

黄淮海北片模拟增加和降低温度对麦田地温、水分变化和水分利用效率的影响

靖华, 马爱平, 亢秀丽, 王裕智, 崔欢虎, 张建诚

(山西省农业科学院小麦研究所, 山西 临汾 041000)

摘要: 采用模拟增降温法研究了温度变化对麦田地温、土壤水分变化和水分利用效率的影响。结果表明: 模拟增温麦田、降温麦田在全生育期 5 cm 平均地温分别较常规麦田平均升高 0.85 °C 和降低 2.57 °C, 其中模拟增温麦田的增温效应以冬季 > 秋季 > 春季, 模拟降温麦田的降温效应以春季 > 秋季 > 冬季; 模拟增温麦田、降温麦田在全生育期 5 cm 土层的平均容积含水率分别较常规麦田降低 3.76%、提高 4.84%。对模拟增温麦田、降温麦田和常规麦田 0—200 cm 土层水分变化研究表明, 模拟增温麦田和常规麦田(除成熟期外)各生育期的贮水量均低于模拟降温麦田; 全生育期 0—200 cm 土层土壤耗水量模拟增温麦田大于模拟降温麦田和常规麦田, 其中 0—100 cm 土层耗水量占 0—200 cm 土层耗水量的比例模拟增温麦田(55.72%)和常规麦田(55.14%)均低于模拟降温麦田(63.45%), 而 100—200 cm 土层耗水量占 0—200 cm 土层耗水量的比例模拟增温麦田(44.28%)和常规麦田(44.86%)麦田均高于模拟降温麦田(36.55%); 水分利用效率模拟增温麦田低于常规麦田和模拟降温麦田。研究结果可为气候变暖对小麦生产系统的影响提供理论依据和技术支撑。

关键词: 地温; 小麦; 土壤水分; 水分利用效率; 气候变化

中图分类号: S152.7; S152.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)01-0217-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.01.031

Effects of Simulated Temperature Increase and Decrease on Ground Temperature, Soil Moisture Change, and Water Use Efficiency in the North of Huang-Huai-Hai Wheat Field

JING Hua, MA Aiping, KANG Xiuli, WANG Yuzhi, CUI Huanhu, ZHANG Jiancheng

(Wheat Research Institute, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Linfen, Shanxi 041000)

Abstract: The effects of temperature change on wheat field temperature, soil moisture change, and water use efficiency were studied by simulated temperature increase and decrease method. The results showed that the average 5 cm ground temperature of the warming wheat field and the cooling wheat field in the whole growth period increased by 0.85 °C and decreased by 2.57 °C, respectively, compared with the conventional wheat field. The simulated warming effect of the warming wheat field was winter > autumn > spring, and the simulated cooling effect of the cooling wheat field was spring > autumn > winter. The average volumetric water content of 5 cm soil layer in the whole growth period of the simulated warming and cooling wheat field was 3.76% lower and 4.84% higher than that of conventional wheat field, respectively. The study of soil water change in 0—200 cm soil layer of simulated warming, cooling wheat field, and conventional wheat field showed that the water storage of simulated warming and conventional wheat field (except mature stage) was lower than that of simulated cooling wheat field at all growth stages; the water consumption in 0—200 cm soil layer during whole growth period in warming wheat field was higher than that in simulated cooling and conventional wheat field, of which the proportion of 0—100 cm water consumption to 0—200 cm in simulated warming wheat field (55.72%) and conventional wheat field (55.14%) was lower than that of simulated

收稿日期: 2019-07-26

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300203-2); 山西省重点研究计划项目(201703D211002-4-4, 201703D211002-5)

第一作者: 靖华(1971—), 女, 学士, 副研究员, 主要从事旱作节水农业研究。E-mail: jinghua02@163.com

通信作者: 崔欢虎(1963—), 男, 学士, 研究员, 主要从事旱作节水农业研究。E-mail: cuihh88@163.com

张建诚(1962—), 男, 学士, 研究员, 主要从事旱作节水农业研究。E-mail: zhangjc@126.com

cooling wheat field (63.45%), while the proportion of water consumption of 100–200 cm to 0–200 cm in simulated warming wheat field (44.28%) and conventional wheat field (44.86%) was higher than that of simulated cooling wheat field (36.55%). The water use efficiency of simulated warming wheat field was lower than that of conventional wheat field and simulated cooling wheat field. This study can provide theoretical basis and technical support for the impact of climate warming on wheat production system.

