

黄土高原晋南旱塬长时间序列冬小麦产量与 水量平衡要素动态变化

张锐¹, 张高斌², 黄明斌³

(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.山西省万荣县气象局, 山西 万荣 044200;

3.西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为揭示黄土高原旱地冬小麦田长期产量及水文变化,以山西省万荣县连作冬小麦为研究对象,分析了冬小麦产量1951—2020年变化趋势及气候年际波动对产量的影响,同时利用 Hydrus-1D 模型和标定的模型参数模拟了1965—2020年田间水量平衡要素各分量的变化过程。结果表明:试验地冬小麦产量多年平均增产率是31.9 kg/(hm²·a),年际气候变化对冬小麦产量的影响达到±22.4%,其中影响最为显著的气象要素是生育期平均相对湿度和全年降水量;标定期和验证期 Hydrus-1D 模型的决定系数分别为0.65~0.68,0.57~0.65;近56 a冬小麦平均蒸腾量为(176±29) mm,土壤蒸发量为(296±28) mm 占降水量的60%~80%,渗漏量一般小于40 mm,土壤含水量变化为(-2±45) mm。综上,研究地70 a冬小麦产量呈上升趋势,且受年际气候变化的影响其产量波动较大。Hydrus-1D 模型能够较好地模拟晋南旱塬冬小麦田的水文变化情况,多年来研究地冬小麦田土壤含水量呈下降趋势。

关键词:Hydrus-1D 模型; 晋南旱塬; 冬小麦; 水量平衡

中图分类号:S512.1⁺1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)02-0142-07

Dynamic Changes of Winter Wheat Yield and Water Balance Elements of Dryland in Long Time Series in the Southern Shanxi on the Loess Plateau

ZHANG Rui¹, ZHANG Gaobin², HUANG Mingbin³

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling,

Shannxi 712100, China; 2.Wanrong Meteorological Bureau in Shanxi Province, Wanrong, Shanxi

044200, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi 712100, China)

Abstract: In order to understand the long-term yield and hydrological changes of dryland winter wheat fields in the Loess Plateau, the winter wheat grown in Wanrong County, Shanxi Province was used as the research sample to analyze the change trend of winter wheat production from 1951 to 2020 and the impact of interannual climatic fluctuations on wheat yield. At the same time, the Hydrus-1D model and the calibrated model parameters were used to simulate the changing process of each component of the field water balance elements from 1965 to 2020. The results showed that the annual average yield increase rate of winter wheat was 31.9 kg/(hm²·a), and the impact of interannual climate change on winter wheat yield was ±22.4%, among which the most significant meteorological factors were average relative humidity in growth period and annual precipitation; the determination coefficients of HYDRUS-1D model in standard period and validation period

收稿日期:2021-11-04

修回日期:2022-01-10

资助项目:中国科学院战略先导科技专项(B类)“黄土高原植被-水相互关系及其对气候变化的响应过程”(XDB40020202)

第一作者:张锐(1998—),女,河南灵宝人,硕士研究生,研究方向为土壤物理。E-mail:ruiizhang@qq.com

通信作者:黄明斌(1968—),男,湖北荆门人,博士,研究员,主要从事生态水文和土壤物理研究。E-mail:hmbd@nwsuaf.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

were 0.65~0.68 and 0.57~0.65, respectively; in recent 56 years, the change of transpiration in winter wheat was (176 ± 29) mm, the evaporation was (296 ± 28) mm, the leakage was generally less than 40 mm, and the change of soil water content was (-2 ± 45) mm. In conclusion, the yield of winter wheat in the study area showed an upward trend in the past 70 years, and its yield fluctuated greatly due to the impact of inter-annual climate change. The Hydrus-1D model can well simulate the hydrological changes of winter wheat fields in the dryland of southern Shanxi Province, and the soil water content in winter wheat fields has been decreasing for many years.

Keywords: HYDRUS-1D model; dry tableland in southern Shanxi; winter wheat; water balance

黄土高原南部是晋、陕、甘三省的重要粮食基地,该地区光热资源丰富,水资源缺乏,绝大部分地区实行旱作农业。晋南黄土旱塬是山西省主要的旱作农业区,该区主要粮食作物为冬小麦^[1],冬小麦产量的高低决定着当地粮食供应的稳定性。影响冬小麦产量的因素有人为因素(如施肥、品种改良、田间管理等)和自然因素,其中气象因素作为自然因素的重要组成部分,对冬小麦产量产生了至关重要的影响^[2-4]。由于水资源的极度缺乏,干旱是影响黄土旱塬区冬小麦产量的主要气象灾害^[5-6],因此,了解冬小麦产量和农田水量平衡要素的长期动态变化对科学利用降水水资源具有重要价值。在土层深厚的黄土高原,渗漏量、蒸散量等水文通量难以长期动态监测,利用模型模拟水文过程是一种重要的方法和手段,其中,Hydrus-1D模型已被广泛应用^[7-8]。本文对晋南旱塬冬小麦试验地70 a产量变化及气象影响因素进行分析,利用Hydrus-1D模型模拟晋南旱塬近56 a冬小麦田各水量平衡要素的变化通量,揭示56年来冬小麦田各水文变量的长期变化规律,可为晋南黄土旱塬区雨养农业稳定发展提供理论依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

