

基于APSIM的旱地小麦籽粒蛋白质含量模型精度检验及应用

聂志刚, 李广, 王钧, 董莉霞, 逯玉兰, 雒翠萍, 马维伟

引用本文:

聂志刚, 李广, 王钧, 等. 基于APSIM的旱地小麦籽粒蛋白质含量模型精度检验及应用[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(1): 86–95.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190135>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同生育时期冬小麦籽粒蛋白质含量的高光谱遥感监测模型

Winter wheat grain protein content monitoring model driven by hyperspectral remote sensing images at different growth stages
中国生态农业学报. 2017, 25(6): 865–875 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.161066>

冬小麦籽粒品质评价及其对气象因子的响应研究

Evaluation of grain quality of winter wheat and its response to meteorological factors
中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(8): 1205–1217 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190126>

施氮及花后土壤相对含水量对黑粒小麦灌浆期氮素吸收转运及分配的影响

Effect of nitrogen fertilization and soil relative water content after anthesis on nitrogen absorption and translocation of black wheat
中国生态农业学报. 2016, 24(7): 864–873 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151363>

密度对沿淮晚播小麦产量形成及品质性状的影响

Effect of planting density on yield and quality of later-sown winter wheat along Huaihe River
中国生态农业学报. 2018, 26(9): 1366–1377 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180374>

不同施氮量及种植密度对小麦开花期氮素积累转运的影响

Effects of different nitrogen application amounts and seedling densities on nitrogen accumulation and transport in winter wheat at anthesis stage
中国生态农业学报. 2016(2): 131–141 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150904>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190135

聂志刚, 李广, 王钧, 董莉霞, 逯玉兰, 雒翠萍, 马维伟. 基于 APSIM 的旱地小麦籽粒蛋白质含量模型精度检验及应用[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(1): 86-95

NIE Z G, LI G, WANG J, DONG L X, LU Y L, LUO C P, MA W W. Simulation model of the grain protein content of dryland wheat based on APSIM[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(1): 86-95

基于 APSIM 的旱地小麦籽粒蛋白质 含量模型精度检验及应用*

聂志刚^{1,2}, 李广^{3**}, 王钧², 董莉霞², 逯玉兰², 雒翠萍², 马维伟³

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学信息科学技术学院 兰州 730070;
3. 甘肃农业大学林学院 兰州 730070)

摘要: 籽粒蛋白质积累过程的准确模拟对黄土丘陵区旱地小麦优质生产的有效调控有重要意义。利用甘肃省定西市安定区凤翔镇安家沟村 2016—2017 年大田试验数据及定西市安定区 1971—2017 年气象资料, 建立基于 APSIM(agricultural production systems simulator)的旱地小麦籽粒蛋白质含量模型, 采用相关性分析方法检验, 并定量分析了耕作方式(传统耕作、传统耕作+秸秆覆盖、免耕及免耕+秸秆覆盖)和播期(正常播期、早播、晚播)对小麦籽粒蛋白质含量的影响。结果表明: 3 个播期处理和 4 种耕作方式下, 产量和籽粒蛋白质含量模拟值和观测值之间的均方根误差(RMSE)分别为 66.4~121.9 kg·hm⁻² 和 0.2%~1.1%; 归一化均方根误差(NRMSE)分别为 1.23%~9.66%和 1.31%~9.94%, 模型模拟精度较高。播期对旱地小麦籽粒蛋白质含量的影响显著, 正常播期的蛋白质含量最高, 晚播明显降低了蛋白质含量。4 种耕作方式的小麦产量与籽粒蛋白质含量均呈开口向下的二次曲线关系, 随着蛋白质含量的升高, 产量呈先增加后减少的态势, 经过秸秆覆盖的耕作方式(传统耕作+秸秆覆盖和免耕+秸秆覆盖)比不覆盖的耕作方式(传统耕作和免耕)更利于小麦籽粒蛋白质含量的提高。

关键词: 小麦; 籽粒蛋白质含量; 耕作方式; 播期; APSIM; 精度检验

中图分类号: S24

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Simulation model of the grain protein content of dryland wheat based on APSIM*

NIE Zhigang^{1,2}, LI Guang^{3**}, WANG Jun², DONG Lixia², LU Yulan², LUO Cuiping², MA Weiwei³

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. College of Information Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

* 国家自然科学基金项目(31660348, 31560378, 31560343)、甘肃农业大学科技创新基金——学科建设专项基金项目(GAU-XKJS-2018-254)、甘肃农业大学青年导师基金项目(GAU-QNDS-201701)、甘肃省重点研发计划项目(18YF1NA070)、甘肃省高等学校协同创新团队项目(2018C-16)和甘肃省财政专项(GSCZZ-20160909)资助

** 通信作者: 李广, 主要从事农业生态方面的研究。E-mail: lig@gsau.edu.cn

聂志刚, 主要从事作物生长模拟模型方面的研究。E-mail: niezg@gsau.edu.cn

收稿日期: 2019-02-23 接受日期: 2019-06-20

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31660348, 31560378, 31560343), the Science and Technology Innovation Foundation of Gansu Agricultural University (GAU-XKJS-2018-254), the Youth Tutor Foundation of Gansu Agricultural University (GAU-QNDS-201701), the Key Research and Development Program of Gansu Province (18YF1NA070), the University Collaborative Innovation Team Project of Gansu Province (2018C-16) and the Financial Special Project of Gansu Province (GSCZZ-20160909).

** Corresponding author, E-mail: lig@gsau.edu.cn

Received Feb. 23, 2019; accepted Jun. 20, 2019

Abstract: Accurate simulation of grain protein accumulation is of considerable importance for the effective regulation of high-quality wheat production on drylands in hilly loess regions. Using field experimental data of Anjiagou Village, Fengxiang Town, Anding District, and Dingxi City from 2016 to 2017 and meteorological data of Anding District and Dingxi City from 1971 to 2017, a dryland wheat grain protein content model was established using the Agricultural Production Systems Simulator (APSIM) and tested using correlation analysis. Quantitative analysis was conducted on the effect of different tillage methods and sowing dates on wheat grain protein content. Four tillage methods were used: conventional tillage (T), conventional tillage with straw cover (TS), no tillage (NT), and no tillage with straw cover (NTS). Further, three sowing dates were set: early sowing date (ESW), normal sowing date (NSW), and late sowing date (LSW). The findings revealed that under the tested tillage methods and sowing dates, the root mean square errors between the simulated and measured yield and grain protein content were 66.4–121.9 kg·hm⁻² and 0.2%–1.1%, respectively, and the normalized root mean square errors were 1.23%–9.66% and 1.31%–9.94%, respectively. These results indicate a satisfactory precision. Sowing date had a significant effect on the wheat grain protein content for drylands. The highest grain protein content was found with NSW, but the content decreased significantly with LSW. The relationship between wheat yield and grain protein content for the four tillage methods showed a quadratic curve in an open downward direction. As the grain protein content increased, the yield first increased and then decreased. TS and NTS (straw cover) were more conducive to the increase in the wheat grain protein content than T and NT (no straw cover).

