

未来气候变化对关中地区冬小麦耗水和产量的影响模拟

张 延¹, 任小川², 赵 英³, 曹 寒¹, 冯 浩^{4,5}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 陕西省咸阳市乾县农经站, 陕西 乾县 713300;
3. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 4. 中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100;
5. 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 采用 IPCC 第四次评估报告给出的 SRA1B、SRA2 和 SRB1 3 种气体排放情景, 选用 HadCM3、IPCM4、MPEH5、NCCCSM 4 种大气环流模式, 利用随机天气发生器 LARS-WG 生成逐日气象资料, 结合 DSSAT 模型, 模拟历史(1961—2010 年)和未来(2011—2030、2046—2065、2080—2090 年)气候变化下灌溉与不灌溉条件下冬小麦生育期、耗水量及产量的变化情况。模拟结果显示: 未来气候变化情景下, 冬小麦生育期内平均气温上升, 降雨量下降, 2011—2030、2046—2065、2080—2090 年 3 个时间段内平均气温分别上升 0.93℃、1.76℃、2.87℃, 降雨量分别下降 27.40、39.37、42.50 mm。灌溉和不灌溉条件下冬小麦生育期内耗水量和产量较现状均下降, 其中灌溉条件下分别减少 5.16% 和 8.63%, 不灌溉条件下减少 9.58% 和 13.76%。无论何种气候变化情景, 灌溉和不灌溉方式下冬小麦生育期均缩短且与生育期内的平均气温呈现较好的负相关性, 生育期内降水量与耗水量、降水量与产量、耗水量与产量均具有较好的正相关性。

关键词: 未来气候变化; 冬小麦; 耗水量; 产量; DSSAT 模型

中图分类号: S162; S512.1⁺1 **文献标志码:** A

Impact and simulation of climate change on water consumption and yield of winter-wheat in Guanzhong Region

ZHANG Yan¹, REN Xiao-chuan², ZHAO Ying³, CAO Han¹, FENG Hao^{4,5}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Agricultural Economy Management Station of Qianxian County, Xianyang, Shaanxi 713300, China;
3. College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
4. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Regions of China, Yangling, Shaanxi 712100, China;
5. National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Study the effects of climate change on water consumption and yield of winter wheat is significant for mitigating the negative impact of climate change, ensuring food security and the sustainable utilization of water resources. This paper applied the LARS-WG weather generator to simulate synthetic weather data under the SRA1B, SRA2, SRB1 emission scenarios from Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC) using the results of General Circulation Model HadCM3、IPCM4、MPEH5 and NCCCSM. Furthermore, DSSAT model was combined to simulate the change of winter wheat growth period、yield and water consumption under irrigation and non-irrigation conditions at the history(1961—2010) and future (2011—2030、2046—2065、2080—2090) climate change scenarios. Simulation results showed that, the average temperature will increase, the precipitation will decrease during the growth season under climate change scenarios in the future. Average temperature will increase by 0.93℃, 1.76℃ and 2.87℃, and rainfall will drop by 27.40 mm, 39.37 mm and 42.50 mm respectively in three periods(2011—2030, 2046—2065, 2080—2090). Water con-

收稿日期: 2014-11-25
基金项目: 国家 863 计划项目(2013AA102904); 高等学校学科创新引智计划资助(B12007)
作者简介: 张 延(1988—), 女, 河北保定人, 硕士, 主要从事雨水资源高效利用及作物模型方面的研究。E-mail: zhangyan_0929@sina.cn。
通信作者: 冯 浩(1970—), 男, 陕西延安人, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土资源高效利用方面的研究。E-mail: nercwsi@vip.sina.com。

sumption and yield will decrease in both irrigation and non-irrigation conditions under different climate scenarios (irrigation condition will reduce by 5.16% and 8.63%, while non-irrigation condition will reduce by 9.58% and 13.76%). Regardless of climate change scenarios, winter wheat growth period will be shortened under both irrigation and non-irrigation conditions and it correlates negatively with average temperature, whereas positive correlation existed between precipitation and water consumption, rainfall and yield, and water consumption and yield.