Keywords: ground temperature; wheat; soil moisture; water use efficiency; climate change

小麦是我国的重要粮食作物,提高小麦产量对保障国家粮食安全具有重要的战略地位。但随着全球气候变化特别是气温升高^[1],小麦生产系统的稳定性遭到不同程度的破坏,因此,消减气候变化特别是气温升高对小麦生产系统的影响已成为研究热点。广大科技工作者围绕温度关键气象因子开展了较多研究:一是利用已有历史气象资料(气象台站)开展不同时空尺度的气温变化趋势研究^[2-4]、利用已有历史气象资料对已有小麦观察资料解析地温、气温因子对小麦生长发育^[5]、产量^[6]、农艺性状^[7]及种植北界趋势^[8]的影响、利用已有气象资料通过建立模型分析温度因子^[9-10]、降水和温度^[11]对小麦产量的影响;二是利用海拔高度模拟增温情景对麦田土壤水分变化^[12]的影响;三是利用“温室和开顶箱”“土壤加热管道和电缆”“红外线反射器”及“红外线辐射器”等增温装置^[13-14]模拟未来气候变化情景,这些利用已有历史气象资料或通过海拔高度模拟增温情景或利用增温装置模拟研究气候变化的成果为应对气候变化提供了理论与技术支撑。以往这些研究成果解析了未来气候增温特征及对小麦生长发育的影响,在增温情景下对土壤水分的研究仅局限于麦田耕层土壤(0–20 cm)水分变化特征研究,而有关集增温、降温功能于一体的装置研发较少,同时开展增温麦田、降温麦田表层土壤温度、土壤水分、麦田土体(0–200 cm)水分变化特征及水分利用效率的也较少。本研究利用气温与地温相关性^[15]、地温增温间接反映气温增温^[16-17]的研究成果,通过增降温设施的修建,形成增温麦田、降温麦田,明确增温麦田、降温麦田的土壤水分变化特征及水分利用效率,解析未来气温升高情景下的麦田土壤贮水量、耗水量、不同土层耗水比例及水分利用效率趋势,以期对气候变化对小麦生产系统的影响提供理论技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2017–2019 年在山西省农业科学院小麦研究所韩村(临汾市尧都区)基地进行。试验地点海拔 459.00 m,年均降水量 457.71 mm,年均气温 13.08 °C,

≥ 0 °C 积温 4 965.60 °C, ≥ 10 °C 积温 4 436.22 °C。试验 2017–2018 年度小麦休闲期(6 月中下旬–9 月)降水量 336.90 mm 较常年降水量(295.93 mm)多 40.97 mm,小麦生育期间(10 月至翌年 6 月上旬)降水量 185.1 mm,较常年降水量(161.8 mm)多 23.3 mm;试验 2018–2019 年度小麦休闲期(6 月中下旬–9 月)降水量 333.60 mm 较常年(295.93 mm)降水量多 37.67 mm,小麦生育期间(10 月至翌年 5 月)降水量 95.8 mm,较常年降水量(161.8 mm)少 66.0 mm。

1.2 试验材料

2017–2018 年度所用小麦品种为“晋麦 47 号”,2018–2019 年度所用小麦品种为“中麦 36 号”;气象数据远程监测系统由邯郸冀南新区盛炎电子科技有限公司生产;直角地温计由河北省武邑县教学设备厂生产;增降温主板和侧板材料分别为彩钢瓦和彩钢板。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设施 增降温设施由地下隔水层和地上增降温挡板、连接件组成。地下隔水层的修建于 2017 年 9 月 7 日实施。试验为避免增温麦田与降温麦田之间的土壤水分交换,在增温麦田与降温麦田之间设置隔水层膜,具体方法为:用铲斗宽度为 0.70 m 的挖掘机挖出东西长 5.0 m、深 2.10 m、宽 0.70 m 的长方体深坑,其中 0–30 cm 耕层土壤分放;用长 5.0 m(长方体深坑长)、宽 2.10 m(长方体深坑深)的农膜将长方体深坑的南侧覆盖,随即将挖出的土方回填并夯实(分放的 0–30 cm 耕层土壤最后回填)。