选择山西省万荣县农业气象站长期冬小麦试验田作为研究对象,试验田位于山西省南部晋南黄土旱塬。该区域属暖温带大陆性季风气候,海拔高度400~800 m,年平均降水量506.7 mm,降雨分配差异明显,主要集中在7—10月,冬小麦生育期平均降水量仅180 mm左右。该地区土层深厚,透水、通气性能良好,土质为中碱性黏壤土^[9],属半干旱半湿润冬小麦种植区。

本研究所用的1951—2020年冬小麦产量和1964—2008年冬小麦田间土壤剖面水分数据均来自万荣县农业气象站冬小麦长期定位试验小区观测结果,1964—2020年气象数据来自该县农业气象站长期观测记录。

1.2 研究方法

1.2.1 趋势产量和年际产量波动的计算 趋势产量主要是反映历史时期生产力发展水平的长周期产量分量^[10],一般由作物品种、土壤肥力、农艺措施、管理方法等条件决定,表示作物产量的历史演变趋势,一般认为随着技术水平进步、经济社会发展而逐渐上升^[11]。可通过对实际产量进行回归分析,建立趋势产量的回归模型,得到每年的趋势产量:

$$y_t = ax + b \quad (1)$$

式中: y_t 为趋势产量(kg/hm^2); x 为年份; a 和 b 是回归系数。

气候的年际变化会改变农业生产的自然条件进而影响作物产量,因此作物产量中有年际气象要素变化影响的波动产量分量。实际产量减去趋势产量便得到年际波动产量:

$$y_w = y - y_t \quad (2)$$

式中: y_w 为年际波动产量(kg/hm^2); y 为实际产量(kg/hm^2)。

1.2.2 冬小麦叶面积指数(LAI)的计算 张宾等^[12]的研究表明,通过对冬小麦的LAI和生育天数进行归一化处理,可得到冬小麦相对化LAI模型,以预测冬小麦群体的LAI动态变化:

$$L_R = (0.013 + 0.004x) / (1 - 2.452x + 1.527x^2) \quad (3)$$

$$\text{LAI} = \text{LAI}_{\max} \cdot L_R \quad (4)$$

式中: L_R 为相对LAI值; x 为冬小麦相对生育时间; LAI_{\max} 为最大叶面积指数。

利用冯变娥^[13]、孙婴婴^[14]等在黄土高原地区的试验资料,建立了产量 $Y(\text{kg}/\text{hm}^2)$ 与 LAI_{\max} 的回归模型(R^2 为0.83),以确立每年冬小麦的最大叶面积指数:

$$\text{LAI}_{\max} = 0.0005Y + 1.017 \quad (5)$$

将通过(5)式求得的 LAI_{\max} 代入(4)式便可得到生育期内每天的LAI。

1.2.3 潜在蒸散量(PET)的计算 采用参考作物蒸散量和作物系数计算潜在蒸散量^[15],公式为:

$$PET = K_c \cdot ET_0 \quad (6)$$

式中: K_c 为作物系数; ET_0 为参考作物蒸散量。

使用软件 REF-ET,输入气象数据后选用 FAO-56PM 公式(0.12 m 参考作物)计算参考作物蒸散量 ET_0 。

K_c 的计算公式如下^[16]:

$$K_c = 0.396 + 0.876RDS + 2.316RDS^2 - 2.796RDS^3 \quad (7)$$

式中: RDS 为相对生育阶段。

1.2.4 模型设置 由于没有 1964 年以前的气象观测资料,因此模拟从 1965 年开始。本研究中的年份均为冬小麦生育年,即从第一年冬小麦收获后到第二年冬小麦收获为一年。根据我国冬小麦施肥历史演变过程^[17]以及施肥对土壤水力性质的潜在影响^[18],将模拟分为 4 个阶段,分别是 1965—1977 年(施用有机肥和氮肥),1978—1991 年(施用有机肥、氮肥和磷肥),1992—2005 年(施用氮肥、磷肥和钾肥施用)以及 2006—2020 年(配方施肥)。考虑到 Hydrus-1D 模型中时间变化是连续的,因此每个阶段选取连续两年(平水年)进行模型参数标定,分别为 1964—1965 年、1984—1985 年、1996—1997 年和 2007—2008 年,以获得不同阶段能反映土壤实际水力性质的水力参数。需要优化的参数有 θ_r (残余土壤含水量)、 θ_s (饱和土壤含水量)、 α (进气值倒数)、 n (孔径分布参数)、和 K_s (饱和导水率)。由于深层土壤(耕作层以下)受农田管理等因素影响较小,土壤水力性质变化可忽略,因此 4 个时期使用同一参数。