Keywords: climate change; winter wheat; water consumption; yield; DSSAT model

近年来,气候变化已成为全球性话题,引起了世界各国的关注^[1-3]。气温升高、CO₂ 浓度增加及降水不均匀等因素的变化对我国农业生产及生态已产生重大影响^[4]。气候变化引起了作物生长发育、产量及耗水量的改变。冬季气温升高,热量资源增加,导致北方旱区冬小麦种植区向北扩展,其越冬安全受到气候变化的威胁;同时,降雨量的减少导致水资源严重不足,使得该地区干旱加剧^[5-6]。

在探讨气候变化对作物潜在蒸腾量和耗水量的影响时,Penman – Monteith 公式和作物单系数法多被用于研究中^[7-8],而将未来气候信息和作物模型相结合的方法则具有可定量、动态地描述作物生长及耗水情况的特征,因此后一种研究方法是一种快速且有广阔前景的方法。模拟作物的生长、耗水及产量的作物模型主要有 WOFOST^[9]、APSIM^[10]、CERES^[11]、CropSyst^[12]和 ORYZA2000^[13]等。Wang^[14]借助 APSIM 模型研究了气候变化对小麦生长的影响和极端气候变化下的农田水分平衡状况。利用将气候变化情景与 ORYZA 模型相结合的方法,王卫光^[15]研究了气候变化下水稻耗水量、灌水量及产量的响应规律。

对于气候变化的预估主要以大气环流模式(GCMs, General circulation models)为主, HadCM3 大气环流模式、IPCM4 大气环流模式等在研究作物耗水量和产量方面得到了较为广泛的应用^[15-17]。对于气候变化多采用 SERS(Special report on emission scenarios)系列情景加以表达^[18]。其中 SRA1B 情景主要特征为人口增加缓慢,经济增长迅速,新技术得到应用^[19];SRA2 情景主要特征为人口持续增加,经济增长和技术更新缓慢^[20];SRB1 情景主要特征为人口增加缓慢,可实现经济、社会、环境的持续发展^[21]。

本文主要利用 IPCC 第四次评估报告给出的 SRA1B、SRA2 和 SRB1 排放情景下的大气环流模式(HadCM3、IPCM4、MPEH5、NCCCSMS)结果,并选择统计降尺度方法中的天气发生器作降尺度处理生成逐日气象资料,结合经田间试验资料率定过的 DSSAT 模型,模拟历史及未来气候变化下灌溉与不灌溉条

件下冬小麦生育期、需水量与产量的变化情况,为定量评估气候变化对作物水分与产量的影响提供新的技术手段。

1 材料与方法

1.1 田间试验

本试验地点位于陕西省杨凌区西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室灌溉试验站(N108°24', E34°20'),海拔 521 m。该地区年平均气温 13℃,降水量 660 mm 左右。土壤质地为中壤土,平均容重为 1.44 g·cm⁻³,地下水埋藏较深,忽略其向上补给量。

试验于 2008 年 10 月到 2010 年 6 月进行,小麦品种为小偃 22。2008 年于 10 月 15 日播种,2009 年 6 月 7 日收获,施尿素(N≥46%)25 kg·667m⁻²,磷酸二铵(P₂O₅ 44%、含 N 16%)25 kg·667m⁻²。2009 年于 10 月 17 日播种,2010 年 6 月 14 日收获,施尿素(N≥46%)30 kg·667m⁻²,磷酸二铵(P₂O₅ 44%、含 N 16%)30 kg·667m⁻²。试验监测的主要指标有:气象资料、土壤水分、土壤有机质与养分含量、作物生长动态状况及产量等。

1.2 DSSAT 模型及其参数率定

DSSAT(Decision support system for agrotechnology transfer)模型是目前使用最广泛的模型之一,被国内外许多研究人员广泛应用^[22-24]。模型通过输入气象资料、土壤数据、田间管理措施及作物品种遗传特性参数,对作物的生长发育过程、作物地上器官和根系生长、土壤水分平衡、土壤碳、氮平衡等进行模拟。

DSSAT 模型中冬小麦主要参数包括春化敏感系数、光周期敏感系数、灌浆期特性系数、籽粒数特性系数、标准籽粒重系数、成熟期单株茎穗重系数、出叶间隔特性系数。根据 2008—2009 年试验实测数据,以冬小麦生育期和产量为目标对 DSSAT 模型进行参数调试,得到各参数结果为 34.73、109.2、591.4、17.79、52.81、1.924、94.6,然后采用经过率定的参数对 2009—2010 年的试验数据进行验证,结果表明模型对冬小麦生育期及产量的模拟结果与实测值较为接近^[25]。由表 1 可以看出,冬小麦两年开花

期和成熟期的模拟值和实测值误差不超过 2 d,产量 的模拟值和实测值差异不超过 5%。

表 1 关中地区 2008—2010 年冬小麦生育期及产量模拟值与实测值对比
Table1 Comparison between simulated and observed growing stage and yield of winter wheat in Guangzhong Region

项目 Items	2008—2009			2009—2010		
	实测值 Observed value	模拟值 Simulation value	误差 Difference	实测值 Observed value	模拟值 Simulation value	误差 Difference
开花期 Anthesis stage/d	195	194	- 1	197	197	0
成熟期 Maturity stage/d	232	232	0	237	236	- 1
产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	5652	5617	35(- 1%)	6194	5944	- 250(- 4%)

