黄土高原冬小麦田土壤水分与小麦产量 对降水和气温变化响应的模拟研究

王学春1a,李 军2*,王红妮1b,郝明德2

(1. 西南科技大学 a. 生命科学与工程学院, b. 成人与网络教育学院, 四川 绵阳 621010; 2. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:明确黄土高原地区降水和气温变化对冬小麦田土壤水分和产量的影响,对探索适应气 候变化的冬小麦田间管理措施具有重要的现实意义。论文在验证EPIC模型对冬小麦田土壤 水分模拟精度的基础上,以历史气象数据为基础,设置TR1、TR2和TR3三个气候情景,采用作 物模型模拟的方法,研究黄土高原冬小麦田土壤水分和冬小麦产量对降水和气温变化的响 应。结果显示:1)1961—2010年黄土高原降水呈降低趋势,其年际间变化幅度和频率均有所增 加。与1961—1970年相比,洛川、长武、运城和延安的年均降水量在2001—2010年间分别降低 了18.1%、13.6%、18.8%和24.9%、其变差系数分别增加了0.029、0.087、0.02和0.057。1961— 2010年黄土高原气温呈波动性增加趋势,其中日最低气温增加幅度大于日最高气温增加幅 度。与1961—1970年相比,日最高气温在2001—2010年间增加了0.30~0.84℃,而日最低气温 增加了1.00~1.55℃。2)EPIC模型能够较好地模拟黄土高原冬小麦田土壤水分动态变化规律, 0~2.0 m 土层土壤湿度观测值与模拟值间的相对均方根误差 RRMSE 值为 6.0%~14.0%, R²和模 型效率ME值分别为0.824和0.815。3)黄土高原地区降水的减少和最高气温的增加均不利于 冬小麦生产,而最低气温的提高对冬小麦生产较为有利。洛川、长武、运城和延安冬小麦产量 因年降水量的降低而分别减产了8.5%、7.6%、11.7%和12.3%;因日最高气温的升高分别减产了 6.4%、6.8%、7.2%和-3.0%;因日最低气温的提高而分别增加了8.8%、10.2%、1.5%和12.0%。因 此,为适应降水减少和日最低气温升高的趋势,黄土高原冬小麦生产区应适当调整冬小麦播 期,研究并推广保水节水技术措施,充分利用气候变化对冬小麦生产的有利因素,克服不利因 素,确保冬小麦的可持续生产。

关键 词:降水;气温;土壤水分;冬小麦;EPIC模型

中图分类号: S512.1; S162.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-3037(2017)08-1398-13

黄土高原除少数石质山地外,其土层平均厚度50~80 m,最厚达150~180 m。深厚的土层有利于土壤水分蓄积,在干旱缺水季节可为作物提供保命水,对稳定当地粮食生产起到了关键作用。"留住天上水,用好地下水"是适宜黄土高原气候特点和土壤蓄水特征的水分利用措施之一。近年来推广的秸秆还田技术^[1-2]、薄膜覆盖技术^[3-4]等旱地保水节水措施,在留住天上水方面取得了巨大成功,有效提高了当地冬小麦产量。

收稿日期: 2016-07-01;修订日期: 2016-11-02。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31401347, 31571620); 国家科技支撑计划项目 (2015BAD22B02)。[Foundation items: National Natural Science Foundation of China, No. 31401347 and 31571620; National Key Technology Support Program of China, No. 2015BAD22B02.]

第一作者简介:王学春(1979-),男,山东威海人,副研究员,博士,主要从事作物高产栽培及作物生产系统 模拟与决策研究。E-mail: xuechunwang@swust.edu.cn

^{*}通信作者简介:李军(1964-),男,甘肃泾川人,教授,博士,主要从事旱区农业生态、高效农作制度与作物系统模拟研究。E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn

受全球气候变化影响,黄土高原降水和气温发生了显著变化。相关研究表明,黄土高原年均气温呈上升趋势,增温速度显著高于全国同期增温速度;年降水量呈下降趋势^[5-7]。 万信等对1971—2000年气象资料的分析表明,陇东塬区气温呈明显上升趋势,且以冬季 和春季增温为主,无霜期延长^[8]。延军平等的研究表明,陕北黄土高原沟壑区年均气温以 0.045 ℃/a速率递增,远大于全国同期增温速度,冬季气温升高率最大;年降水量递减率 为0.248 mm/a,夏季递减速率远大于冬季^[9]。

温度和降水的变化势必引起土壤水分和冬小麦产量的变化。郭海英等的研究表明, 增温和降水量减少导致董志塬小麦田土壤水分含量在春季呈逐年减少的趋势^[7,10]。俄有浩 等研究了气候变化对农业和生态环境的影响,结果表明,生育期太阳辐射和积温增加可 能导致冬小麦生育期需水量增加10.0%~15.1%,播期延迟1~3 d,收获期提前1~2 d, 生育期缩短3~5 d,气候产量下降50.0%~100.0%^[5]。目前,降水和气温变化对黄土高原 冬小麦田土壤水分和产量的影响还有待深入研究。