Keywords: Wheat; Grain protein content; Tillage method; Sowing date; APSIM (agricultural production systems simulator); Accuracy test

籽粒蛋白质含量是衡量小麦(*Triticum aestivum*)品质的重要指标之一^[1], 开展小麦籽粒蛋白质积累与分配研究, 对产量形成过程中品质的把控和有效的田间管理具有十分重要的意义。近年来, 随着信息技术的快速发展, 作物模型作为一种系统分析方法, 已成为农业生产定量分析的重要手段之一^[2-3]。Ritchie等^[4]建立的CERES-Wheat模型假定小麦籽粒蛋白质潜在积累是温度和热时间的函数; Jeuffroy等^[5]建立的Azodyn模型认为冬小麦籽粒蛋白质含量与环境因素和栽培管理呈时变非线性关系, 并且Mansouri等^[6]利用改进的粒子滤波方法对该模型参数进行了优化; 潘洁等^[7]在南京地区开展小麦气候生态试验, 建立了冬小麦籽粒蛋白质含量预测模型, 确定了显著影响蛋白质含量的5个气象因素为开花至成熟期的日平均温度、平均日较差、总日照时数、总降雨量与积温; 李振海等^[8]从籽粒蛋白质积累的氮素运转规律出发, 利用高光谱田间地面数据和偏最小二乘法对植株氮含量进行估算, 构建了基于氮素运转原理的北京市冬小麦籽粒蛋白质含量预测模型; 屈莎等^[9]基于开花期“植被指数—氮素营养指标—籽粒蛋白质含量”模式, 以氮素营养指标为中间变量建立华北地区冬小麦籽粒蛋白质含量遥感模型。国内外学者通过经验方程、机理描述和遥感监测, 因地制宜构建了小麦籽粒蛋白质含量模型, 为当地农作物生产中品质的把控提供了信息化的工具。然而, 现有模型多关注于气候环境和氮素积累对小麦籽粒蛋白质含量的影响, 对干物质和氮素同时积累, 以及营养器官向籽粒再迁移过程的研究相对较少。

因此, 系统地描述干物质和氮素的积累、分配及再迁移有利于小麦籽粒蛋白质积累过程模拟精度的改进和模型解释性的增强。本文以干物质和氮素的积累与分配作为籽粒蛋白质的主要来源, 兼顾考虑其从营养器官向籽粒再迁移的过程, 利用甘肃省定西市安定区凤翔镇安家沟村2016—2017年大田试验数据, 建立基于APSIM (agricultural production systems simulator)的旱地小麦籽粒蛋白质含量模型, 进行初步模拟应用, 旨在为旱地小麦生产的提质增效提供一种精度较高的信息化调控工具。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大田试验于2016—2017年, 在黄土丘陵典型区域甘肃省定西市安定区凤翔镇安家沟村进行。该地区海拔2 000 m, 气候属中温带半干旱区; 昼夜温差大, 太阳辐射充足; 多年平均降雨量为385.0 mm, 降水量季节分配不均, 主要集中在7—9月份。

1.2 试验设计

试验共设4种耕作方式(表1)^[10], 3个播期处理, 3次重复, 共36个小区, 试验小区面积6 m×4 m, 边行列0.5 m为保护, 完全随机区组设置。供试作物为‘甘春32号’春小麦, 播种量187.5 kg·hm⁻², 免耕播种机播种, 播深7 cm, 行距0.25 m。施肥及田间管理同当地。以当地适宜播期每年3月19日为正常播期(NSW); 早播(ESW)提前12 d, 3月6日播种; 晚播(LSW)推后12 d, 3月30日播种。7月下旬收获。采用长宽系数法^[11]测算取平均值叶面积指数; 开花期茎干重采用烘干

表 1 耕作方式描述
Table 1 Tillage treatment description

代码 Code	耕作方式 Tillage treatment	描述 Description
T	传统耕作 Conventional tillage	三耕两耨。收获脱粒后, 马上进行第 1 次耕作, 将留茬翻埋入田, 8 月底第 2 次耕作, 9 月第 3 次耕作后耨第 1 次, 10 月份冻结前耨第 2 次 The field is ploughed 3 times and harrowed twice after harvesting. The first plough is immediately taken after harvesting, and the stubble of previous crop is incorporated into soil. The second and third ploughs are respectively in late August and September. The field is harrowed after the third plough and re-harrowed in October before the ground is frozen.
TS	传统耕作+秸秆覆盖 Conventional tillage with straw cover	耕作方式同 T, 10 月份耨第 2 次后收获所得全部前作秸秆覆盖原小区 The field is ploughed and harrowed as the treatment T. The ground is covered with all the straw from the previous crop after the second harrow in October.
NT	免耕 No tillage	收获后, 全年不耕作, 田间管理同当地, 翌年一次性完成播种与施肥 After harvesting, no plough, no harrow and no cover with straw, and other field management is similar to local management practice. Sowing and fertilization is accomplished at one time.
NTS	免耕+秸秆覆盖 No tillage with straw cover	耕作方式同 NT, 收获所得全部前作秸秆覆盖原小区 Tillage is as the treatment NT. The ground is covered with all the straw from the previous crop after harvesting.

称重法取平均值测定; 开花后每隔 7 d, 采用半微量凯氏定氮法^[12], 测定植株茎和叶片氮素含量; 收获时取样 20 株进行考种, 以各小区打碾产量折算公顷产量; 籽粒蛋白质含量采用半微量凯氏定氮法^[12]测定。

1.3 APSIM 平台简介

APSIM 是由澳大利亚农业生产系统研究组 (APSRU) 研制的农业生产系统模拟平台。国内外利用 APSIM 在作物生产区域适应性、水肥调控、气候变化效应及评价等方面取得了一定研究成果^[11,13-18]。该平台以作物属性模块 (APSIM-Wheat) 为通用作物生长模拟框架, 基于研究区土壤参数库, 以气象数据为驱动, 可实现作物生长发育过程的动态模拟。

1.4 气象及土壤数据

甘肃省气象局提供定西市安定区多年 (1971—2017 年) 基础气象历史资料。APSIM 平台运行驱动变量为逐日气象数据, 包括: 逐日太阳辐射量 ($M \cdot m^{-2}$)、逐日最高气温 ()、逐日最低气温 () 和逐日降水量

(mm)。逐日太阳辐射量利用李广等^[13]在黄土丘陵区 APSIM 适用性研究中所使用的日照时间转换算法获取。气象参数库命名为 Dingxi.met。基于田间测定土壤属性数据, 参考李广等^[13]在黄土丘陵区 APSIM 适用性研究中经过转换、率定的土壤属性数据, 土壤参数库命名为 Dingxi.soils。

1.5 模型参数校准

基于 APSIM V7.7 平台, 设计 APSIM-Wheat 控制文件 (Wheat.xml), 链接研究区 1971—2017 年气象参数库 (Dingxi.met) 和土壤参数库 (Dingxi.soils), 实现旱地小麦籽粒蛋白质含量的动态模拟。