模型模拟过程中仅考虑水流运动、根系吸水和根系生长。

(1) 模型边界。模型上边界为大气边界,下边界为自由排水。依据高晓飞等^[19]的研究,按照万荣冬小麦种植密度 250 万株/hm²^[9],4 个生育期的消光系数取均值后,将模型的消光系数设置为 0.65。

(2) 根系吸水。根系吸水模型采用 Feddes 模型^[20],当土壤吸力小于 50 kPa 时,根系吸水系数最大;当土壤吸力大于 1 600 kPa 时,根系吸水速率为零;当土壤吸力位于 50~1 600 kPa 时,根系吸水速率随土壤吸力增大而线性降低^[21]。

(3) 土壤剖面离散。模型模拟剖面取 0—250 cm,考虑耕作对土壤剖面水力性质的影响,将剖面分为两层:耕作层(0—50 cm)和非耕作层(50—250 cm)。将模拟剖面按 1 cm 等间隔划分为 250 个单

元,土壤水分观测深度分别位于 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 cm 处,土壤水分观测数据用于模型参数标定和模型精度检验。

1.2.5 模型精度评价方法 本文采用以下 3 个指标来定量评价模型精度,分别为:

(1) 均方根误差(RMSE),反映模拟值与观测值绝对误差的平均程度。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{N}} \quad (8)$$

(2) 相对误差(RE),反映模拟值与观测值总量之间的相对误差。

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{\sum_{i=1}^N O_i} - 1 \quad (9)$$

(3) Nash 效率系数(NSE),反映模拟值与观测值随时间变化过程的符合程度。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

式中: N 为样本个数; S_i 为第 i 个样本的模拟值; O_i 为第 i 个样本的观测值; \bar{O} 为观测值的平均值。

1.2.6 水量平衡方程 研究区为旱地,无灌溉条件,且当地土层深厚,地下水位埋藏较深,降水是该地区农田水分的唯一来源^[22];又因为该地区地势相对平坦,土壤具有很强的入渗能力,地表不形成径流,因此本研究中冬小麦农田水量平衡方程可简化为:

$$P = Tr + E + \Delta S + D \quad (11)$$

式中: P 为降水量; Tr 为作物蒸腾量; E 为土壤蒸发量; ΔS 为土壤含水量的变化量; D 为深层渗漏量。

1.2.7 数据分析 本研究采用逐步回归分析建立因变量和自变量之间的线性回归方程。利用 SPSS 26.0 软件进行相关性和逐步回归分析。

2 结果与分析

2.1 冬小麦产量变化与影响因素

2.1.1 趋势产量 如图 1 所示,1951—2020 年冬小麦产量变化范围为 869.7~5 850 kg/hm²,多年平均产量为 2 631.4 kg/hm²,年平均增加 31.9 kg/hm²。冬小麦产量整体不高,在 20 世纪 80 年代急剧上升后,又在 90 年代后遇到几次下跌,虽总体呈现上升趋势,但是上升幅度较小且波动较大。这与万荣地区常年干旱且在进入 21 世纪后遭遇几次小麦病虫害有关^[23-24]。

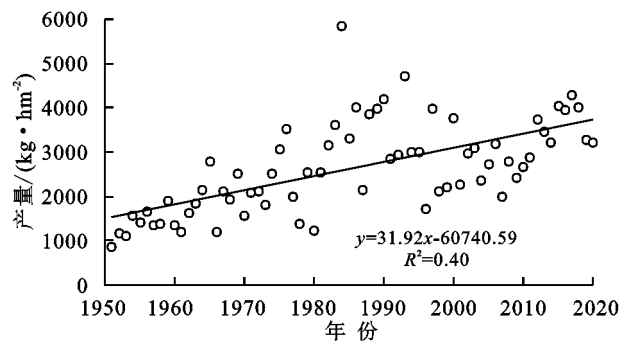


图1 山西万荣 1951—2020 年冬小麦趋势产量

2.1.2 气候年际变化对冬小麦产量的影响 由实际产量减去趋势产量得到冬小麦年际产量的波动见图2,受气象要素为主影响的产量平均波动范围为±589.6 kg/hm²,由此可得年际气候变化对冬小麦产量的影响达到±22.4%。