1.3 未来气象数据的生成

武功站 1961—2010 年逐日最高气温、最低气温、降水量来自中国气象科学共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>), 太阳辐射利用国际上公认的 Angstrom(艾斯屈郎)经验公式计算得到。未来气象 HadCM3^[26]、IPCM4^[27]、MPEH5^[28]、NCCCSMS^[29] 4 种大气环流模式和 SRA1B、SRA2 和 SRB1 3 种排放情景气象数据选择统计降尺度方法 LARS - WG(Long ashton research station weather generator)随机天气发生器^[30-31]作降尺度处理生成逐日气象资料。LARS - WG 天气发生器是由英国洛桑实验室开发的,其可以根据某一地区历史气象资料和地形资料的统计特征生成未来若干年的最高气温、最低气温、降雨量和太阳辐射的日序列气象资料。此外,本研究选用由

不同国家开发的大气环流模式可以避免仅使用一种大气环流模式的不确定性。

图 1 为 LARS - WG 天气发生器 1961—2010 年月平均气温及降雨量观测值和模拟值的比较,并采用均方根误差法 *RMSE* 来衡量观测值和模拟值的相对差异(一般认为:*RMSE* < 10%,为极好;10% < *RMES* < 20%,为好;20% < *RMSE* < 30%,为中等;*RMSE* > 30%,为差)。1961—2010 年月平均气温观测值和模拟值的相对差异 *RMSE* = 1.4%,降雨量观测值和模拟值的相对差异 *RMSE* = 9.9%,两者均小于 10%,并且平均气温的模拟结果好于降雨量的模拟结果。总体来说,LARS - WG 天气发生器在关中地区可以用来预测该地区未来气象资料以驱动 DSSAT 模型。

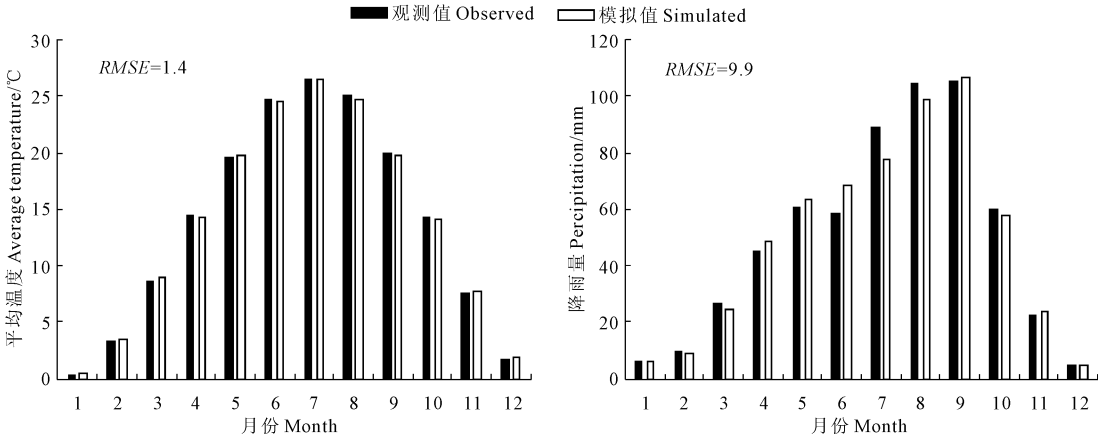


图 1 基于 LARS - WG 的 1961—2010 年月平均气温、降雨量观测值与模拟值的比较

Fig.1 Comparison of simulated and observed monthly average temperature, precipitation in the baseline period 1961—2010

1.4 模拟方案的设定

本研究考虑灌溉和不灌溉两种方式。灌溉条件通过分析关中地区近 30 年冬小麦需水量及有效降水量,冬小麦生育期内需灌水 248.4 mm^[32],本研究选取灌溉定额 120 mm(约为需灌水总量的 1/2),灌水次数 2 次,每次 60 mm,分别在越冬期和拔节期进行灌溉,灌溉日期为 12 月 25 日(越冬)和 4 月 15 日(拔节)。无灌溉条件下冬小麦的水分来源主要是降

雨,这样设定更能反映未来气候情景下降雨的变化对冬小麦耗水量及产量产生的影响。

2 结果与分析

2.1 气候要素分析

表 2 给出了未来气候变化 HadCM3、IPCM4、MPEH5、NCCCSM 4 种大气环流模式下 3 种排放情景(SRA1B、SRA2、SRB1)不同时段(2011—2030、2046—

