects of alfalfa-grain rotation on soil moisture restoration in semi-arid and drought-inclined areas of the Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(6): 33—39. (in Chinese with English abstract)
- [36] 张树兰, Lars L, 同延安, 等. 渭北旱塬不同田间管理措施下冬小麦产量及水分利用效率[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(4): 20—24.  
Zhang Shulan, Lars L, Tong Yanan, et al. Effects of different field management practices on winter wheat yield and water utilization efficiency in Weibei Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2005, 21(4): 20—24. (in Chinese with English abstract)
- [37] 余坤, 冯浩, 赵英, 等. 氮化秸秆还田加快秸秆分解提高冬小麦产量和水分利用效率[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(19): 103—111.  
Yu Kun, Feng Hao, Zhao Ying, et al. Ammoniated straw incorporation promoting straw decomposition and improving winter wheat yield and water use efficiency[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(19): 103—111. (in Chinese with English abstract)

## Suitability analysis of nitrogen fertilizer management on dryland of Loess Plateau based on root zone water quality model

Ding Dianyuan<sup>1,2</sup>, Zhao Ying<sup>2,4</sup>, Sun Benhua<sup>2,4</sup>, He Jianqiang<sup>1,2</sup>, Feng Hao<sup>1,2,3\*</sup>

(1. College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

3. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;

4. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Luxurious and improper application of nitrogen (N) is an obvious problem on the Loess Plateau. Employing a crop model to explore an optimal N fertilizer management for local farmers is an effective research method. In the present study, we firstly selected a continuous eight-year winter wheat-spring maize experiment (from 2004 to 2011) and a two-year winter wheat N fertilizer experiment (from 2010 to 2012) to calibrate and validate root zone water quality model (version 2, RZWQM2) aiming to assess the adaptability of this model on the Loess Plateau. We set up the following 8 scenarios of N application rate of base fertilizer for winter wheat in the RZWQM2: 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 and 210 kg/hm<sup>2</sup> aiming to search for proper N application rate of the base fertilizer. Based on the proper N application rate (90 kg/hm<sup>2</sup> in this study) of base fertilizer, we also set up the following 5 scenarios of N application rate with the ratio of base to topdressing in the RZWQM2: 5:1, 5:2, 5:3, 5:4 and 5:5 in wheat turning green, jointing and heading stages, respectively. In this way, we aimed to search for the best N topdressing stage and the proper N topdressing rate for winter wheat. The calibrated and validated RZWQM2 was used to characterize the respond of winter wheat yield, water use efficiency (WUE), N uptake of grain and N harvest index to the different N application rates and timings based on the long historical meteorological data (from 1956 to 2012). The results demonstrated the capability of the RZWQM2 to efficiently simulate crop growth, water movement (100 cm depth), and final crop yield in the different rainfall year on the Loess Plateau; meanwhile, RZWQM2 effectively simulated the yield and N uptake of winter wheat under different N application method. Both of the results provided a solid basis for the application of RZWQM2 to study the N fertilizer management on the Loess Plateau. In the simulations, the wheat yield, WUE and N uptake of grain increased fast before the base N fertilizer of 90 kg/hm<sup>2</sup> and slowly afterwards. The N harvest index in the wet year increased with the N application rate of base fertilizer and was stable after the N application rate of 180 kg/hm<sup>2</sup>; it maintained a high level when the N application rate of base fertilizer was between 90 and 180 kg/hm<sup>2</sup> in the medium year, as well as between 60 and 150 kg/hm<sup>2</sup> in the dry year. Thus, the single base N fertilizer of 120-150 kg/hm<sup>2</sup> could adequately satisfy the need of wheat growth in the dryland of the Loess Plateau in different rainfall years. The optimal topdressing stage of N fertilizer was between turning green and jointing stage because of the high wheat yield. On the basis of base N fertilizer of 90 kg/hm<sup>2</sup>, the wheat yield, WUE and N uptake of grain increased with the topdressing amount in the turning green stage; the N harvest index in the wet year always increased with the N topdressing rate; the N harvest index peaked in the medium year on the topdressing N rate of 36 kg/hm<sup>2</sup> and in the dry year on the topdressing N rate of 18 kg/hm<sup>2</sup>. We found topdressing N rate of 54-72, 36-54, and 18-36 kg/hm<sup>2</sup> respectively in the wet, medium and dry year could satisfy the need of high wheat yield and maintain high level of N harvest index. These findings provide some useful guidance for local farmers to optimize their N fertilizer management. More field experiments need to be conducted to verify the conclusions of this study in the future.

**Keywords:** models; crops; nitrogen; RZWQM; dryland; rainfall year; winter wheat; fertilizer application method