本研究利用1961-2010年气象数据,分析黄土高原降水和气温变化趋势;在确保模 拟精度的前提下,利用EPIC模型模拟的土壤水分数据和冬小麦产量数据,分析黄土高原 不同降水类型区降水和气温变化对冬小麦田土壤水分和产量的影响,为探索适应黄土高 原气候变化特征的冬小麦田间管理措施提供必要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 EPIC模型与田间试验

EPIC(Environmental Policy Integrated Climate)模型是Williams等于20世纪80年代 在美国黑土地研究中心建立的多作物通用模型^[11-12]。模型中包括作物模块、土壤模块、气 象模块等,能够以d为时间步长对复杂作物系统的农田水土资源和作物生产力进行上百 年连续模拟运算^[13]。1984年,黑土地研究中心发布的EPIC模型主要用来评价土壤水土资 源对粮食生产的影响^[11];1992年,Stockle等对EPIC模型进行了改进,使模型在模拟作物 生长的同时充分考虑了CO₂和气压对作物太阳能转换效率和蒸腾效率的影响^[14-15];2004 年,Izaurralde等对模型中的碳循环进行了改进^[16],之后EPIC模型被广泛应用于评价气候 变化对粮食生产的影响。本研究采用WinEPIC V6 版,该版对土壤水分和作物产量的模 拟精度较高^[15],是模拟气候变化对作物生产系统影响的有效工具之一。

本研究选取1986—2000年中国科学院水土保持研究所长武十里铺实验站冬小麦部分 田间观测数据对EPIC模型进行校验与评价。实验展开时,田间耕层土壤有机质含量 10.5 mg/kg、碱解氮含量37.0 mg/kg、有效磷含量4.6 mg/kg、速效钾含量129.3 mg/kg, pH值8.2;冬小麦9月下旬播种,播种量163 kg/hm²,6月中旬收获;施肥运筹方式为: 纯氮(尿素)120 kg/hm²、纯磷(过磷酸钙)60 kg/hm²、厩肥(有机质含量44.29 mg/ kg)75 000 kg/hm²,所有肥料播种前随土壤翻耕入土。其他管理与当地大田相同。

1.2 气候情景与EPIC模型模拟

为明确降水和气温变化对冬小麦田土壤水分和小麦产量的影响,本研究采用气象要 素逐日替换的方法,将1961—2010年设置为3个气候情景:1)仅年降水量发生变化,逐 日最高气温和逐日最低气温不变(TR1);2)仅逐日最高气温发生变化,年降水量和逐 日最低气温不变(TR2);3)仅逐日最低气温发生变化,年降水量和逐日最高气温不变 (TR3)。每10 a运行一次EPIC模型,模型起始土壤条件相同,小麦作物参数和田间管理 参数相同,输出土壤水分和冬小麦产量数据。分别分析1961—2010年TR1、TR2和TR3 三种情景下土壤水分和冬小麦产量变化的规律,研究降水量、最高气温、最低气温变化 对冬小麦田土壤水分和产量的影响。本研究分别选取洛川、长武、运城和延安代表黄土 高原湿润区、半湿润区、半干旱区和干旱区进行模拟研究。

1.3 统计方法

土壤有效含水量的计算方法如下:

$$ASW = \sum_{i=1}^{n} ASW_i = \sum_{i=1}^{n} [(SW_i - WP_i) \times P_i \times H_i \times 10]$$
⁽¹⁾

式中: *ASW*为0~10.0 m 土层土壤有效含水量(mm); *ASW*,为第*i* 土层土壤有效含水量(mm); *n*为所测定的最大土层数; *SW*,为第*i* 土层土壤湿度(%); *WP*,为第*i* 土层土壤萎 蔫湿度(%); *P*,为第*i* 土层土壤容重(g/cm³); *H*,为第*i* 土层厚度(cm)^[17]。

模型模拟精度采用以下公式进行评价:

$$RMSE = \left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} (S_i - M_i)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$
(2)

$$RRMSE = \frac{\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \left(S_{i} - M_{i}^{2}\right)\right]^{2}}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} M_{i}} \times 100\%$$
(3)

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (S_i - \overline{M})^2}$$
(4)

$$RE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{S_i - M_i}{M_i} \times 100\%$$
(5)

$$R = \frac{\sum \left(\left(S_i - \overline{S} \right) \times \sum \left(M_i - \overline{M} \right) \right)}{\left[\sum \left(S_i - \overline{S} \right) \times \sum \left(M_i - \overline{M} \right) \right]^{\frac{1}{2}}}$$
(6)

$$R^{2} = \frac{\left\{ \sum \left[\left(S_{i} - \overline{S} \right) \times \sum \left(M_{i} - \overline{M} \right) \right] \right\}^{2}}{\sum \left(S_{i} - \overline{S} \right)^{2} \times \sum \left(M_{i} - \overline{M} \right)^{2}}$$
(7)