2065、2080—2090 年)关中地区冬小麦生育期内平均温度及降雨量的变化情况。从表中可以看出未来气候变化情景下冬小麦生育期内的平均气温均不同程度上升,并随着时间的推移上升的程度越来越大,2011—2030、2046—2065、2080—2090 年 3 个时间段

内分别平均上升 0.93℃、1.76℃、2.87℃,最大上升 1.74℃、2.23℃、4.46℃。冬小麦生育期内的降雨量呈现下降趋势,在 2011—2030、2046—2065、2080—2090 年 3 个时间段内分别平均下降 27.40、39.37、42.50 mm,最多下降 44.46、68.07、53.82 mm。

表 2 冬小麦生育期内平均气温及降雨量变化							
Table 2 Change in average temperature and precipitation in growth period for winter wheat							
大气环 流模式 GCM model	气候变化情景 Climate scenario	平均气温 Average temperature/℃			降雨量 Precipitation/mm		
		2011—2030	2046—2065	2080—2099	2011—2030	2046—2065	2080—2099
HadCM3	SRA1B	0.97	2.01	2.63	- 41.57	- 55.21	- 48.23
	SRA2	0.66	1.64	3.01	- 22.18	- 35.97	- 52.10
	SRB1	0.78	1.36	2.16	- 30.07	- 28.10	- 51.07
IPCM4	SRA1B	1.09	1.87	3.56	- 11.93	- 33.17	- 52.11
	SRA2	0.89	2.23	4.46	- 44.46	- 68.07	- 51.41
	SRB1	1.02	1.92	2.67	- 34.56	- 36.09	- 26.20
MPEH5	SRA1B	0.83	1.91	3.02	- 34.91	- 59.03	- 43.10
	SRA2	0.81	1.67	3.17	- 30.16	- 42.45	- 40.75
	SRB1	0.49	1.54	2.85	- 14.39	- 37.19	- 26.29
NCCCSM	SRA1B	1.74	1.80	2.44	- 28.97	- 39.23	- 50.04
	SRA2	0.90	1.89	3.26	- 5.27	- 34.68	- 53.82
	SRB1	0.91	1.32	1.17	- 30.30	- 3.27	- 14.92

2.2 冬小麦生育期变化

未来气候 4 种大气环流模式 3 种排放情景不同时间段内关中地区灌溉和不灌溉条件下冬小麦生育期缩短,且随着时间的推移在未来 3 个时期生育期越来越短(见表 3),2011—2030、2046—2065、2080—2090 年 3 个时间段内冬小麦生育期分别为 231、225、218 d,较现状分别缩短 6、12、19 d,并且最短生育期达到 211 d,较现状缩短 26 d。未来气候变化情景下冬小麦生育期内的平均气温呈现不同程度的上升会导致其生育期缩短,并且生育期长度和生育期内的平均气温两者相关性较好,气温每升高 1℃,生育期就会缩短约 6 d(见图 2)。

2.3 冬小麦耗水量及产量变化

表 3 为未来气候变化下灌溉条件下冬小麦耗水量及产量 DSSAT 模型模拟结果,从表中可以看出 4 种大气环流模式 3 种排放情景不同时间段内灌溉条件下冬小麦耗水量和产量较现状多数减少。耗水量较现状平均减少 5.16%,最多减少 11.69%;产量较现状平均减少 8.63%,最多减少 19.57%。2011—2030、2046—2065、2080—2090 年 3 个时间段内冬小麦生育期内耗水量和产量随时间的推移而减少,耗水量分别减少 3.34%、5.21%、6.92%,产量分别减少 4.45%、9.83%、11.62%。

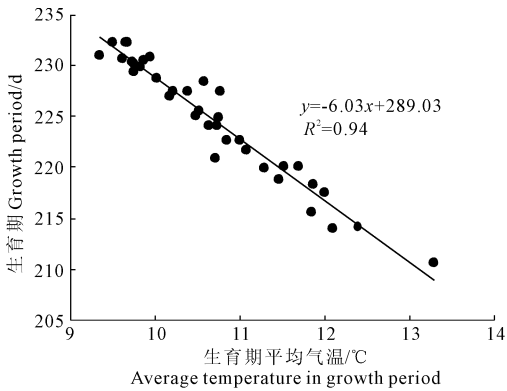


图 2 生育期长度与生育期平均气温
Fig.2 The relationship between growth period and average temperature in growth period

未来气候变化下气温升高导致作物耗水量增加,灌溉条件下,水分供给不足,冬小麦生长受到水分胁迫,即使气温的升高会导致冬小麦耗水量和光合作用的增强,但气温的升高会使土壤水分减少,再加之未来气候变化下冬小麦生育期内降雨量的减少,冬小麦生长受水分胁迫更加严重,从而导致叶面积指数减小,同时气孔开度减小,蒸发蒸腾量减少^[33-34]。温度升高使冬小麦生长发育加速,生育期的缩短不利于干物质的积累,从而导致产量下降。受气温升高、生育期缩短、降雨减少的综合作用,未