基于田间实测数据, 采用穷举试错法, 参考李广等^[13]在黄土丘陵区 APSIM 适用性中的研究积累, 得到本土化作物基本属性参数库, 如表 2 所示。其中, 参考 Asseng 等^[18]的研究, 结合旱地小麦生长发育生理生态过程, 日籽粒蛋白质积累的范围限定在 $70 \sim 230 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

表 2 APSIM 中供试小麦主要属性初始参数
Table 2 Initial parameters of the properties of dryland wheat in APSIM

参数 Parameter	值 Value
从灌浆到成熟的积温 Accumulative temperature form filling to maturity ()	580
主茎叶数 Leaf number of main stem	7
分蘖质量 Weight of tiller (g)	1.22
单株质量 Weight of single plant (g)	4
株高 Stem length (cm)	100
穗下节长 Lower internode length (cm)	33
日蛋白质积累上限 Maximum of daily protein accumulation ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	230
日蛋白质积累下限 Minimum of daily protein accumulation ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	70

1.6 模型检验方法

采用均方根误差(RMSE)、归一化均方根误差(NRMSE)对模拟值与实测值的拟合度进行分析, 计算公式为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{\text{Obs}} - Y_{\text{Sim}})^2} \quad (1)$$

$$\text{NRMSE} = 100 \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{\text{Obs}} - Y_{\text{Sim}})^2}}{Y_{\text{Mean}}} \quad (2)$$

式中: Y_{Obs} 为实测值, Y_{Sim} 为模拟值, Y_{Mean} 为实测平均值。

RMSE 和 NRMSE 越小, 表明模拟值与实测值之间偏差越小, NRMSE 控制在 10% 以内表明模型的模拟有较高精度^[13]。

2 结果与分析

2.1 模型构建

定西地区小麦开花后, 籽粒进入快速生长阶段, 结束于成熟阶段。不考虑作物遗传变异对作物蛋白质积累的影响, 小麦籽粒蛋白质的积累与分配是由干物质和氮素的积累与分配而来^[19]。干物质的积累主要来源于光合作用的产物和干物质的再迁移。模型构建中主要考虑了水分亏缺、氮素和温度胁迫以及物候期发展对干物质积累的影响。氮素的积累, 假定从土壤吸收的氮全部用于供应籽粒蛋白质的形成, 当氮供应不足时, 则从茎和叶片中再迁移, 直到满足籽粒蛋白质积累对氮的需求, 模型构建中主要考虑了温度和氮胁迫对籽粒氮素积累的影响。

2.1.1 籽粒干物质积累模型

通过光合作用, 将获取的热辐射产物, 转化为小麦地上部分干物质积累的过程, 模型计算时主要考虑到日干物质积累量受水分亏缺和氮、温度胁迫因素的影响而减少以及物候期发展的影响。籽粒干物质积累模型表达如下:

$$\Delta Q = I \times \text{RUE} \times f_w \times f_s \quad (3)$$

式中: ΔQ 为小麦地上部分日干物质积累量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$); I 为可获取的日热辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$); RUE 为辐射利用率($\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$), 根据 Asseng 等^[18]的研究, 取值为 1.24; f_w 为水分亏缺系数; f_s 为胁迫因素系数。

$$I = I_0 \times (1 - e^{-k \times \text{LAI}}) \quad (4)$$

式中: 可获取的日热辐射(I)通过小麦叶面积指数和消光系数计算^[20], I_0 为日热辐射量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$), 来源于气象参数库 Dingxi.met; LAI 为叶面积指数; k 为消光系数, 根据 Monsi 等^[20]的研究, 取值为 0.5。

$$f_w = \begin{cases} 1 & (W_d \leq W_s) \\ \frac{W_s}{W_d} & (W_d > W_s) \end{cases} \quad (5)$$

$$f_s = \min(f_{T_photo}, f_{N_photo}) \quad (6)$$

式中: 水分供应充足时, 水分亏缺对干物质积累没有影响, 水分供应不足时, 水分亏缺系数(f_w)以土壤水分供应量(W_s)与作物生长水分潜在需求量(W_d)的比值表示。根据 Sinclair^[21]和 Monteith 等^[22]的研究, W_s 与 W_d 由 APSIM 水分平衡子模型计算。公式(6)中, 胁迫因素系数(f_s)取温度胁迫(f_{T_photo})和氮胁迫(f_{N_photo})中较小值。

$$f_{T_photo} = \begin{cases} 0.065 \times T_{\text{mean}} & (T_{\text{mean}} \leq 8 \text{ } ^\circ\text{C}) \\ 0.65 + [0.0787 - 0.00328 \times (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})] \times (T_{\text{max}} - 10)^{0.8} & (8 \text{ } ^\circ\text{C} < T_{\text{mean}} \leq 22 \text{ } ^\circ\text{C}) \\ 1 & (T_{\text{mean}} > 22 \text{ } ^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: T_{mean} 为日均温, T_{max} 为日最高温, T_{min} 为日最低温。借鉴 Ritchie 等^[4]针对温度胁迫对小麦籽粒蛋白质潜在积累的影响研究, 结合旱地小麦生长发育生理生态过程以及研究区气候和土壤状况, 小麦开花后, 当研究区日平均温度高于 22 时^[7,23-24], 适宜干物质积累, 低于 8^[7,23-24] 不适宜干物质积累, 介于 22 与 8 之间, 温度胁迫对干物质积累的影响效应以日最高温和最低温之差进行负增益计算^[25]。

$$f_{N_photo} = 1.5 \times \sum_{\text{leaf}} \frac{C_N - C_{N_min}}{C_{N_crit} - C_{N_min}} \quad (8)$$

式中: C_N 为叶片实际氮含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 开花后各耕作方式和播期处理下, 叶片氮浓度实测数据平均值见表 3; C_{N_min} 描述了叶片自由生长结构性氮需求^[26]下限($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_{N_crit} 为临界氮含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 反映了叶片试图保留额外氮的门槛。 C_{N_min} 和 C_{N_crit} 随物候期发展取值不同, 取值曲线封装在 APSIM 内部, 建模时依据研究区长期田间经验, 本试验中施肥量满足小麦叶片的结构性氮需求, 即 C_N 总是大于 C_{N_min} 。

$$\begin{cases} \Delta Q_{\text{spike}} = \min(\Delta Q, D_{\text{grain}} + D_{\text{pod}}) \\ \Delta Q_{\text{leaf}} = (\Delta Q - \Delta Q_{\text{spike}}) \times F_{\text{leaf}} \\ \Delta Q_{\text{stem}} = \Delta Q - \Delta Q_{\text{spike}} - \Delta Q_{\text{leaf}} \end{cases} \quad (9)$$

公式(9)表明地上部分干物质积累量首先被用来满足麦穗的需求。麦穗包括籽粒和粒壳, 麦穗日干物质积累量(ΔQ_{spike})取值为总积累量和麦穗潜在需求量的较小值, D_{grain} 为单株籽粒日干物质需求量(g), D_{pod} 为单株粒壳日干物质需求量(g); 剩下部分被分配到叶片(ΔQ_{leaf}), 再剩下的被分配到茎(ΔQ_{stem})。 F_{leaf}