式中: *RMSE*为均方根误差; *RRMSE*为相对均方根误差; *ME*为模型效率; *RE*为相对误差; *R*为相关系数; *R*²为决定系数; *S*₅为模拟值; *M*₅为观测值; *M*为观测平均值; *S*为模拟平均值^[18]。其中*RMSE*和*RRMSE*反映了模型对观测值内部变异的模拟精度,模型对观测值内部变异的模拟精度越高, *RRMSE*越接近0; *ME*描述了模型对观测值的捕捉效率,即有多少模拟值和观测值一致; *ME*和*R*²共同反映了模型模拟值和观测值间的一致程度, 如模型模拟值和观测值准确相等, *ME*和*R*²就完全一致。

降水和气温变化采用以下公式进行统计:

$$V_{c} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum(X_{i} - \overline{X})^{2}}}{\overline{X}}$$
(8)

$$Va = \frac{\sum |X_i - \overline{X}|}{n} \tag{9}$$

$$Vr = \frac{\sum |X_i - X|}{n \times \overline{X}} \tag{10}$$

式中:Vc为变差系数;Va为绝对变率;Vr为相对变率;n为样本数;X为观测值; \overline{X} 为观 测平均值。Vc反映了黄土高原各气候要素变化的剧烈程度;Va和Vr反映了各气候要素的 年际间变率。

2 结果与分析

2.1 1961—2010年黄土高原降水和气温变化

1961—2010年, 黄土高原年均降水量呈波动性降低趋势, 最高气温和最低气温均呈 波动性增加趋势(图1)。2001—2010年洛川、长武、运城、延安的年均降水量分别为 541、532、464和393 mm, 与1961—1970年相比,分别减少了18.1%、13.6%、18.8%和 24.9%; 年均最高气温分别为15.89、15.81、19.96和9.72 ℃, 与1961—1970年相比,分

別升高了 0.84、0.70、0.30 和 0.90 ℃; 年均最低气温分别为 5.26、4.44、6.82 和 3.99 ℃,与 1961—1970 年相比,分别升 高了 1.00、1.37、1.55 和 1.14 ℃。

与1961-1970年相比, 2001-2010 年降水的年际相对变率分别降低了 0.039、0.013、0.021和0.011; 绝对变率 分别降低了 11.50、2.16、6.76 和 4.12 mm; 变差系数分别增加了 0.029、 0.087、0.020和0.057;其最高气温相对 变率分别增加了0.012、0.005、0.003和 0.008, 绝对变率分别增加了 0.034、 0.054、0.130和0.100℃,变差系数分别 增加了0.019、0.006、0.001和0.006。最 低气温相对变率分别增加了 0.045、 0.035、0.009和0.002, 绝对变率分别增 加了0.115、0.106、0.172和0.037℃, 变 差系数分别增加了0.043、0.031、0.030 和0.030。表明,洛川、长武、运城、延 安的降水量呈波动递减趋势,最高气温 和最低气温的年际波动幅度呈增加趋势。 2.2 EPIC 模型对冬小麦田土壤水分和产 量的模拟验证

冬小麦田 0~0.1、0.1~0.5、0.5~ 1.0、1.0~1.5和1.5~2.0 m 土层土壤含





水量逐月观测值与模拟值间的 RRMSE 值分别为 14.0%、12.0%、12.0%、13.0%和 6.0%, ME 均值(0.815)和 R²均值(0.824)相似。与观测平均值相比,模拟平均值略偏高,其 RE 值分别为 0.0%、1.6%、6.4%、5.3%和 0.5%,但两者间差异均不显著(P>0.05)。EPIC 模型模拟的逐月土壤含水量与观测值相近,二者间的回归方程斜率接近 1(图 2),表明 模型能够较好地模拟冬小麦田土壤含水量在不同月份间的变化规律。与 0.5~2.0 m 土层 相比, ME 值和 R² 值差异在 0~0.5 m 土层较大,表明 EPIC 模型对 0~0.5 m 土层土壤含水量模拟精度较低。



Fig. 2 Comparison of simulated values and measured values of soil water content in different soil layers of winter wheat field at Changwu Agricultural Station



冬小麦产量观测平均值为3.90 t/hm²,标准差为1.61 t/hm²;冬小麦产量模拟平均值为3.84 t/hm²,标准差为1.75 t/hm²。模拟值和观测值间的 回归方程斜率接近1(图3),双尾测验表明模拟 值和观测值间的差异不显著(P<0.05),EPIC模 型模拟的冬小麦产量与观测值基本一致,模拟值 和观测值间的*RMSE*值为0.291 t/hm²。与观测产量 相比,连作冬小麦的模拟产量略偏低,其*RE*值 为-1.5%。*R*²和*ME*值较为接近,表明模型能较好 地反映观测产量在不同年份的变化。

2.3 黄土高原冬小麦田土壤有效含水量对降水和 气温变化的响应

在仅降水量发生变化的气候情景下 [图 4 (a)],1961—2010年,洛川、长武、运城、延安的 冬小麦田土壤有效含水量与年降水量间的相关系 8期



图4 1961—2010年黄土高原冬小麦田土壤有效含水量对降水和气温变化的响应 Fig. 4 Response of available soil water in winter wheat field to the rainfall and temperature on the Loess Plateau from 1961 to 2010