来气候变化下关中地区冬小麦耗水量和产量均下降。

表 3 灌溉条件下冬小麦耗水量及产量模型模拟结果
Table 3 Water consumption and yield simulation results for winter wheat under irrigation conditions

大气环 流模式 GCM model	气候变 化情景 Climate scenarios	时期 Period	生育期 Growth period /d	耗水量 Water consumption /mm	耗水量变化率 Rate of change for water consumption/%	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	产量变化率 Rate of change for yield/%
HadCM3	现状 Present	1961—2010	237	339.05		6310	
		2011—2030	230	322.25	− 4.96	5924	− 6.12
		2046—2065	223	309.49	− 8.72	5321	− 15.67
	SRA1B	2080—2099	219	311.90	− 8.01	5451	− 13.61
		2011—2030	232	332.62	− 1.90	6236	− 1.17
		2046—2065	225	321.04	− 5.31	5699	− 9.67
	SRA2	2080—2099	216	299.41	− 11.69	5309	− 15.86
		2011—2030	231	331.20	− 2.32	6249	− 0.97
		2046—2065	227	326.39	− 3.73	5968	− 5.41
	SRB1	2080—2099	223	315.22	− 7.03	5479	− 13.17
IPCM4	SRA1B	2011—2030	231	340.08	0.30	6306	− 0.06
		2046—2065	221	322.67	− 4.83	5871	− 6.95
		2080—2099	214	316.28	− 6.72	5850	− 7.29
	SRA2	2011—2030	230	316.92	− 6.53	5715	− 9.43
		2046—2065	222	302.77	− 10.70	5075	− 19.57
		2080—2099	211	308.04	− 9.15	5678	− 10.01
	SRB1	2011—2030	231	320.08	− 5.59	5763	− 8.66
		2046—2065	227	328.35	− 3.15	5933	− 5.97
		2080—2099	220	328.95	− 2.98	6012	− 4.72
MPEH5	SRA1B	2011—2030	232	325.73	− 3.93	5987	− 5.11
		2046—2065	225	313.93	− 7.41	5436	− 13.85
		2080—2099	218	315.38	− 6.98	5554	− 11.98
	SRA2	2011—2030	232	324.39	− 4.32	5982	− 5.18
		2046—2065	226	323.31	− 4.64	5650	− 10.46
		2080—2099	218	316.25	− 6.72	5459	− 13.49
	SRB1	2011—2030	231	330.62	− 2.49	6078	− 3.67
		2046—2065	227	326.22	− 3.78	5926	− 6.08
		2080—2099	220	328.95	− 2.98	6077	− 3.69
NCCCSM	SRA1B	2011—2030	228	319.83	− 5.67	5754	− 8.81
		2046—2065	224	316.78	− 6.57	5407	− 14.31
		2080—2099	220	313.50	− 7.54	5306	− 15.91
	SRA2	2011—2030	230	346.43	2.18	6489	2.85
		2046—2065	224	321.34	− 5.22	5553	− 11.99
		2080—2099	214	306.92	− 9.48	5091	− 19.32
	SRB1	2011—2030	230	322.51	− 4.88	5863	− 7.07
		2046—2065	229	344.43	1.59	6432	1.95
		2080—2099	227	326.17	− 3.80	5655	− 10.37

表 4 为未来气候变化不灌溉条件下冬小麦耗水量及产量 DSSAT 模型模拟结果,从表中可以看出 4 种大气环流模式 3 种排放情景不同时间段内不灌溉条件下耗水量及产量模型模拟结果变化规律与灌溉

条件下一致,但不灌溉条件下冬小麦耗水量和产量较现状平均减少 9.58%,最多减少 18.51%;产量较减少程度均比灌溉条件下大。不灌溉条件下耗水量现状平均减少 13.76%,最多减少 24.32%。

表 4 不灌溉条件下冬小麦耗水量及产量模型模拟结果

Table 4 Water consumption and yield simulation results for winter wheat under non-irrigation conditions