为干物质叶片分配系数, 随物候期发展取值不同, 取值曲线封装在 APSIM 内部。ΔQ 为小麦地上部分日干物质积累量(g·m⁻²)。

$$D_{\text{grain}} = N_{\text{grain_plant}} \times R_{\text{grain_poten}} \times h_{\text{grain_poten_Tmean}} \times f_{N_grain} \quad (10)$$

式中: $N_{\text{grain_plant}}$ 为单株粒数; $R_{\text{grain_poten}}$ 为日潜在籽粒平均灌浆速率(g·粒⁻¹), 按小麦生长进程, 分为两个阶段, 第 1 阶段从开花到灌浆开始, 第 2 阶段为整个灌浆期, 根据李广等^[13]关于 APSIM 适用性的研究, 从开花到灌浆开始的日潜在籽粒平均灌浆速率取值为 0.001 00 g·粒⁻¹, 灌浆期日潜在籽粒平均灌浆速率取值为 0.002 00 g·粒⁻¹; $h_{\text{grain_poten_Tmean}}$ 为日均温对籽粒灌浆速率的影响系数, 范围 0~1, 取值曲线封装在 APSIM 内部; f_{N_grain} 为氮素胁迫对籽粒灌浆过程的影响系数。

$$N_{\text{grain_plant}} = R_{\text{grain}} \times W_{\text{stem_plant}} \quad (11)$$

式中: 单株粒数由开花期茎干重估算^[19]; R_{grain} 为每克茎的籽粒数(粒·g⁻¹), 根据李广等^[13]关于 APSIM

适用性的研究, 取值为 25 粒·g⁻¹; $W_{\text{stem_plant}}$ 为开花期茎干重(g), 取值为 1.305 g。

$$f_{N_grain} = \frac{h_{N_poten}}{h_{N_min}} \times \sum_{\text{stem,leaf}} \frac{C_N - C_{N_min}}{C_{N_crit} - C_{N_min}} \quad (12)$$

式中: h_{N_poten} 为日潜在籽粒平均氮积累速率(g·粒⁻¹), h_{N_min} 为日籽粒氮积累速率下限(g·粒⁻¹), 根据李广等^[13]关于 APSIM 适用性的研究, 日潜在籽粒平均氮积累速率取值 0.000 055 g·粒⁻¹, 日籽粒氮积累速率下限取值 0.000 015 g·粒⁻¹; C_N 为茎和叶片实际氮浓度(g·kg⁻¹), 开花后各耕作方式和播期处理下, 茎和叶片氮浓度实测数据平均值见表 3; C_{N_min} 为叶片自由生长结构性氮需求^[26]下限(g·kg⁻¹), C_{N_crit} 为临界氮浓度(g·kg⁻¹), 反映了叶片试图保留额外氮的门槛, C_{N_min} 和 C_{N_crit} 随物候期发展取值不同, 取值曲线封装在 APSIM 内部, 建模时依据研究区长期田间经验, 本试验中施肥量满足小麦茎和叶片的结构性氮需求, 即 C_N 总是大于 C_{N_min} 。

表 3 开花后小麦茎和叶片氮浓度实测平均值
Table 3 Observed mean of nitrogen concentration in stem and leaf of dryland wheat after flowering

器官 Organ	耕作方式 Tillage treatment	播期 Sowing date	平均氮浓度 Average N concentration (g·kg ⁻¹)	
			开花—灌浆 From flowering to grain filling	灌浆—成熟 From grain filling to maturity
茎 Stem	传统耕作(T) Conventional tillage	早播(ESW) Early sowing	11.3	5.4
		正常播(NSW) Normal sowing	11.9	6.5
		晚播(LSW) Late sowing	10.0	5.2
	传统耕作+秸秆覆盖(TS) Conventional tillage with straw cover	早播(ESW) Early sowing	15.6	8.3
		正常播(NSW) Normal sowing	16.9	9.1
		晚播(LSW) Late sowing	14.7	7.9
	免耕(NT) No tillage	早播(ESW) Early sowing	9.3	4.3
		正常播(NSW) Normal sowing	8.8	4.8
		晚播(LSW) Late sowing	9.3	4.0
免耕+秸秆覆盖(NTS) No tillage with straw cover	早播(ESW) Early sowing	14.3	7.9	
	正常播(NSW) Normal sowing	13.9	8.8	
	晚播(LSW) Late sowing	13.1	7.6	
叶片 Leaf	传统耕作(T) Conventional tillage	早播(ESW) Early sowing	28.2	13.2
		正常播(NSW) Normal sowing	26.6	12.3
		晚播(LSW) Late sowing	23.7	9.3
	传统耕作+秸秆覆盖(TS) Conventional tillage with straw cover	早播(ESW) Early sowing	30.3	14.5
		正常播(NSW) Normal sowing	28.1	12.6
		晚播(LSW) Late sowing	25.5	11.0
	免耕(NT) No tillage	早播(ESW) Early sowing	22.3	8.4
		正常播(NSW) Normal sowing	21.0	8.0
		晚播(LSW) Late sowing	20.4	7.5
	免耕+秸秆覆盖(NTS) No tillage with straw cover	早播(ESW) Early sowing	29.5	13.8
		正常播(NSW) Normal sowing	27.4	11.5
		晚播(LSW) Late sowing	24.3	10.8

$$D_{\text{pod}} = \begin{cases} D_{\text{grain}} \times h_{\text{stages}} & (D_{\text{grain}} > 0) \\ \Delta Q \times h_{\text{stages}} & (D_{\text{grain}} = 0) \end{cases} \quad (13)$$

式中: h_{stages} 为粒壳干物质需求比例系数, 随物候期发展取值不同, 取值曲线封装在 APSIM 内部。

$$\begin{cases} \Delta Q_{\text{grain}} = \frac{D_{\text{grain}}}{D_{\text{grain}} + D_{\text{pod}}} \times \Delta Q_{\text{spike}} \\ \Delta Q_{\text{pod}} = \frac{D_{\text{pod}}}{D_{\text{grain}} + D_{\text{pod}}} \times \Delta Q_{\text{spike}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: ΔQ_{grain} 为单株籽粒日干物质积累量(g), ΔQ_{pod} 为单株粒壳日干物质积累量(g)。

$$\Delta Q_{\text{retrans_from_stem}} = \min(D_{\text{dissatisf_spike}}, Q_{\text{stem}} \times 20\%) \quad (15)$$

$$\begin{cases} D_{\text{dissatisf_grain}} = D_{\text{grain}} - \Delta Q_{\text{grain}} \\ D_{\text{dissatisf_pod}} = D_{\text{pod}} - \Delta Q_{\text{pod}} \\ D_{\text{dissatisf_spike}} = D_{\text{dissatisf_grain}} + D_{\text{dissatisf_pod}} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \Delta Q_{\text{retrans_grain}} = \frac{D_{\text{dissatisf_grain}}}{D_{\text{dissatisf_spike}}} \times \Delta Q_{\text{retrans_from_stem}} \\ \Delta Q_{\text{retrans_pod}} = \frac{D_{\text{dissatisf_pod}}}{D_{\text{dissatisf_spike}}} \times \Delta Q_{\text{retrans_from_stem}} \end{cases} \quad (17)$$