4.0 m 土层土壤有效含水量模拟值分别为1445、1295、1067和1008 mm,与1961—1970年相比分别减少了14.0%、19.0%、20.1%和16.0%。

在仅最高气温发生变化的气候情景下 [图 4(b)], 1961—2010年,洛川、长武、运 城、延安的冬小麦田土壤有效含水量年际间略有差异,但差异不显著(P>0.05)。总体而 言,在气温较高的 1991—2000 和 2001—2010 年间土壤有效含水量略有降低。其中 2001—2010 年间,0~4.0 m 土层土壤有效含水量分别为1 630、1 589、1 325 和1 215 mm,与1961—1970 年相比分别减少了 3.0%、2.0%、1.0%和1.0%。

在仅最低气温发生变化的气候情景下 [图 4(c)], 1961—2010年, 洛川、长武、运 城、延安的冬小麦田土壤有效含水量与日最低气温间的相关系数平均为-0.66 (P< 0.05), 土壤有效含水量随日最低气温的升高有一定程度降低。其中, 2001—2010年, 0~4.0 m土层土壤有效含水量分别为1 507、1 429、1 225 和1 118 mm, 与1961—1970 年相比分别减少了 10.0%、11.0%、8.0%和7.0%。

2.4 黄土高原冬小麦田土壤剖面水分分布对降水量和气温变化的响应

在仅降水量发生变化的情况下 [图 5(a)],与1961—1970年相比,2001—2010年洛川 冬小麦田土壤含水量在2.5~3.5 m土层降低了1.0%~2.0%;长武在1.5~3.5 m土层降低 了1.0%~3.0%;运城和延安在1.0~4.0 m土层分别降低了1.0%~3.0%、1.0%~4.0%。 降水的减少使冬小麦对深层土壤水分消耗增加,洛川、长武、运城和延安冬小麦田土壤 含水量降低程度和深度逐渐增加。

在只有最高气温发生变化的情况下 [图 5(b)],在0~1.0 m土层,2001—2010年,洛 川、长武、运城、延安的冬小麦田土壤含水量均比 1961—1970 年降低了 0~1.0%。最高 气温的略微升高导致黄土高原 0~1.0 m土层土壤含水量降低,其中洛川冬小麦田土壤剖 面含水量降低的土层深度和程度最低。



图 5 与1961—1970年相比,2001—2010年黄土高原冬小麦田不同土层逐月土壤水分减少量(%) Fig. 5 Soil water reduction in different soil layers in winter wheat field on the Loess Plateau during 2001-2010 comparing with 1961-1970

在仅最低气温发生变化的情况下 [图 5(c)],与1961—1970年相比,2001—2010年洛 川、长武冬小麦田土壤含水量在1.5~3.5 m土层分别降低了0~2.0%、0~3.0%;运城、 延安的冬小麦田土壤含水量在1.0~4.0 m土层分别降低了1.0%~3.0%、2.0%~4.0%。

2.5 黄土高原冬小麦产量对降水和气温变化的响应

在仅降水量发生变化的气候情景下 [图 6(a)],黄土高原冬小麦产量呈波动性降低趋势。2001—2010年,洛川、长武、运城、延安的冬小麦产量平均值分别为4.19、3.76、3.16和2.50 t/hm²;与1961—1970相比,分别降低了8.5%、7.6%、11.7%和12.3%,降低程度依次增加。表明1961—2010年降水量的减少是导致黄土高原冬小麦产量降低的主要原因,其中,运城(半干旱区)和延安(干旱区)的冬小麦产量对降水变化更为敏感。

在仅最高气温发生变化的气候情景下 [图 6(b)],黄土高原冬小麦产量变化趋势因气候类型区的不同而不同。随着最高气温的升高,洛川、长武和运城的冬小麦产量均呈降低趋势,延安冬小麦产量呈增加趋势。2001—2010年,洛川、长武、运城、延安的冬小麦产量分别为3.86、3.76、3.49和3.14 t/hm²;与1961—1970年相比,洛川、长武、运城分别降低了 6.4%、6.8%和7.2%,延安增加了 3.0%。表明 1961—2010年最高气温的升高对洛川(湿润区)、长武(半湿润区)和运城(半干旱区)冬小麦的生产不利,但对延安(干旱区)冬小麦生产较为有利。

在仅最低气温发生变化的气候情景下 [图 6(c)],黄土高原冬小麦产量呈增加趋势。



图 6 1961—2010年黄土高原冬小麦产量对降水和气温变化的响应

Fig. 6 Response of winter wheat yield to precipitation and temperature on the Loess Plateau of China from 1961 to 2010

其中洛川、长武、运城、延安的冬小麦产量在2001—2010年分别为5.21、4.52、3.87和 3.57 t/hm²,与 1961—1970 年相比,分别增加了 8.8%、10.2%、1.5%和 12.0%。表明 1961—2010年最低气温升高对黄土高原冬小麦生产较为有利。