大气环 流模式 GCM model	气候变 化情景 Climate scenarios	时期 Period	生育期 Growth period /d	耗水量 Water consumption /mm	耗水量变化率 Rate of change for water consumption/%	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	产量变化率 Rate of change for yield/%
HadCM3	现状 Present	1961—2010	237	277.88		4536	
		2011—2030	230	254.30	− 8.49	4019	− 11.40
		2046—2065	223	238.58	− 14.14	3584	− 20.99
	SRA1B	2080—2099	219	239.26	− 13.90	3788	− 16.48
		2011—2030	232	264.76	− 4.72	4229	− 6.76
		2046—2065	225	251.93	− 9.34	3910	− 13.79
	SRA2	2080—2099	216	227.14	− 18.26	3510	− 22.62
		2011—2030	231	264.51	− 4.81	4278	− 5.69
		2046—2065	227	259.28	− 6.69	4159	− 8.31
	SRB1	2080—2099	223	243.90	− 12.23	3656	− 19.40
IPCM4	SRA1B	2011—2030	231	268.65	− 3.32	4288	− 5.47
		2046—2065	221	247.26	− 11.02	3964	− 12.60
		2080—2099	214	242.25	− 12.82	3688	− 18.69
	SRA2	2011—2030	230	246.02	− 11.47	3792	− 16.40
		2046—2065	222	230.12	− 17.19	3433	− 24.32
		2080—2099	211	226.46	− 18.51	3499	− 22.85
	SRB1	2011—2030	231	252.80	− 9.03	3943	− 13.07
		2046—2065	227	255.90	− 7.91	3920	− 13.58
		2080—2099	220	255.22	− 8.16	4070	− 10.26
MPEH5	SRA1B	2011—2030	232	254.86	− 8.29	3938	− 13.19
		2046—2065	225	243.04	− 12.54	3570	− 21.29
		2080—2099	218	241.02	− 13.27	3813	− 15.94
	SRA2	2011—2030	232	255.50	− 8.05	4010	− 11.59
		2046—2065	226	254.76	− 8.32	3823	− 15.72
		2080—2099	218	242.90	− 12.59	3849	− 15.15
	SRB1	2011—2030	231	265.36	− 4.50	4250	− 6.30
		2046—2065	227	253.42	− 8.80	3903	− 13.95
		2080—2099	220	255.22	− 8.16	4069	− 10.29
NCCCSM	SRA1B	2011—2030	228	253.83	− 8.66	3971	− 12.46
		2046—2065	224	250.17	− 9.97	3753	− 17.27
		2080—2099	220	244.30	− 12.09	3664	− 19.22
	SRA2	2011—2030	230	278.96	0.39	4468	− 1.50
		2046—2065	224	254.27	− 8.50	3889	− 14.25
		2080—2099	214	235.20	− 15.36	3647	− 19.59
	SRB1	2011—2030	230	255.21	− 8.16	4005	− 11.71
		2046—2065	229	276.97	− 0.33	4444	− 2.03
		2080—2099	227	262.24	− 5.63	4031	− 11.13

2011—2030、2046—2065、2080—2090 年 3 个时间段内冬小麦生育期内耗水量和产量随时间的推移而减少,耗水量分别减少 6.61%、9.56%、12.58%,产量分别减少 9.93%、14.84%、16.81%。不灌溉条件下,冬小麦水分的供给主要受降雨控制,水分胁迫更加严重,气温的升高、降水的减少、生育期的缩短使得冬小麦耗水量及产量也呈现下降趋势并比灌溉条件下更为明显。

此外,未来不同气候变化情景下 3 个时期内,不灌溉与灌溉条件下冬小麦生育期内降水量与耗水量、降水量与产量、耗水量与产量均具有较好的正相关性(见图 4)。其中不灌溉条件下冬小麦生育期内降水量与耗水量、降水量与产量、耗水量与产量的相关关系分别为 0.84、0.88、0.89;灌溉条件下降水量与耗水量、降水量与产量、耗水量与产量的相关关系分别为 0.79、0.70、0.84。