公式(15)、(16)、(17)描述了灌浆过程中, 当干物质积累不能满足麦穗需求时, 主要考虑茎的干物质按比例被迁移到籽粒和粒壳中, 且某日单株被迁移的茎干物质总量上限是 20%^[19]。 $\Delta Q_{\text{retrans_from_stem}}$ 为发生迁移的茎干物质质量(g); Q_{stem} 为某日单株茎干物质总量(g), 模拟过程中, 从出苗期开始茎干物质总量逐日更新; $D_{\text{dissatisf_grain}}$ 、 $D_{\text{dissatisf_pod}}$ 和 $D_{\text{dissatisf_spike}}$ 分别为籽粒、粒壳和穗干物质需求量(g)不能得到满足的部分; $\Delta Q_{\text{retrans_grain}}$ 和 $\Delta Q_{\text{retrans_pod}}$ 为迁移到籽粒和粒壳的干物质质量(g)。

从上述对小麦干物质积累、分配以及再迁移过程的描述可以看出, 小麦开花后, 籽粒进入快速生长阶段, 模型充分考虑了籽粒干物质的积累主要来源于光合作用的产物和干物质再迁移的生理生态过程。当干物质需求得到满足时, 单株籽粒实际日干物质积累量与需求量(D_{grain})相同; 当干物质需求不满足时, 植株茎干物质发生再迁移, 尽可能满足穗的需求, 此时单株籽粒实际日干物质积累量为积累量(ΔQ_{grain})与迁移量($\Delta Q_{\text{retrans_grain}}$)之和。

2.1.2 籽粒氮积累模型

籽粒氮素积累模型表达如下:

$$\Delta N_{D_{\text{grain}}} = N_{\text{grain_plant}} \times h_{N_{\text{poten}}} \times h_{N_{\text{poten_Tmean}}} \times f_{N_{\text{grain}}} \quad (18)$$

式中: $\Delta N_{D_{\text{grain}}}$ 为单株籽粒日氮素需求量(g); $N_{\text{grain_plant}}$ 为单株粒数(粒), 按照公式(11)计算; $h_{N_{\text{poten}}}$ 为日潜

在籽粒平均氮积累速率($\text{g} \cdot \text{粒}^{-1}$), 根据李广等^[13]关于 APSIM 适用性的研究, 取值为 $0.000\ 055\ \text{g} \cdot \text{粒}^{-1}$; $h_{N_{\text{poten_Tmean}}}$ 为日均温对籽粒氮积累速率的影响系数, 取值范围 0~1, 随温度变化曲线封装在 APSIM 内部; $f_{N_{\text{grain}}}$ 为氮胁迫对籽粒灌浆过程的影响系数, 按照式(12)计算。

小麦开花后, 籽粒进入快速生长阶段, 籽粒氮素积累开始。当土壤氮供应不足时, 从茎和叶片中发生再迁移, 再迁移过程直到籽粒氮需求得到满足为止。建模时依据研究区长期田间经验, 本试验中施肥量满足茎和叶片的结构氮需求, 小麦开花前后茎和叶片额外储存的氮积累量即为非结构性氮需求, 并且其能够满足再迁移所需, 因此单株籽粒实际日氮素积累量与需求量相同, 依据公式(18)计算得到。

2.1.3 籽粒蛋白质含量模型

假定从土壤吸收以及再迁移到籽粒的氮素积累量, 全部用于供应籽粒蛋白质的形成, 籽粒蛋白质含量可依据小麦开花到成熟阶段籽粒氮素积累量与干物质积累量比值计算^[27]。

$$P_{\text{grain}} = 6.25 \times \frac{N_{\text{accum_grain}}}{Q_{\text{accum_grain}}} \quad (19)$$

式中: P_{grain} 为籽粒蛋白质含量, $N_{\text{accum_grain}}$ 为开花后到成熟单株籽粒氮素积累量(g), $Q_{\text{accum_grain}}$ 为开花后到成熟单株籽粒干物质积累量(g)。

2.2 模型精度检验

根据研究区 2016—2017 年大田试验数据, 对旱地小麦籽粒蛋白质含量模型进行检验, 检验指标包括产量、籽粒蛋白质含量。

3 个播期处理和 4 种耕作方式下小麦产量、籽粒蛋白质含量模拟值与实测值之间的关系分别如图 1 所示。3 个播期处理和 4 种耕作方式下小麦产量、籽粒蛋白质含量模拟值与实测值很好地分布于 1:1 实线的左右, 误差控制在 -15%~+15%。模型模拟检验结果如表 4 所示, 3 个播期处理和 4 种耕作方式下, 产量、籽粒蛋白质含量模拟值与实测值 RMSE 分别为 66.4~121.9 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 0.2%~1.1%; NRMSE 分别为 1.23%~9.66%和 1.31%~9.94%, 控制在 10%以内。基于 APSIM 的旱地小麦籽粒蛋白质含量模型模拟精度较高。

2.3 不同播期和耕作方式下旱地小麦蛋白质含量变化情况

模拟 3 个播期处理和 4 种耕作方式下, 2013—2017 年籽粒蛋白质含量。旱地小麦不同播期、耕作方式下籽粒蛋白质含量多年平均值如图 2 所示。正常播处理(NSW)的蛋白质含量最高, T、TS、

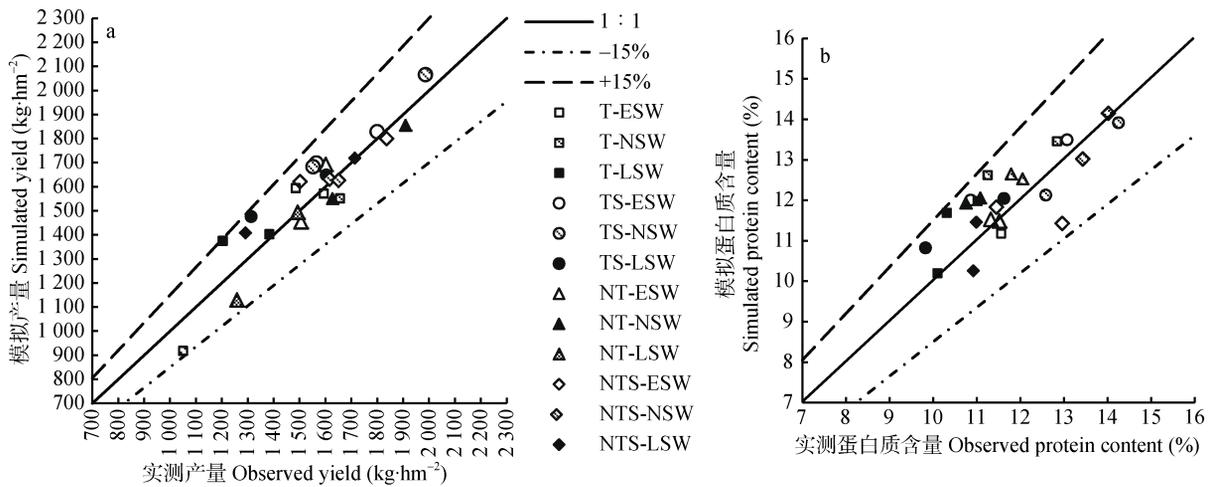


图 1 旱地小麦产量(a)和蛋白质含量(b)模拟值与实测值关系

Fig. 1 Relationship between simulated and observed values of dryland wheat yield (a) and protein content