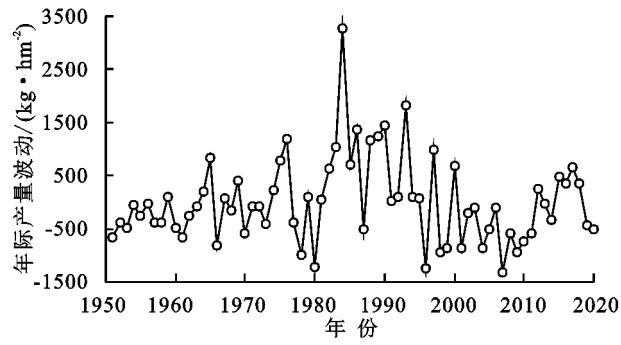


图2 山西万荣 1951—2020 年冬小麦年际产量波动

研究显示,影响冬小麦产量的气象因素主要有生育期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、生育期降水量、生育期 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、生育期日照时数、春季(3—5月)气温距平和春季降水距平等^[3,25-26]。综合考虑,本研究选取生育期平均气温、生育期平均日照时数、生育期平均相对湿度、生育期降水量、全年降水量、春季气温距平、春季降水距平、生育期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、生育期 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温共9个气象因子,分析其对山西万荣地区冬小麦产量的影响。9个气象因子与冬小麦年际波动产量的相关性见表1,全年降水量、生育期降水量、生育期平均气温、生育期平均相对湿度、春季气温距平、生育期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、生育期 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温7个气象因子均与产量的波动有显著相关性。其中,全年降水量、生育期降水量、生育期平均相对湿度为正相关,表明全年降水量、生育期降水量、生育期平均相对湿度的增加会对冬小麦产量有正向波动效应,即有助于提高冬小麦产量。而生育期平均气温、春季气温距平、生育期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、生育期 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温为负相关,表明随着这4个因素值的增加,冬小麦产量会有负向波动效应,即平均气温越高、春季气温距平、生育期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温、生育期 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温越大,冬小麦产量反而越低。平均气温越高、春季气温距平越大时,说明高温天气增多,加之万荣地区降水少,容易形成干热风灾害性天气,使冬小麦蒸腾加剧,根系吸水不及,严重时甚至枯萎死亡^[27],从而导致冬小麦产量下降。

表1 冬小麦年际波动产量与气象因素相关性分析

项目	年际波动 产量	全年 降水量	生育期 降水量	生育期平均 日照时数	生育期 平均气温	生育期 相对湿度	春季气温 距平	春季降水 距平	生育期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温	生育期 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温
年际波动产量	1	0.396 *	0.359 *	-0.125	-0.301 *	0.406 *	-0.355 *	0.126	-0.346 *	-0.334 *
全年降水量		1	0.495 *	0.062	-0.153	0.202	-0.158	0.166	-0.158	-0.157
生育期降水量			1	-0.097	-0.009	0.301 *	-0.058	0.515 *	-0.032	-0.028
生育期平均日照时数				1	-0.289 *	0.012	-0.153	-0.014	-0.218	-0.237
生育期平均气温					1	-0.562 *	0.893 *	-0.050	0.924 *	0.978 *
生育期平均相对湿度						1	-0.602 *	-0.004	-0.650 *	-0.630 *
春季气温距平							1	-0.134	0.937 *	0.943 *
春季降水距平								1	0.014	-0.043
生育期 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温									1	0.965 *
生育期 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温										1

注: * 表示在 0.05 级别相关性显著。

由于以上7个气象因素中有许多因素相互影响,因此本研究采用逐步回归分析,将引起多重共线性和回归不显著的因素剔除,建立最优的关系模型:

$$y_w = 55.03x_1 + 2.69x_2 - 4500.38 \quad (12)$$

式中: y_w 为年际波动产量; x_1 为生育期平均相对湿度; x_2 为全年降水量; $R^2=0.268$ 。由此可得,对山西万荣地区冬小麦产量影响最为显著的气象因素为生育期平均相对湿度和全年降水量,它们共同解释了影

响冬小麦产量差异的26.8%。

2.2 水量平衡要素的动态变化

2.2.1 模型参数标定 模型参数标定共分为4个阶段,优化后的模型参数见表2,标定期的模拟值与观测值的对比结果见图3。

结果显示,在进行参数优化后,4个阶段均有较低的RMSE值和RE值,分别为0.032~0.038 cm³/cm³和-1.1%~15.7%。由于土壤含水量本身的变

化范围较小,因此模型的 Nash 效率系数不会很高,标定期达到 0.38~0.65,均在可接受范围内。4 个标定期的决定系数 R^2 均大于 0.65,且回归系数 b 均接