增降温挡板包括主板和侧板,主板长 7.0 m、宽(高)2.0 m、厚 75.0 mm,2 块侧板长 1.5 m、宽(高)2.0 m、厚 3.0 mm,主板垂直安装于隔水层南侧正上方,左右各延伸出长方体深坑各 1.0 m,2017–2018 年度 2 块侧板分别与主板呈 90°连接,主板和侧板组合形成一个开口向南的“U”形结构;在“U”形结构主板的南侧为增温麦田,在“U”形结构主板的北侧则形成降温麦田;2018–2019 年(考虑侧板影响增温麦田的光照时间)将 2 块侧板与主板的左右两侧呈 0°连接,主板长(含原侧板)则为 10.0 m,其南侧为增温麦田,北侧为降温麦田。连接件包括上横梁、下横梁、纵

梁、固定座、固定桩、支撑杆、地锚等其他组件,其作用是组合主板的各块彩钢瓦、侧板的各块彩钢板、主板和侧板与地面的固定。

1.3.2 试验处理 2017—2018 年:试验设计增温麦田、降温麦田和常规麦田 3 个处理。关键生育时期地温观测,增温麦田处理设计 2 个监测点,分别为 IT30—5(指在增温麦田东西中心线距挡板 30 cm 处测定 5 cm 地温。下同。)、IT30—10,降温麦田处理设计 2 个监测点,分别为 DT30—5(指在降温麦田东西中心线距挡板 30 cm 处测定 5 cm 地温。下同。)、DT30—10。增温麦田、降温麦田、常规麦田均于 2017 年 10 月 15 日播种,行距 20 cm,播种量为 525 万粒/hm²,种植面积增温麦田、降温麦田均为 9.0 m²,常规麦田面积 15.0 m²。

2018—2019 年:试验设计增温麦田、降温麦田和常规麦田 3 个处理。试验观测地温:设计 9 个监测点,其中降温麦田设计 4 个监测点,分别为 DT70—5、DT70—10、DT30—5、DT30—10;增温麦田设计 4 个监测点,分别为 IT30—5、IT30—10、IT70—10、IT70—5;常规麦田设计 1 个监测点为 CKT—5(紧邻增降温设施的大田)。试验观测表层土壤容积含水率设计 6 个监测点,其中增温麦田 3 个监测点,分别为 IW30—5、IW70—5、IW70—10;降温麦田设计 2 个监测点,分别为 DW70—5、DW70—10;常规麦田设计 1 个监测点为 CKW—5。增温麦田、降温麦田、常规麦田试验均于 2018 年 10 月 4 日播种,播种量约为 450 万粒/hm²,各处理种植面积均与 2017—2018 年试验相同。

增温麦田、降温麦田和常规麦田处理 2 个试验年度的田间管理播前底施肥量、春季除草、红蜘蛛防治(2018—2019 年)及灌浆期蚜虫防治等均一致。

1.4 测定方法

2017—2018 年度,在关键生育期用直角地温计测定 5,10 cm 土壤温度;2018—2019 年度,自 2018 年 10 月 1 日至 2019 年 5 月 31 日用温度、水分、气温、降雨量传感器每小时分别传输 1 次 5,10 cm 土壤温度、容积含水率、气温和降水量。

2017—2018 年度,在小麦关键生育期用烘干称重法间隔 20 cm 测定 0—200 cm 各土层土壤质量含水率 $W(\%)$,根据 $A = W \times \rho \times H$ 计算土壤贮水量(mm)。式中: A 为土壤贮水量(mm); W 为土壤质量含水率(%); H 为土层厚度(mm); ρ 为土壤容重(g/cm³)。增温麦田水分测定点在增温麦田距挡板 50—60 cm 的南北中心线,降温麦田水分测定点在降温麦田距挡板 75—85 cm 的南北中心线,常规麦田水

分测定点固定在约 15 m² 范围内。

成熟期在增温麦田、降温麦田处理中均收获约 5 m²(长 5.0 m×宽 1.0 m),常规麦田收获约 15 m²(长 10.0 m×宽 1.5 m),单收单打计算产量。