表 4 旱地小麦产量和籽粒蛋白质含量模拟检验结果

Table 4 Simulation result of dryland wheat yield by the mode of test

播期 Sowing date	耕作方式 Tillage treatment	产量 Yield		蛋白质含量 Protein content	
		RMSE (kg·hm ⁻²)	NRMSE (%)	RMSE (%)	NRMSE (%)
早播(ESW) Early sowing	传统耕作(T) Conventional tillage	78.3	5.09	0.7	6.47
	传统耕作+秸秆覆盖(TS) Conventional tillage with straw cover	96.8	5.76	0.9	7.26
	免耕(NT) No tillage	74.0	4.77	0.2	1.31
	免耕+秸秆覆盖(NTS) No tillage with straw cover	88.3	5.30	1.1	9.13
正常(NSW) Normal sowing	传统耕作(T) Conventional tillage	119.3	9.66	1.1	8.83
	传统耕作+秸秆覆盖(TS) Conventional tillage with straw cover	108.3	5.91	0.4	2.94
	免耕(NT) No tillage	66.4	3.84	0.7	5.83
	免耕+秸秆覆盖(NTS) No tillage with straw cover	19.9	1.23	0.3	2.22
晚播(LSW) Late sowing	传统耕作(T) Conventional tillage	121.9	9.43	1.0	9.59
	传统耕作+秸秆覆盖(TS) Conventional tillage with straw cover	120.8	8.29	0.8	7.25
	免耕(NT) No tillage	91.3	6.64	1.1	9.94
	免耕+秸秆覆盖(NTS) No tillage with straw cover	82.9	5.52	0.6	5.23

NT 和 NTS 耕作方式下分别为 11.2%、12.6%、10.8% 和 12.1%；早播处理(ESW)的蛋白质含量较高，T、TS、NT 和 NTS 耕作方式下分别为 10.4%、11.7%、10.4%和 11.3%；晚播处理(LSW)的蛋白质含量最低，T、TS、NT 和 NTS 耕作方式下分别为 9.6%、10.4%、9.9%和 9.5%。播期对蛋白质含量影响较大，4 种耕作方式均表现出，正常播处理(NSW)与早播处理(ESW)相差不大(0.4%~0.9%)，正常播处理(NSW)与晚播处理(LSW)相差较大(0.9%~2.6%)，表明晚播处理(LSW)明显降低了旱地小麦籽粒蛋白质含量。

2.4 不同耕作方式下产量和蛋白质含量变化情况

模拟 2013—2017 年，正常播期 4 种耕作方式下

产量和籽粒蛋白质含量，拟合旱地小麦产量与籽粒蛋白质含量二次多项式预测曲线，T、TS、NT 和 NTS 拟合曲线方程如公式(20)~(23)所示，在 95%的置信区间内决定系数(R^2)范围介于 0.775 3~0.908 8，拟合程度较好。

各拟合曲线方程二次项系数均 <0 ，分别为 -132.07、-63.669、-186.36 和 -37.239，4 种耕作方式下，小麦产量与蛋白质含量关系均呈开口向下的二次抛物线，表明蛋白质含量的提高，产量呈先增加后减少的趋势。二次项系数绝对值排序为 NT>T>TS>NTS，二次系数绝对值越小抛物线开口越大。图 3 所示二次抛物线对称轴分别为 10.5%、

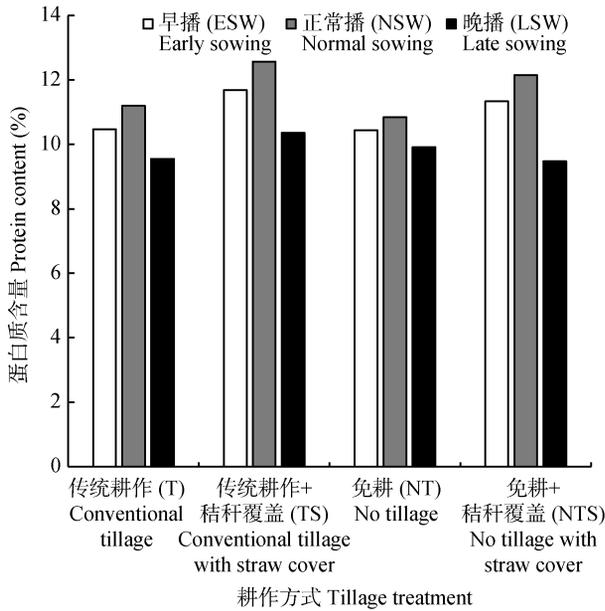


图 2 旱地小麦播期和播种方式对旱地小麦籽粒蛋白质的影响

Fig. 2 Impact of sowing date and tillage treatment on grain protein content of dryland wheat

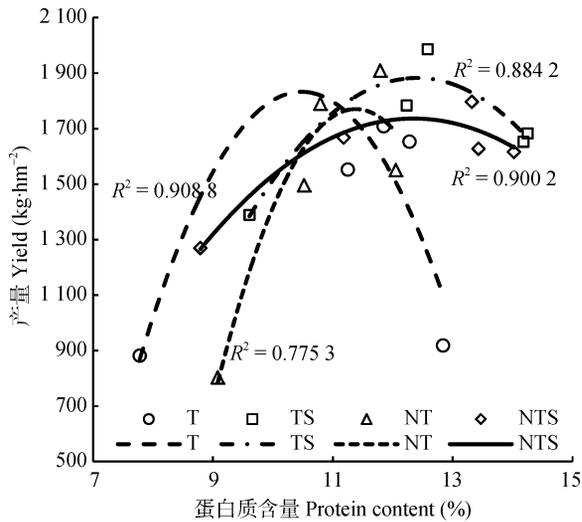


图 3 不同耕作方式下旱地小麦产量与籽粒蛋白质含量关系

12.4%、11.4%和 12.3%，表明蛋白质含量达 12%以上时，经过秸秆覆盖的耕作方式(TS 和 NTS)比不覆盖耕作方式(T 和 NT)产量减少的态势较缓。