3 讨论

8期

3.1 EPIC 模型对冬小麦田土壤水分和小麦产量的模拟精度

EPIC模型自1984年在美国德克萨斯州黑土地研究中心发布以来,被世界各地广泛验证和应用。大部分研究认为EPIC模型能够模拟不同灌溉和施肥条件下的冬小麦平均产量和逐年产量^[17-20],也有研究认为EPIC模型能够模拟冬小麦产量长时间段内的平均值或中值,但不能很好地反映作物产量年际变化情况^[14-15]。我国对EPIC模型的验证和应用结果表明EPIC模型经修正后在正常年份模拟值较为精确,在黄土高原^[17,20-21]和华北平原^[22]作物生产潜力模拟研究中具有较好的适用性。本研究表明,EPIC模型能够较准确地模拟黄土高原旱地冬小麦产量,模拟值和观测值间的*RE*值为-1.5%。Williams等认为应用作物模型模拟研究作物产量时,需要对模型进行必要的校验和参数本地化^[18]。本研究所采用的土壤参数和小麦参数是依据长武长期定位实验数据获得的,所采用的气象数据来自长武气象站,这些基础数据为本研究中作物参数和土壤参数的准确性提供了很好的观测数据保障。本研究中模拟值与观测值间的*R²和ME*值分别为0.97和0.95,表明EPIC模型模拟的冬小麦产量能够反映黄土高原旱地冬小麦产量的年际变化。

李军等的研究表明小麦播种期土壤含水量模拟值和观测值间的相对误差为11.7%^[19]; 张玉娇等认为EPIC模型对黄土高原旱作粮田土壤水分含量平均值模拟较准确,并应用 EPIC模型模拟了不同轮耕模式的土壤含水量动态变化^[23]。本研究表明,EPIC模型对黄土 高原冬小麦田土壤水分含量模拟精度较高,*RRMSE*值为6.0%~14.0%。也有研究表明, EPIC模型在特旱和特湿润年份对土壤水分模拟精度相对较低¹¹³。浅层土壤水分受降水和 作物消耗影响较大,尤其容易受降水的影响,本研究表明,EPIC模型对0~0.5 m 土层 土壤水分含量模拟精度相对较低,与0.5~2.0 m土层相比,*ME*值和*R*²值差异在0~0.5 m 土层较大。

3.2 黄土高原冬小麦田土壤水分对降水量和气温变化的响应

蒲金涌等对甘肃省1971—2000年气象数据和土壤水分数据的分析结果表明,受降水 量减少的影响,甘肃黄土高原土壤含水量呈降低趋势,0~2.0 m土层土壤总贮水量春、 秋季减少了40~90 mm,夏季减少了20~36 mm^[24]。杨小利的研究结果也表明,春季是 土壤水分减少最明显的季节^[25]。本研究表明,在仅降水量变化的情况下,洛川、长武、 运城、延安的冬小麦田0~4.0 m土层土壤有效含水量在2001—2010年比其在1961—1970 年分别减少247、109、131和124 mm [图4(a)],这与前人的研究结果相似。同时本研究 也表明,土壤水分的减少主要集中在1.0~4.0 m土层,降水量的减少导致冬小麦对深层 土壤水分的消耗 [图5(a)]。

影响土壤水分的气象因子以降水、蒸发为主,气温通过影响蒸发间接产生影响^[25]。 土壤湿度与气温之间存在负反馈关系,与降水之间存在正反馈关系^[26]。温度是除降水外影 响黄土高原土壤水分变化的另一主要因素,相关研究表明气温变化对土壤水分变化的贡 献率达到6.7%^[27]。黄土高原西峰随着平均气温的上升,年蒸发量总体呈增加趋势,平均 每10 a增加9.3 mm^[28]。就表层土壤而言,各季土壤水分与本季和前季乃至前1 a气温均呈 负相关,与降水量呈正相关;就较深层土壤而言,土壤水分与降水和气温的相关性因季 节而异^[29]。本研究表明,日最高气温的升高导致黄土高原冬小麦田土壤有效含水量减少 1.0%~3.0%;日最低气温的升高导致冬小麦田土壤有效含水量减少7.0%~11.0%。李军 等的研究表明,化肥的过量投入使冬小麦对深层土壤水分过度消耗,最终导致旱地高产 冬小麦田的土壤干燥化现象^[50]。本研究表明,日最高气温的升高导致黄土高原冬小麦田 0~1.0 m土层土壤含水量减少0~1.0%;日最低气温的升高导致深层土壤含水量在1.0~ 3.0 m土层减少1.0%~4.0%。因此,降水量的减少和最低气温的升高,也是冬小麦对深 层土壤水分消耗增加的原因之一。