1.5 时段划分及数据获取

2018—2019 小麦生育期内各处理监测点表层土壤温度、土壤容积含水率监测值以每月的上旬均值、中旬均值、下旬均值计,各处理下的每个监测点秋季(播种期—越冬期前)获取 6 组数据、冬季(越冬期—返青期)获取 9 组数据、春季(起身期—孕穗期)获取 9 组数据。各处理下的每个监测点全生育期共获取 24 组数据;将各处理的每个监测点的 24 组数据的土壤温度、表层容积含水率平均作为各处理各个监测点的全生育期的土壤温度、表层容积含水率测定值。

1.6 数据处理

数据采用 Excel 2003 和 DPS 软件进行数据处理和分析^[18]。

2 结果与分析

2.1 模拟增降温处理对麦田不同生育时期不同表层地温的影响

2.1.1 模拟增降温处理对麦田不同生育阶段及全生育期不同表层地温的影响 由图 1 可知,2 个试验年度模拟增降温各处理对麦田不同生育时期下不同土层地温的影响不同。2 个试验年度模拟增降温处理的增降温效应基本一致;增温麦田、降温麦田的温度旬变化趋势与常规麦田及气温(AT)一致。2018—2019 年模拟增降温各监测点与常规麦田监测点 CKT—5 相比,其对全生育期各个时段及全生育期的平均地温有较好的增降温效应。各处理全生育期各个时段:增温麦田处理监测点 IT30—5 和 IT70—5 均值在播种期—越冬期前(秋季)、越冬期—返青期(冬季)、起身期—孕穗期(春季)分别较常规麦田监测点 CKT—5 增温 1.26,1.47,-0.05 °C,其中起身期—孕穗期的 3—4 月上旬较常规麦田监测点 CKT—5 增温 0.87 °C;降温麦田处理监测点 DT30—5 和 DT70—5 均值在播种期—越冬期前(秋季)、越冬期—返青期(冬季)、起身期—孕穗期(春季)分别较常规麦田监测点 CKT—5 降温 2.73,1.09,3.38 °C。各处理全生育期平均地温:增温麦田处理监测点 IT30—5、IT70—5、IT30—10、IT70—10 分别较常规麦田监测点 CKT—5 高 1.15,0.70,0.66,0.55 °C,降温麦田处理监测点 DT70—5、DT70—10、DT30—5、DT30—10 分别较常规麦田监测点 CKT—5 降低 2.09,2.57,3.06,2.79 °C。