$$y = -132.07x^2 + 2768.5x - 12676 \quad (20)$$

$$y = -63.669x^2 + 1579.9x - 7917.9 \quad (21)$$

$$y = -186.36x^2 + 4242.2x - 22371 \quad (22)$$

$$y = -37.239x^2 + 919.61x - 3941.1 \quad (23)$$

3 讨论

采用可扩展标记语言(XML)对小麦生长模拟框

架(APSIM-Wheat)中的多个旱地小麦生长过程有穷性数学子模型及相应参数进行构建,籽粒蛋白质含量模型即为 APSIM-Wheat 中子模型之一。XML 格式文档所具有的独立标识功能,使得各子模型既具备统一的描述方法,又拥有独立进行数据交换的能力,可实现 APSIM-Wheat 中小麦生长各子模型协调、系统的嵌套。本文以干物质和氮素的积累与分配作为籽粒蛋白质的主要来源,兼顾考虑干物质从营养器官向籽粒再迁移的过程。当干物质需求得到满足时,单株籽粒实际日干物质积累量与需求量相同;当干物质需求不满足时,植株茎干物质发生再迁移,尽可能满足穗的需求,此时单株籽粒实际日干物质积累量为积累量与迁移量之和。当土壤氮供应不足时,从茎和叶片中发生氮素再迁移,再迁移过程直到籽粒氮需求得到满足为止。本试验中假定施肥量满足籽粒实际日氮素需求,单株籽粒实际日氮素积累量与需求量相同。根据研究区两年(2016—2017年)大田试验数据检验模型,3种播期处理和4种耕作方式下小麦产量和籽粒蛋白质含量模拟值和实测值之间的 RMSE 分别为 66.4~121.9 kg·hm⁻²和 0.2%~1.1%;NRMSE 分别为 1.23%~9.66%和 1.31%~9.94%,控制在 10%以内,模拟精度较高。模型的可靠性为籽粒蛋白质含量的模拟应用提供了重要技术支持。

模型精度检验基础上,模拟多年(2013—2017年)3种播期处理和4种耕作方式下小麦产量和籽粒蛋白质含量。模拟结果均表现为3月30日晚播处理的籽粒蛋白质含量最低,晚播降低了籽粒蛋白质含量,模型模拟结果与慕军鹏^[28]的研究结果一致。主要是因为黄土丘陵区旱地小麦在灌浆期间,适宜的温度下,随气温的升高籽粒干物质和氮的积累速度加快,小麦蛋白质含量迅速增加;但日最高气温超过 30 时,高温加速停止了营养和生殖生长,籽粒蛋白质的积累与温度呈负效应^[28-29]。2013—2017年,晚播小麦均是6月29日左右进入灌浆期,7月21日左右成熟,在这段籽粒蛋白质含量快速积累的关键期间^[28],2013年、2014年、2015年和2017年,日最高温平均值分别为 23.9、25.7、25.0 和 26.2,日最高温偏低,不利于晚播小麦籽粒蛋白质含量提高;2016年日最高温平均值为 28.1,但是,日最高温度超过 30 的天数共计 8 d,过度高温又导致晚播小麦籽粒蛋白质积累受限。晚播相对于早播和正常播种,蛋白质积累和分配天数的缩短也是晚播降低籽粒蛋白质含量的原因之一。

由模拟结果可知, 秸秆覆盖方式(TS 和 NTS)较不覆盖方式(T 和 NT), 更利于旱地小麦的高效、优质生产。主要是由于秸秆覆盖改良了土壤理化方面的性质, 从而促进了籽粒蛋白质的积累与分配。从对土壤物理性质的影响来看, 秸秆覆盖有效抑制了地表水分的蒸发, 防止了表土的板结, 秸秆分解过程中形成的腐殖质作为重要的胶结物质有利于土壤团聚体的形成^[30], 从而改善了土壤的孔隙性, 创造了土壤中水、肥、气、热等因素协调发展的条件。团聚体内部的持水孔隙, 水多空气少, 既可以保存随水进入团聚体的水溶性养分, 又适宜于嫌气性微生物的活动, 从而导致有机质分解缓慢, 有利于腐殖质的合成和土壤养分的积累^[31-32], 从而稳定地巩固了土壤良好的保肥能力。在对土壤化学性质的影响方面, 土壤有机质含量的多少, 是土壤肥力高低的一个重要指标。秸秆覆盖增加了土壤有机物的投入, 提高了土壤中有机质的含量, 土壤中对小麦籽粒蛋白质影响较大的含氮、磷、钾的有机化合物得到有效补充, 氮是蛋白质的重要组分, 充足的土壤氮供应直接影响着籽粒蛋白质的积累, 磷、钾对小麦蛋白质的影响是通过改善氮代谢而发挥作用。因此, 土壤有机质含量的增加, 有利于籽粒蛋白质的积累^[33]。与秸秆覆盖相比, 不覆盖使得土壤表面覆盖物少, 雨水直接冲击, 造成水土流失加剧, 土层变薄, 土壤有机质不增反减。综上所述, 秸秆覆盖方式(TS 和 NTS)通过对土壤理化性能的改良, 提高了土壤的保肥和供肥能力, 土壤肥力强, 其供应小麦生长所需养分的能力就强, 尤其是氮供应能力, 从而促进了小麦籽粒蛋白质的积累与分配。

4 结论

本文以干物质和氮素的积累与分配作为籽粒蛋白质的主要来源, 对其从营养器官向籽粒再迁移的过程进行了描述, 3 个播期处理和 4 种耕作方式下模型精度检验结果表明, 产量和籽粒蛋白质含量模拟值和实测值之间的 RMSE 分别为 66.4~121.9 kg·hm⁻² 和 0.2%~1.1%, NRMSE 分别为 1.23%~9.66% 和 1.31%~9.94%, 基于 APSIM 的旱地小麦籽粒蛋白质含量模型模拟精度较高。

播期对旱地小麦籽粒蛋白质含量的影响较大, 4 种耕作方式均表现为, 正常播期处理(NSW)小麦的蛋白质含量最高, 而晚播处理(LSW)则明显导致籽粒蛋白质含量降低 0.9%~2.6%。4 种耕作方式下, 小麦产量与

蛋白质含量关系均呈开口向下的二次曲线, 随着蛋白质含量的升高, 产量呈先增加后减少的态势。此外, 秸秆覆盖的耕作方式(TS 和 NTS)比不覆盖的耕作方式(T 和 NT)更利于小麦籽粒蛋白质含量的提高。