近于 1,高相关系数和低误差表明模拟值与观测值的吻合度较好,模型能够很好地模拟冬小麦田间的

表 2 各阶段优化后的土壤水力参数

土层/cm	年份	$\theta_r/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_s/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	α	n	$K_s/(\text{cm} \cdot \text{d}^{-1})$
0—50	1964—1965	0	0.509	0.0160	1.290	75.0
	1984—1985	0	0.509	0.0166	1.295	77.1
	1996—1997	0	0.509	0.0165	1.308	77.1
	2007—2008	0	0.509	0.0150	1.270	78.0
50—250	1964—2020	0.053	0.506	0.0059	1.546	71.3

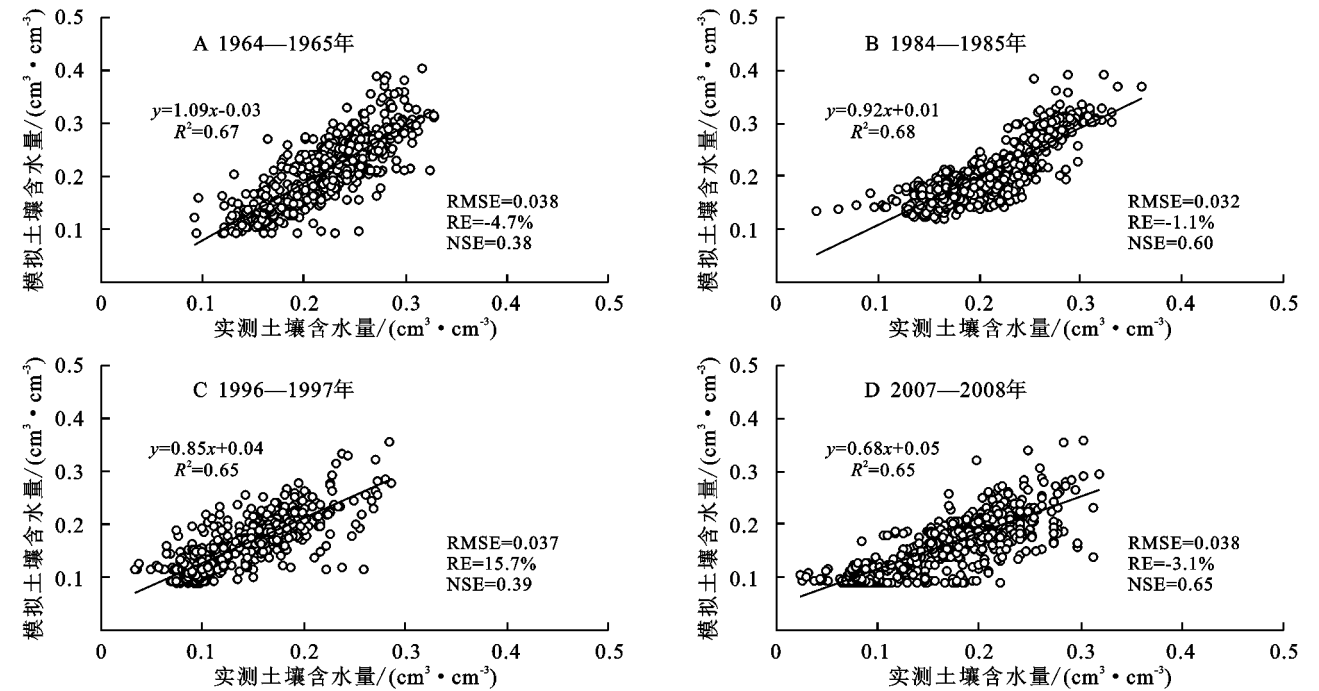


图 3 标定期模拟值与观测值对比结果

2.2.2 模型验证 在验证过程中,使用优化好的土壤水力参数值模拟 4 个阶段的土壤含水量,通过对模拟值与实测结果进行对比(图 4),验证所建立的数值模型的合理性。由于缺少 2009—2020 年的土壤水分实测数据,因此只对前 3 个阶段进行验证。结果表明, RMSE 值与 RE 值均为低值,分别为 0.037~0.043 cm^3/cm^3 , 0.1%~−5.0%。模型的 Nash 效率系数