3.3 黄土高原冬小麦产量对降水量和气温变化的响应

本研究表明,在仅降水量发生变化的情况下,2001—2010年,洛川、长武、运城、延安的冬小麦产量比1961—1970年分别减少8.5%、7.6%、11.7%和12.3%,降水量的减少不利于黄土高原冬小麦生产,这与姚玉璧等^[28]和王位泰等^[31]的研究结果相似。冬小麦作为越冬作物,冬季持续低温不利于其生长,温度过低会导致低温胁迫,冬季气温的升高有利于其安全越冬。冬春季节气温的升高使冬小麦越冬死亡率显著降低,冬小麦水分利用率呈升高趋势^[32]。气候变暖使董志塬冬小麦春季发育期提前,越冬期显著缩短^[7,10]。王志强等基于EPIC模型,模拟了中国北方80个典型站点春小麦和冬小麦1961—2005年的生长过程。结果表明,在不考虑农业技术因素条件下,辐射波动是导致小麦产量波动的主要原因,温度胁迫的降低在一定程度上促进了小麦增产^[33]。本研究表明,在仅日最高气温发生变化的情况下,2001—2010年洛川、长武和运城的冬小麦产量分别比1961—1970年减少6.4%、6.8%和7.2%,延安则增加了3.0%。在仅日最低气温发生变化的情况下,洛川、长武、运城、延安的冬小麦产量在2001—2010年分别增加8.8%、10.2%、

1.5%和12.0%。总体而言,日最高气温的升高不利于黄土高原冬小麦产量的提高,而日 最低气温的提高则有利于黄土高原冬小麦产量的提高。

4 结论

8期

 1)虽然EPIC模型模拟的0~0.5 m土层土壤含水量模拟精度相对较低,但总体而 言,EPIC模型能够较好地模拟黄土高原冬小麦田土壤水分动态变化规律。

2)降水量的减少导致洛川、长武、运城、延安的冬小麦田0~4.0 m土层土壤有效 含水量显著降低,其中1.0~3.0 m土层土壤水分降低最多。日最高气温的升高导致黄土 高原冬小麦田0~1.0 m土层土壤水分减少0~1.0%;日最低气温的升高导致深层土壤水 分在1.0~3.0 m土层减少1.0%~4.0%。

3) 降水量的减少导致洛川、长武、运城、延安的冬小麦产量降低7.6%~12.3%; 日 最高气温的升高导致冬小麦产量减少-3.0%~7.2%; 而日最低气温的升高使冬小麦产量 增加1.5%~12.0%。

参考文献(References):

- 范颖丹. 不同覆盖和秸秆还田方式对旱地小麦土壤水分的影响 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013. [FAN Y D. Effects of Different Mulching and Straw Returning Methods on Soil Moisture in Dryland Wheat. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013.]
- [2] 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. [LÜ M R, LI Z J, ZHANG T, et al. Effects of minimum or no-tillage system and straw returning on extreme soil moisture and yield of winter wheat. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 41-46.]
- [3] 王红丽, 宋尚有, 张绪成, 等. 半干旱区旱地春小麦全膜覆土穴播对土壤水热效应及产量的影响 [J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5580-5588. [WANG H L, SONG S Y, ZHANG X C, et al. Effects of using plastic film as mulch combined with bunch planting on soil temperature, moisture and yield of spring wheat in a semi-arid area in drylands of Gansu, China. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5580-5588.]
- [4] 范颖丹, 柴守玺, 程宏波, 等. 覆盖方式对旱地冬小麦土壤水分的影响 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(11): 3137-3144.
 [FAN Y D, CHAI S X, CHENG H B, et al. Effects of mulching on soil moisture in a dryland winter wheat field, Northwest China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(11): 3137-3144.
- [5] 俄有浩,施茜,马玉平,等.未来10年黄土高原气候变化对农业和生态环境的影响 [J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5542-5552. [E Y H, SHI Q, MA Y P, et al. The impacts of future climatic change on agricultures and eco-environment of Loess Plateau in next decade. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5542-5552.]
- [6] LI F J, WU N Q. Pliocene land snail record from western Chinese Loess Plateau and implications for impacts of the summer insolation gradient between middle and low latitudes on the East Asian summer monsoon [J]. Global and Planetary Change, 2010, 72(1/2): 73-78.
- [7] 郭海英, 赵建萍, 索安宁, 等. 陇东黄土高原农业物候对全球气候变化的响应 [J]. 自然资源学报, 2006, 21(4): 608-614. [GUO H Y, ZHAO J P, SUO A N, et al. Response of agricultural phenospectrum to global climate change in Loess Plateau of east Gansu Province. Journal of Natural Resources, 2006, 21(4): 608-614.]
- [8] 万信, 王润元, 李宗䶮. 陇东黄土高原塬区农业气象要素的变化特征 [J]. 生态学杂志, 2007, 3(3): 344-347. [WAN X, WANG R Y, LI Z Y. Variation characters of agrometeorological elements in Loess Plateau of East Gansu. Chinese Journal of Ecology, 2007, 3(3): 344-347.]
- [9] 延军平,张红娟,蒋毓新. 黄土丘陵沟壑区县域气候生产力对气候变化的响应——以陕北米脂县为例 [J]. 干旱区研究, 2008, 25(1): 59-63. [YAN J P, ZHANG H J, JIANG Y X. Response of climate productivity to change climate at county level in the hilly-gully regions in the Loess Plateau—A case study in Mizhi County, North Shaanxi Province. Arid Zone Research, 2008, 25(1): 59-63.]