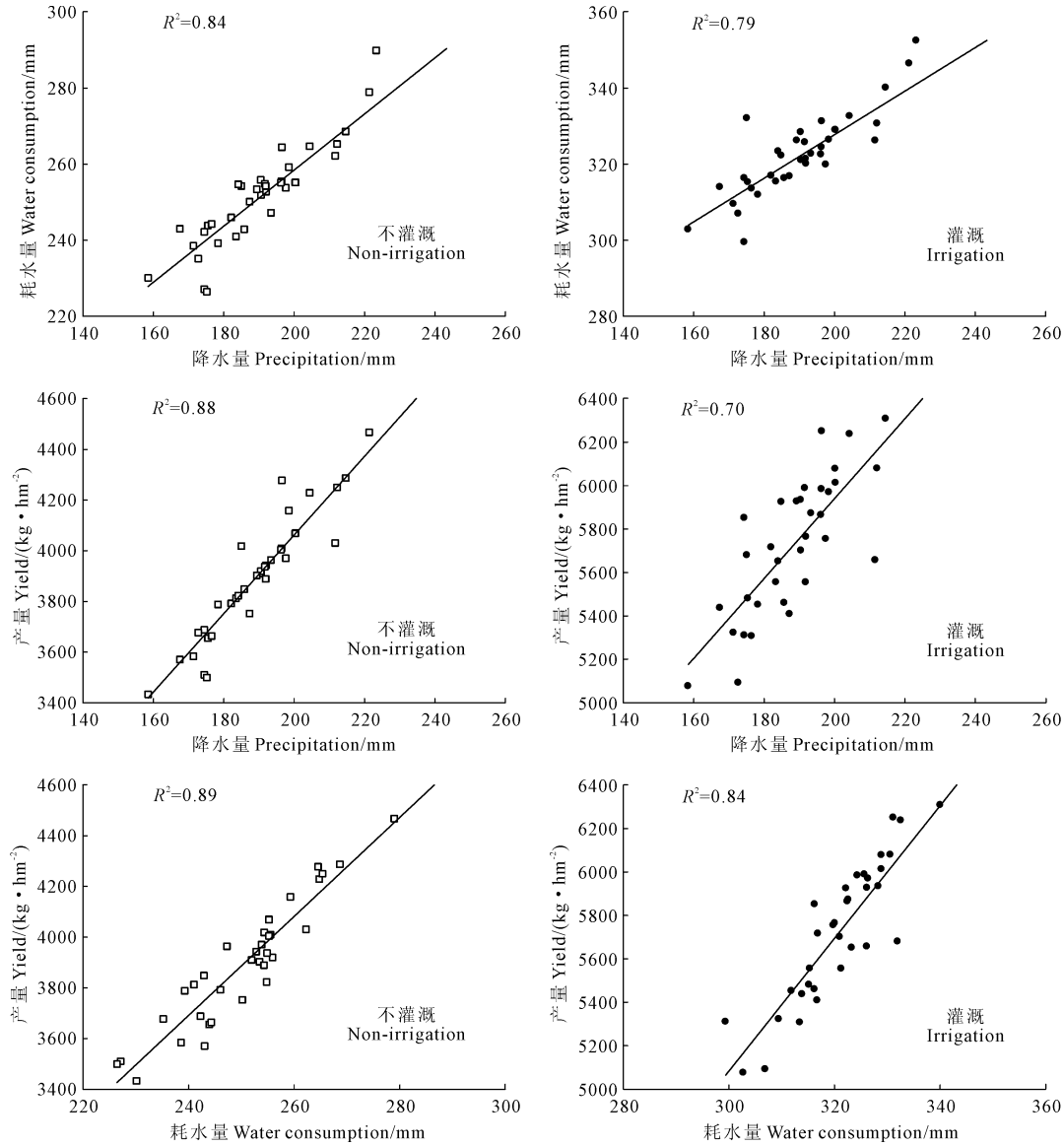


图 3 降水量与耗水量、降水量与产量、耗水量与产量的关系

Fig.3 The relationship between precipitation and water consumption, rainfall and yield, water consumption and yield

3 结论与讨论

本文利用历史气象资料 and 不同气候变化情景 (SRA1B、SRA2、SRB1) 不同大气环流模式 (HadCM3、IPCM4、MPEH5、NCCCSM) 的输出, 结合 DSSAT 模型, 模拟了关中地区历史和未来气候变化下 3 个时期

(2011—2030、2046—2065、2080—2090 年) 不灌溉和灌溉条件下冬小麦生育期、耗水量及产量的变化规律, 结果表明: 未来不同气候变化条件下不同时期内, 平均气温不同程度上升, 降水量不同程度下降; 灌溉与不灌溉条件下冬小麦生育期均缩短, 并且与生育期内的平均气温存在较好的负相关关系; 未来

气候变化两种灌溉条件均受到水分胁迫,未来气温升高、降雨减少、生育期缩短导致冬小麦耗水量与产量较现状减少且不灌溉条件下更为明显;灌溉与不灌溉条件下冬小麦生育期内降水量与耗水量、降水量与产量、耗水量与产量均具有较好的正相关性。

居辉、孙芳等^[35-36]研究表明未来气候变化条件下我国小麦不管是灌溉方式下还是雨养方式下均面临减产趋势,与本研究的灌溉和不灌溉条件得到的结果相一致。姚玉璧等^[5,37]对黄土高原地区历史气象资料分析表明该地区平均气温呈现上升趋势,降水量呈现下降趋势,从而导致作物生育期缩短和作物产量减少。本文分析了未来气候变化气象因素的变化情况,未来气候变化情景下温度继续呈现上升趋势,降水量继续呈现下降趋势,随着温度的上升与降水量降低冬小麦的生育期继续缩短,产量也继续下降。