与标定期相比略有提高,达到 0.50~0.62。决定系数 R^2 和回归系数 b 的值略有下降,这与验证期的样本数大幅提高有关。总体而言,模型误差均在合理范围内,且相关系数较高,表明实测与模拟土壤水分状况具有很好的一致性,Hydrus-1D 模型可以用于模拟山西万荣地区冬小麦田的土壤水文状况,能够为研究该地区水量平衡要素的动态变化提供重要工具。

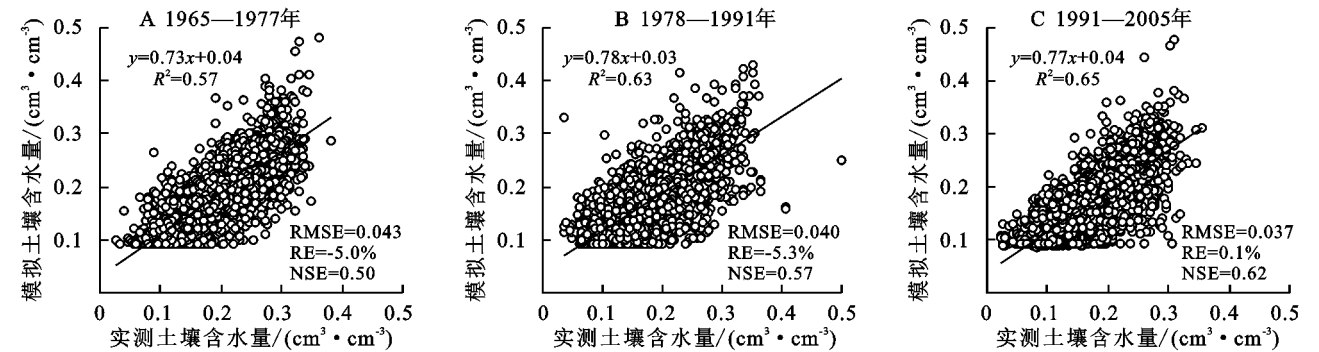


图 4 验证期模拟值与观测值对比结果

2.2.3 水量平衡要素的动态变化 使用优化、验证好的模型对晋南旱原冬小麦田 56 a(1965—2020 年)

水分状况进行模拟后,便得到 56 a 来冬小麦田各水量平衡要素的变化通量。由图 5 可知,渗漏量变化较小,多数年小于 40 mm,如遇降水量极大的年份,渗漏量会有较大的波动,可达 150~300 mm。降水量为 (507 ± 105) mm,作物蒸腾和土壤蒸发是农田水分消耗的主要形式,达到 (473 ± 47) mm,其中蒸腾量为 (176 ± 29) mm,蒸发量为 (296 ± 28) mm,蒸腾量和

蒸发量的波动与降水量基本一致。

在平水年,降水量的绝大部分以农田蒸散的形式被消耗,其中土壤蒸发量平均占降水量的 60%,在干旱年达到 70%~80%,此时蒸散量大于降水量,便会消耗土壤含水量,使得土壤含水量减少。56 a 来土壤含水量变化为 (-2 ± 45) mm,从其总和来看,56 a 土壤含水量呈减少趋势。