- [10] 郭海英, 万信, 黄斌. 气候变化背景下陇东塬区麦田土壤水分变化及生产特征研究 [J]. 水土保持通报, 2008, 28(3):
 77-80. [GUO H Y, WAN X, HUANG B. Ecological response of soil moisture in wheat fields to climate change in eastern Gansu Province. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(3): 77-80.]
- [11] WILLIAMS J R, JONES C A, DYKE P T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity [J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(1): 129-144.
- [12] WILLIAMS J R, JONES C A, KINIRY J R, et al. The EPIC crop growth model [J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32
 (2): 497-511.
- [13] WANG X C, LI J, MUHAMMAD N T, et al. Validation of the EPIC model and its utilization to research the sustainable recovery of soil desiccation after alfalfa (*Medicago sativa* L.) by grain crop rotation system in the semi-humid region of the Loess Plateau [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2012, 161(41): 152-160.
- [14] STOCKLE C O, DYKE P T, WILLIAMS J R, et al. A method for estimating the direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield of crops: Part II—Sensitivity analysis at three sites in the Midwestern USA [J]. Agricultural Systems, 1992, 38(3): 239-256.
- [15] STOCKLE C O, WILLIAMS J R, ROSENBERG N J, et al. A method for estimating the direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield of crops: Part I—Modification of the EPIC model for climate change analysis [J]. Agricultural Systems, 1992, 38(3): 225-238.
- [16] IZAURRALDE R, WILLIAMS J R, MCGILL W. Modeling soil organic carbon changes in CRP land and a long term crop rotation trial with EPIC [R]. Maryland: Joint Global Change Research Institute, 2004: 188-196.
- [17] 王宗明, 梁银丽. 应用EPIC模型计算黄土塬区作物生产潜力的初步尝试 [J]. 自然资源学报, 2002, 17(4): 481-487.
 [WANG Z M, LIANG Y L. The application of EPIC model to calculate crop productive potentialities in loessic yuan region. Journal of Natural Resources, 2002, 17(4): 481-487.]
- [18] WILLIAMS J R. The EPIC Model [C]// SINGH V P. Computer Models of Watershed Hydrology. Highlands Ranch: Water Resources Publications, 1995: 909-1000.
- [19] 李军, 邵明安, 张兴昌. 黄土高原旱塬地冬小麦水分生产潜力与土壤水分动态的模拟研究 [J]. 自然资源学报, 2004, 19(6): 738-746. [LI J, SHAO M A, ZHANG X C. Simulation of water potential productivity of winter wheat and soil water dynamics on rainfed highland of the Loess Plateau. Journal of Natural Resources, 2004, 19(6): 738-746.]
- [20] WANG X C, HAO M D, MUHAMMAD N T, et al. Sustainable recovery of soil desiccation in semi-humid region on the Loess Plateau [J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(8): 1262-1270
- [21] 蒋斌,李军,王学春,等.不同施肥水平下宝鸡旱塬连作冬小麦产量与深层土壤水分效应的模拟研究 [J].西北农林 科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(8): 73-83. [JIANG B, LI J, WANG X C, et al. Simulation of yield and deep soil water effects of winter wheat field under different fertilization levels in Baoji dry-land of the Loess Plateau. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2008, 36(8): 73-83.]
- [22] 范兰, 吕昌河, 王学春, 等. EPIC 模型对华北平原冬小麦和夏玉米生长和产量模拟的适用性评价 [J]. 麦类学报, 2014, 34(12): 1677-1684. [FAN L, LÜ C H, WANG X C, et al. Applicability of EPIC model on simulation of growth and yield of winter wheat and summer maize in the North China Plain. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34(12): 1677-1684.]
- [23] 张玉娇, 李军, 郭正, 等. 渭北旱塬麦田保护性轮耕方式的产量和土壤水分效应长周期模拟研究 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(14): 2730-2746. [ZHANG Y J, LI J, GUO Z, et al. Long-term simulation of winter wheat yield and soil water response to conservation tillage rotation in Weibei Highland. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(14): 2730-2746.]
- [24] 蒲金涌,姚小英,邓振镛,等. 气候变化对甘肃黄土高原土壤贮水量的影响 [J]. 土壤通报, 2006, 37(6): 1086-1090.
 [PU J Y, YAO X Y, DENG Z Y, et al. Impact of climatice change on soil water content in Loess Plateau, Gansu. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(6): 1086-1090.]
- [25] 杨小利. 陇东黄土高原土壤水分演变及其对气候变化的响应 [J]. 中国沙漠, 2009, 29(2): 305-311. [YANG X L. Evolution of soil moisture and its response to climate change in Longdong Loess Plateau. Journal of Desert Research, 2009, 29(2): 305-311.]
- [26] 蒋冲, 王飞, 穆兴民, 等. 黄土高原农田土壤湿度演变及其与气候变化的响应关系 [J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30
 (3): 234-243. [JIANG C, WANG F, MU X M, et al. Soil moisture change and its response to climate change in cropland

on the Loess Plateau. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(3): 234-243.]