本文在作物生长模拟过程中未考虑 CO₂ 浓度变化,土壤养分(设定土壤养分充足)与病虫害(设定无病虫害)引起的冬小麦蒸发蒸腾和产量的变化,且未来气候变化情景下模型对冬小麦耗水量与产量的模拟没有考虑品种的变化带来的影响,此外,天气发生器统计降尺度的模拟过程与作物模型参数的不确定性增加了模拟结果的不确定性。

冬小麦作为我国主要的粮食作物之一,面对未来气候变化带来的风险,应采取一定的措施以适应气候变化对冬小麦生产带来的负面影响。通过调整冬小麦的播期、改变其种植密度、制定合理的灌溉制度等改变生育期长度及生育期内光温水的配置,提高资源的有效利用,增加冬小麦的产量。此外,通过改变冬小麦品种的遗传改良培育适应未来气候的新品种,或引进适应于未来气候变化的新品种来提高冬小麦的产量也是未来农业发展的必然趋势。

参 考 文 献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis. Working Group I contribution to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. Working Group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [3] 气候变化国家评估报告编写委员会. 气候变化国家评估报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [4] 肖国举, 张 强, 王 静. 全球气候变化对农业生态系统的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1877-1885.
- [5] 曾 英, 黄祖英, 张红娟. 气候变化对陕西省冬小麦种植区的影响[J]. 水土保持通报, 2007, 27(5): 137-140.
- [6] 刘德祥, 董安祥, 邓振镭. 中国西北地区气候变暖对农业的影响[J]. 自然资源学报, 2005, 20(1): 119-125.
- [7] 刘晓英, 林而达. 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响[J]. 水利学报, 2004, 35(2): 77-82.
- [8] 韩宇平, 王 朋, 王富强. 气候变化下淮河区主要作物需水量变化特征[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(5): 114-117.
- [9] Diepen C A, Wolf J, Keulen H, et al. WOFOST: a simulation model of crop production[J]. Soil use and management, 1989, 5(1): 16-24.
- [10] Keating B A, Carberry P S, Hammer G L, et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3): 267-288.
- [11] Guo R, Lin Z, Mo X, et al. Responses of crop yield and water use efficiency to climate change in the north China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1185-1194.
- [12] Stockle C O, Donatelli M, Nelson R. CropSyst, a cropping systems simulation model[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3): 289-397.
- [13] 杨沈斌, 申双和, 赵小艳, 等. 气候变化对长江中下游稻区水稻产量的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(9): 1519-1528.
- [14] Wang J, Wang E, Luo Q, et al. Modelling the sensitivity of wheat growth and water balance to climate change in Southeast Australia [J]. Climate Change, 2009, 96: 79-96.
- [15] 王卫光, 孙凤朝, 彭世彰, 等. 水稻灌溉需水量对气候变化响应的模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 90-98.
- [16] Bannayan M, Rezaei E E. Future production of rainfed wheat in Iran (Khorasan Province): climate change scenario analysis[J]. Original Article, 2014, 19: 211-227.
- [17] Elgaali E, Garcia L A, Ojima D S. High resolution modeling of the regional impacts of climate change on irrigation water demand[J]. Climate change, 2007, 84: 441-461.
- [18] 张雪芹, 彭莉莉, 林朝晖. 未来不同排放情景下气候变化预估研究进展[J]. 地球科学进展, 2008, 23(2): 174-185.
- [19] Hanafin J A, McGrath R, Semmler T, et al. Air flow and stability indices in GCM future and control runs[J]. International Journal of Climatology, 2011, 31(8): 1240-1247.
- [20] Prudhomme C, Wilby RL, Crooks S, et al. Scenario - neutral approach to climate change impact studies: application to flood risk[J]. Journal of Hydrology, 2010, 390(3): 198-209.
- [21] Wetterhall F, Bardossy A, Chen D, et al. Statistical downscaling of daily precipitation over Sweden using GCM output[J]. Theoretical and applied climatology, 2009, 96: 95-103.
- [22] Jones JW, Hoogenboom G, Porter CH, et al. The DSSAT cropping system model[J]. European journal of agronomy, 2003, 18(3): 235-265.
- [23] Dettori M, Cesaraccio C, Motroni A, et al. Using CERSE - Wheat to simulate durum wheat production and phenology in Southern Sardinia, Italy[J]. Field crops research, 2011, 120(1): 179-188.
- [24] 刘建刚, 褚庆全, 王光耀, 等. 基于 DSSAT 模型的氮肥管理下华北地区冬小麦产量差的模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 124-129.
- [25] 王文佳, 冯 浩, 宋献方. 基于 DSSAT 模型陕西杨凌不同降水年型冬小麦灌溉制度研究[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31