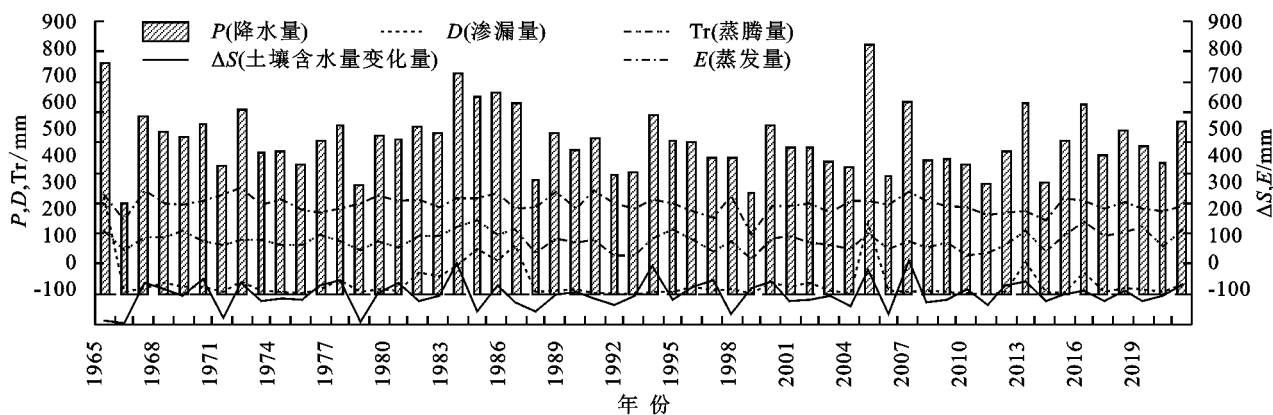


图5 1965—2020年降水量、渗漏量和蒸散量的动态变化

3 讨论

本文通过对晋南旱塬 70 a 冬小麦产量与气象要素进行相关性和逐步回归分析,得到影响其产量的主要气象因素,评估过去 70 a 尺度上气候变化对冬小麦产量的影响,为研究农业对气候变化的适应性奠定科学基础。此外,利用实测土壤含水量校正 Hydrus-1D 模型参数,并对 56 a 冬小麦田间各水量平衡要素变化进行模拟,结果显示,大量降水被土壤蒸发消耗,56 年来土壤含水量呈减少趋势,这与前人^[28-29]研究结果一致。晋南旱塬降水稀少又缺少灌溉条件,大量降水被土壤蒸发消耗,且冬小麦产量未有大幅度增长。因此减少土壤蒸发量和深层渗漏量,增加作物蒸腾量将有助于高效利用水资源、提高晋南旱塬冬小麦田的水分利用效率,有益于该地区农业的长期发展。

然而,本研究使用万荣县农业气象站长期试验观测的数据进行研究分析,为单一处理试验,仅研究长时间尺度下农田产量及水分动态变化,未考虑薄膜或秸秆覆盖、不同耕作方式等田间管理措施的不同对农田蒸散量、水分利用效率及产量的影响。前人研究显示,地膜和秸秆两种覆盖方式下的农田蒸散量均会比不覆盖农田有所减少,水分利用效率、产量分别有所提高^[30];免耕和深松较翻耕而言,土壤储水量、产量、水分利用效率分别有所提高^[31-32];高低畦的栽培方式会增强冬小麦对降水和土壤水的利用程度从而提升产量和水分利用效率^[33]。随着科学技术的大力推

广,适宜的农田管理措施被广泛应用。因此,在未来旱作农田产量变化、水量平衡动态的研究中,应当考虑秸秆覆盖、薄膜覆盖、免耕等提高作物产量、农田水分利用效率的田间管理措施所带来的影响。

4 结论

(1) 从山西万荣冬小麦趋势产量及年际产量波动可以看出,70 a 冬小麦产量多年平均增产率是 31.9 kg/(hm²·a),整体呈小幅度上升趋势。年际气候变化对冬小麦产量的影响达到 $\pm 22.4\%$ 。影响其产量的气象因子中全年降水量、生育期降水量和生育期平均相对湿度与冬小麦产量为正相关关系,生育期平均气温、春季气温距平、生育期 $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温和生育期 $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温则为负相关关系。对 7 个气象因子与产量进行逐步回归分析得到,影响最显著的是生育期平均相对湿度和全年降水量,它们共同解释了影响冬小麦产量差异因素的 26.8%。

(2) Hydrus-1D 模型对万荣地区 56 a 冬小麦田各水分通量的模拟结果显示,标定期和验证期 Hydrus-1D 模型的决定系数分别在 0.65~0.68,0.57~0.65,且误差均在合理范围内,因此模型可用于模拟晋南旱塬冬小麦田间水量变化。

(3) 56 年来冬小麦田水量平衡要素的动态变化显示,蒸腾量和蒸发量与降水量的波动基本一致,且降水量大部分土壤蒸发消耗。蒸腾量变化为 (176 ± 29) mm,蒸发量为 (296 ± 28) mm,渗漏量一般小于 40 mm,土壤含水量为 (-2 ± 45) mm 有下降趋势。

参考文献:

- [1] 高会议,郭胜利,刘文兆,等.黄土旱塬区冬小麦不同施肥处理的土壤呼吸及土壤碳动态[J].生态学报,2009,29(5):2551-2559.
- [2] 穆青云,李俊,何亮,等.青藏高原冬小麦生产潜力及其对气候变化的响应[J].干旱区资源与环境,2021,35(7):92-99.
- [3] 胡园春,安广池,杨宁,等.主要气象因子与冬小麦产量的灰色关联度分析[J].农学学报,2020,10(2):92-95.
- [4] 檀艳静.1981—2016年河南省冬小麦产量对气象因素变化的响应[J].气象与环境科学,2018,41(4):110-118.
- [5] 张可心,张谋草,刘翔,等.基于SPI的陇东黄土高原干旱特征及对冬小麦产量的影响分析[J].江苏农业科学,2020,48(23):233-240.
- [6] 褚清河,闫明,薛献来,等.春季干旱对旱地冬小麦生产的影响及施肥和灌溉的应对效果:以2003年和2009年山西垣曲县冬小麦生产的调查和试验观察为例[J].农业环境保护,2011,30(9):1772-1776.
- [7] 张洛丹,张瑜,黄明斌,等.黄土高原沟壑区两种乔木林土壤水分平衡的模拟[J].水土保持研究,2015,22(2):26-31.
- [8] 李冰冰,王云强,李志.HYDRUS-1D模型模拟渭北旱塬深剖面土壤水分的适用性[J].应用生态学报,2019,30(2):398-404.
- [9] 张淑容.万荣县水、旱地小麦产量形成的原因分析[J].山西农经,2020(20):115-116.
- [10] 岳伟,陈曦,伍琼,等.气候变化对安徽省淮北地区夏玉米气象产量的影响[J].长江流域资源与环境,2021,30(2):407-418.
- [11] 车晓翠,李洪丽,张春燕,等.1980年代以来气候变化对吉林省玉米产量的影响[J].水土保持研究,2021,28(2):230-234,241.
- [12] 张宾,赵明,董志强,等.作物高产群体LAI动态模拟模型的建立与检验[J].作物学报,2007,33(4):612-619.
- [13] 冯变娥,张风洁,乔俊芳,等.氮肥运筹对不同种植方式冬小麦群体结构及产量的影响[J].激光生物学报,2015,24(3):293-300.
- [14] 孙婴婴,韩霁昌,张岁岐,等.陕西省不同年代旱地冬小麦光合与产量特征变化及其相互关系研究[J].麦类作物学报,2016,36(3):308-315.
- [15] Allen R, Pereira L, Paes D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements[C]//FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998.
- [16] 黄明斌,邵明安,李玉山.一个改进的随机动力学水平衡模型及其应用研究Ⅱ.应用[J].水利学报,2000,31(6):27-33.
- [17] 谭德水,刘兆辉,江丽华.中国冬小麦施肥历史演变及阶段特征研究进展[J].中国农学通报,2016,32(12):13-19.
- [18] 王勤,孙孟瑶,遆建航,等.垦复结合施肥对毛竹林生长及土壤理化特性的影响[J].西北林学院学报,2020,35(4):13-17.
- [19] 高晓飞,谢云,王晓岚.冬小麦冠层消光系数日变化的试验研究[J].资源科学,2004,26(1):137-140.
- [20] Feddes R A, Kowalik P J, Zaradny H. Simulation of Field Water Use and Crop Yield[M]. New York: John Wiley & Sons, 1978.
- [21] 何康康,杨艳敏,杨永辉.基于HYDRUS-1D模型的华北低平原区不同微咸水利用模式下土壤水盐运移的模拟[J].中国生态农业学报,2016,24(8):1059-1070.
- [22] 张高斌,郭建茂,宁建东,等.万荣县冬小麦产量与气象条件的关系研究[J].山西农业科学,2013,41(1):78-81.
- [23] 贺春娟.万荣县麦蚜蝇的发生与防治[J].现代农业科技,2007(14):83-83.
- [24] 薛晶珍,白印珍.万荣县小麦田蝼蛄严重发生原因及防治技术[J].中国植保导刊,2007,27(3):12-13.
- [25] 史印山,王玉珍,池俊成,等.河北平原气候变化对冬小麦产量的影响[J].中国生态农业学报,2008,16(6):1444-1447.
- [26] 吴冰洁,王靖,唐建昭,等.华北平原冬小麦产量变异的气象影响因子分析[J].中国农业气象,2018,39(10):623-635.
- [27] 马雅丽,栾青,李伟伟,等.山西冬小麦干热风分布特征及对产量的影响[J].山西农业科学,2017,45(7):1134-1138.
- [28] 赵丽雯,赵文智.西北绿洲农田玉米水量平衡和水分运移规律[J].科学通报,2014,59(34):4829-4837.
- [29] 胡伟,陈豫.黄土高原半干旱区旱作农田土壤干燥化研究[J].河南农业科学,2013,42(4):75-79.
- [30] 胡芬,陈尚模.寿阳试验区玉米地农田水分平衡及其覆盖调控试验[J].农业工程学报,2000,16(4):146-148.
- [31] 郭星宇,王浩,于琦,等.耕作对渭北旱塬小麦-玉米轮作田土壤水分和产量的影响[J].中国农业科学,2021,54(14):2977-2990.
- [32] 张霞,张育林,刘丹,等.种植方式和耕作措施对土壤结构与水分利用效率的影响[J].农业机械学报,2019,50(3):250-261.
- [33] 刘俊明,高阳,司转运,等.栽培方式对冬小麦耗水量、产量及水分利用效率的影响[J].水土保持学报,2020,34(1):210-216.