参考文献 References

- [1] 董博. 不同农作措施对小麦品质的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2008
DONG B. Effect of the different farming system on wheat quality[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2008
- [2] 李广. APSIM 模型模拟与应用研究——基于旱地小麦、豌豆保护性耕作定位试验[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2006: 9-17
LI G. Study on simulation and application of APSIM model — based on the conservation tillage of dryland wheat and pea[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2006: 9-17
- [3] 程志强, 蒙继华. 作物单产估算模型研究进展与展望[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(4): 402-415
CHENG Z Q, MENG J H. Research advances and perspectives on crop yield estimation models[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(4): 402-415
- [4] Ritchie J T, Godwin D C, Otter S. CERES-Wheat: A user-oriented Wheat Model[M]. Michigan State University, East Lansing: AGRISTARS Publication, 1985: 252
- [5] JEUFFROY M H, RECOUS S. Azodyn: a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization[J]. European Journal of Agronomy, 1999, 10(2): 129-144
- [6] MANSOURI M, DESTAIN M. An improved particle filtering for time-varying nonlinear prediction of biomass and grain protein content[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 114: 145-153
- [7] 潘洁, 戴廷波, 姜东, 等. 基于气候因子效应的冬小麦籽粒蛋白质含量预测模型[J]. 中国农业科学, 2005, 38(4): 684-691
PAN J, DAI T B, JIANG D, et al. An ecological model for predicting grain protein content in winter wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(4): 684-691
- [8] 李振海, 徐新刚, 金秀良, 等. 基于氮素运转原理和 GRA-PLS 算法的冬小麦籽粒蛋白质含量遥感预测[J]. 中国农业科学, 2014, 47(19): 3780-3790
LI Z H, XU X G, JIN X L, et al. Remote sensing prediction of winter wheat protein content based on nitrogen translocation and GRA-PLS method[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(19): 3780-3790
- [9] 屈莎, 李振海, 邱春霞, 等. 基于开花期氮素营养指标的冬小麦籽粒蛋白质含量遥感预测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 186-193
QU S, LI Z H, QIU C X, et al. Remote sensing prediction of winter wheat grain protein content based on nitrogen nutrition index at anthesis stage[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(12): 186-193
- [10] 罗珠珠, 蔡立群, 李玲玲, 等. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤养分和作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 171-176
LUO Z Z, CAI L Q, LI L L, et al. Long-term effects of tillage system on soil nutrients and grain yields in rainfed area of

- Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3): 171–176
- [11] 聂志刚, 李广. 基于 APSIM 的旱地小麦叶面积指数模拟模型构建[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(4): 94–98
NIE Z G, LI G. Modeling of APSIM-based simulation of leaf area index of wheat in dryland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(4): 94–98
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 263–268
BAO S D. Soil Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 263–268
- [13] 李广, 黄高宝, William Bellotti, 等. APSIM 模型在黄土丘陵沟壑区不同耕作措施中的适用性[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2655–2663
LI G, HUANG G B, WILLIAM B, et al. Adaptation research of APSIM model under different tillage systems in the Loess hill-gullied region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2655–2663
- [14] 李广, 黄高宝. 基于 APSIM 模型的降水量分配对旱地小麦和豌豆产量影响的研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 342–347
LI G, HUANG G B. Determination of the effect of precipitation distribution on yield of wheat and pea in dryland using APSIM[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(2): 342–347
- [15] 李广, 李玥, 黄高宝, 等. 基于 APSIM 模型旱地春小麦产量对温度和 CO₂ 浓度升高的响应[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 1088–1095
LI G, LI Y, HUANG G B, et al. Response of dryland spring wheat yield to elevated CO₂ concentration and temperature by APSIM model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(8): 1088–1095
- [16] 何亮, 赵刚, 靳宁, 等. 不同气候区和不同产量水平下 APSIM-Wheat 模型的参数全局敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 148–157
HE L, ZHAO G, JIN N, et al. Global sensitivity analysis of APSIM-Wheat parameters in different climate zones and yield levels[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 148–157
- [17] 董朝阳, 刘志娟, 杨晓光. 北方地区不同等级干旱对春玉米产量影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 157–164
DONG C Y, LIU Z J, YANG X G. Effects of different grade drought on grain yield of spring maize in Northern China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 157–164
- [18] ASSENG S, BAR-TAL A, BOWDEN J W, et al. Simulation of grain protein content with APSIM-Nwheat[J]. European Journal of Agronomy, 2002, 16(1): 25–42
- [19] ZHENG B Y, CHENU K, DOHERTY A, et al. The APSIM-Wheat module (7.5 R3008) documentation[R]. Toowoomba: APSRU, 2014: 9–17
- [20] MONSI M, SAIKI T. On the factor light in plant communities and its importance for matter production[J]. Annals of Botany, 2005, 95(3): 549–567
- [21] SINCLAIR T R. Water and nitrogen limitations in soybean grain production. Model development[J]. Field Crops Research, 1986, 15(2): 125–141
- [22] MONTEITH J L, D. GREENWOOD J. How do crops manipulate water supply and demand?[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences, 1986, 316(316): 245–259
- [23] TRIBOI E, ABAD A, MICHELENA A, et al. Environmental effects on the quality of two wheat genotypes: 1. quantitative and qualitative variation of storage proteins[J]. European Journal of Agronomy, 2000, 13(1): 47–64
- [24] 王绍中, 章练红, 徐雪林, 等. 环境生态条件对小麦品质的影响研究进展[J]. 华北农学报, 1994, 9(S1): 141–144
WANG S Z, ZHANG L H, XU X L, et al. Effect studies of environment and ecological conditions on wheat quality[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1994, 9(S1): 141–144
- [25] ORLANDO F, MANCINI M, MOTHAR R, et al. Modelling durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum) grain protein concentration[J]. The Journal of Agricultural Science, 2017, 155(6): 930–938
- [26] ASSENG S, VAN KEULEN H, STOL W. Performance and application of the APSIM Nwheat model in the Netherlands[J]. European Journal of Agronomy, 2000, 12(1): 37–54
- [27] 徐寿军, 杨恒山, 范富, 等. 大麦籽粒蛋白质含量预测模型[J]. 中国农业科学, 2009, 42(11): 3863–3870
XU S J, YANG H S, FAN F, et al. A model for predicting grain protein content in barley[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(11): 3863–3870
- [28] 慕军鹏. 不同播期对春小麦品质性状及其贮藏蛋白合成和积累的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2005: 9–17
MU J P. Effect of different sowing dates on quality characters of spring wheat and synthesis and accumulation of storage protein[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2005: 9–17
- [29] 尚勋武, 康志钰, 柴守玺, 等. 甘肃省小麦品质生态区划和优质小麦产业化发展建议[J]. 甘肃农业科技, 2003(5): 10–13
SHANG X W, KANG Z Y, CHAI S X, et al. Suggestions to the industrialization of high quality wheat and ecozone division in Gansu according to wheat quality[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2003(5): 10–13
- [30] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 415–421
WANG Q K, WANG S L. Forming and stable mechanism of soil aggregate and influencing factors[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(3): 415–421
- [31] 严洁, 邓良基, 黄剑. 保护性耕作对土壤理化性质和作物产量的影响[J]. 中国农机化, 2005(2): 31–34
YAN J, DENG L J, HUANG J. Effect of conservation tillage on soil physicochemical properties and crop yields[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2005(2): 31–34
- [32] 孙向阳. 土壤学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 93–106
SUN X Y. Soil Science[M]. Beijing: China Forestry Press, 2005: 93–106
- [33] 杨文雄. 中国西北春小麦[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016: 356–357
YANG W X. Spring Wheat in Northwest China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2016: 356–357