- [27] 张勃, 张调风. 1961—2010年黄土高原地区参考作物蒸散量对气候变化的响应及未来趋势预估 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(3): 733-740. [ZHANG B, ZHANG T F. Responses of reference crop evapotranspiration in Loess Plateau of Northwest China to climate change in 1961–2010 and estimation of future trend. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32 (3): 733-740.]
- [28] 姚玉璧, 王瑞君, 王润元, 等. 黄土高原半湿润区玉米生长发育及产量形成对气候变化的响应 [J]. 资源科学, 2013, 35(11): 2273-2280. [YAO Y B, WANG R J, WANG R Y, et al. Growth and yield of corn under climate change in the semi-humid region of the Loess Plateau. Resources Science, 2013, 35(11): 2273-2280.]
- [29] 赵红岩, 张旭东, 王有恒, 等. 陇东黄土高原气候变化及其对水资源的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(6): 262-268. [ZHAO H Y, ZHANG X D, WANG Y H, et al. Climate change and their impact on water resources in the Loess Plateau of east Gansu. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(6): 262-268.]
- [30] 李军, 陈兵, 李小芳, 等. 黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地深层土壤干燥化效应 [J]. 生态学报, 2007, 27(1): 75-89.
 [LI J, CHEN B, LI X F, et al. Effects of deep soil desiccations on alfalfa grasslands in different rainfall areas of the Loess Plateau of China. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(1): 75-89.]
- [31] 王位泰, 张天锋, 姚玉璧, 等. 黄土高原夏半年降水气候变化特征及对作物产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 154-159. [WANG W T, ZHANG T F, YAO Y B, et al. Climate change character of precipitation during the half year of summer and its impact on crop yield in the Loess Plateau. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26 (1): 154-159.]
- [32] 姚玉璧, 王润元, 杨金虎, 等. 黄土高原半湿润区气候变化对冬小麦生长发育及产量的影响 [J]. 生态学报, 2012, 32 (16): 5154-5163. [YAO Y B, WANG R Y, YANG J H, et al. Impacts of climate change on growth and yield of winter wheat in the semi-humid region of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(16): 5154-5163.]
- [33] 王志强,方伟华,何飞,等.中国北方气候变化对小麦产量的影响——基于 EPIC 模型的模拟研究 [J]. 自然灾害学报, 2008, 17(1): 109-114. [WANG Z Q, FANG W H, HE F, et al. Effect of climate change on wheat yield in northern China: A research based on EPIC model. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(1): 109-114.]

Simulation of the Response of Soil Water in Winter Wheat Field and Winter Wheat Yield to Rainfall and Temperature Change on the Loess Plateau

WANG Xue-chun^{1a}, LI Jun², WANG Hong-ni^{1b}, HAO Ming-de²

(1. a. School of Life Science and Technology, b. College of Adult and Online Education,

Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: There is great meaning to research the impacts of rainfall and temperature changes on soil water and grain yield of winter wheat on the Loess Plateau of China, with the objective of ensuring the safety of grain production in China. EPIC model was used to simulate the response of soil water and winter wheat yield to rainfall and temperature changes in different regions on the Loess Plateau of China. The results are: 1) The EPIC model simulated soil water content well in the 0–2 m soil layer, the RRMSE value between the simulated values and measured values being 6.0%–14.0%; the mean value of R^2 was 0.824 which was close to the value of *ME* (0.815). 2) There was a descending trend of rainfall and an ascending trend of temperature from 1976 to 2010 on the Loess Plateau of China. Compared with those during 1961-2000, rainfall decreased 13.6%-24.9% in Luochuan, Changwu, Yuncheng and Yan' an during 2001-2010, the maximum temperature increased 0.30-0.84 °C, while the minimum temperature increased 1.00-1.55 °C during 2001-2010. 3) Both the increasing of maximum temperature and the decreasing of rainfall were harmful to the production of winter wheat, while the increasing of minimum temperature was good to the production of winter wheat on the Loess Plateau. Due to the descending of rainfall, winter wheat yield in Luochuan, Changwu, Yuncheng and Yan' an decreased 8.5%, 7.6%, 11.7% and 12.3% respectively. The increasing of the highest temperature made winter wheat yield decrease 6.4%, 6.8%, 7.2% and - 3.0% respectively in Luochuan, Changwu, Yuncheng and Yan' an; while the ascending minimum temperature increased the winter wheat yield by 8.8%, 10.2%, 1.5% and 12.0% respectively in Luochuan, Changwu, Yuncheng and Yan' an. In conclusion, considering sustainable use of soil water and sustainable production of winter wheat, adjusting planting time properly and developing water conserving and saving technologies are two of the best ways to adapt the climate change and to ensure the sustainable production of winter wheat on the Loess Plateau of China.

Key words: rainfall; temperature; soil water; winter wheat; EPIC