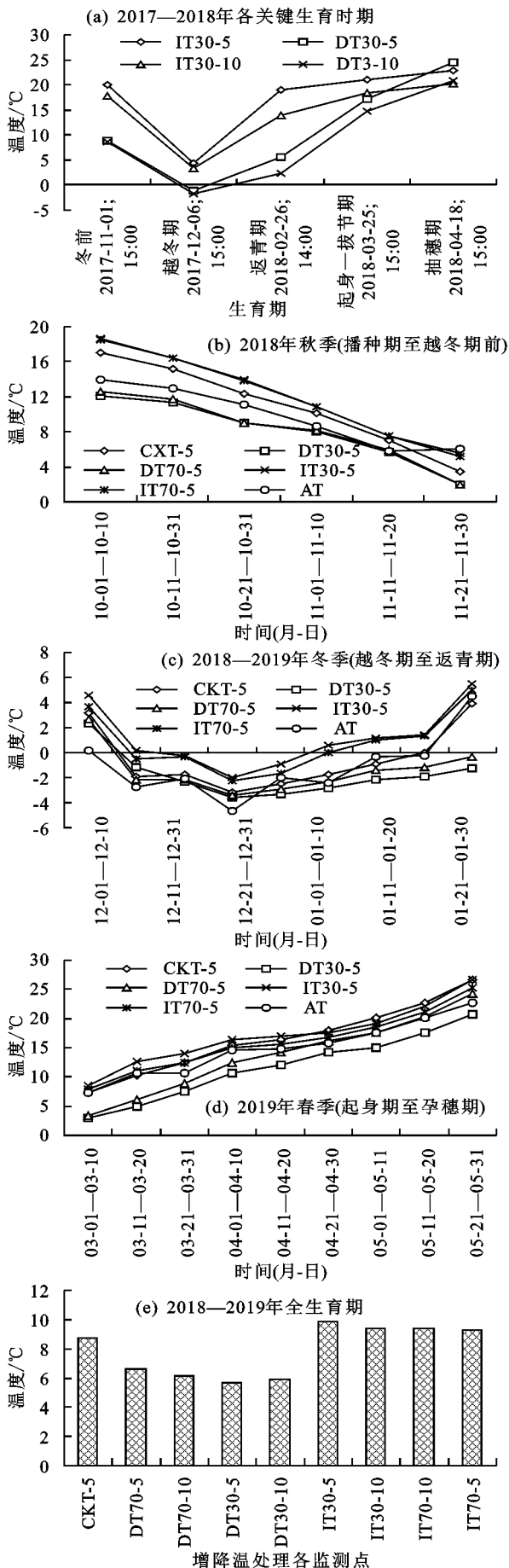


图 1 不同试验年度模拟增降温处理对麦田各生育阶段及全生育期地温的影响

2.1.2 模拟增降温麦田的增温、降温范围界定 由图 1 可知,增温麦田的增温效应、降温麦田的降温效应分别为随着距挡板距离愈远增温效应、降温效应愈低;依据降温麦田处理监测点从 DT30-5 至 DT70-5 衰减值,可计算出单位距离(cm)的温度衰减值($0.024\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$);以单位距离的温度衰减值(视为衰减梯度均匀)计算降温麦田的处理监测点 DT70-5 温度值衰减至与常规麦田处理监测点 CKT-5 监测温度值相同时所需的距离为 0.85 m ,因此距挡板 1.55 m ($0.70+0.85\text{ m}$)的麦田均有降温效应,本试验的增降温装置设计的隔水层膜为 5.0 m 长,因此其降温麦田范围约 7.75 m^2 。同理,依据增温麦田处理监测点从 IT30-5 至 IT70-5 衰减值可计算出单位距离(cm)的温度衰减值($0.015\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$),增温麦田的处理监测点 DT70-5 温度值衰减至与常规麦田处理监测点 CKT-5 监测温度值相同时所需的距离为 0.40 m ,因此距挡板 1.10 ($0.70+0.40$) m 的麦田均有增温效应,其增温麦田的范围约 5.5 m^2 。

2.1.3 模拟增降温麦田处理的全生育期 5 cm 表层地温显著性检验 对全生育期各处理监测点获取的 24 组表层地温数据进行不同处理监测点的配对 T 检验,由表 1 可知,增温麦田处理的监测点 IT30-5 与 IT70-5 间不存在差异,常规麦田处理监测点 CKT-5 与增温麦田监测点 IT70-5 间存在 5% 显著差异,其他处理的监测点间存在 1% 极显著性差异。

表 1 不同增降温麦田处理监测点全生育期表层地温的配对 T 检验

处理	CKT-5	DT30-5	DT70-5	IT30-5
DT30-5	7.7690**			
DT70-5	7.0914**	4.7755**		
IT30-5	6.1885**	11.7210**	9.7082**	
IT70-5	2.4217*	11.2890**	7.8815**	5.6705-

注:数据为 2018-2019 年; ** 表示处理间差异极显著($p < 0.01$); * 表示处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

2.2 模拟增降温处理对麦田土壤水分的影响

2.2.1 模拟增降温处理对麦田表层土壤容积含水率的影响

(1)模拟增降温麦田处理对各生育时段表层土壤平均容积含水率的影响。由图 2 可知,模拟增降温麦田处理对各生育时段表层土壤平均容积含水率的影响不同。麦田各生育时段的 5 cm 平均容积含水率模拟增温麦田处理 2 个监测点 IW30-5、IW70-5 均低于常规麦田处理监测点 CKW-5,而模拟降温麦田处理监测点 DW70-5 除越冬期的 12 月中、下旬略低于常规麦田处理监测点 CKW-5 外,其他时段均高于常规麦田处理监测点 CKW-5。增温、降温麦田处理在各生育时段的表层土壤平均容积含

水率大小与各生育时段的降水量(P)大小基本呈现吻合,个别时段出现差异主要是由于降水时间点与表层土壤平均容积含水率统计时间区间出现了偏差所致。

(2)模拟增降温麦田处理对全生育期表层土壤平均容积含水率的影响。由图 3 可知,模拟增降温麦田处理对全生育期表层土壤平均容积含水率的影响不

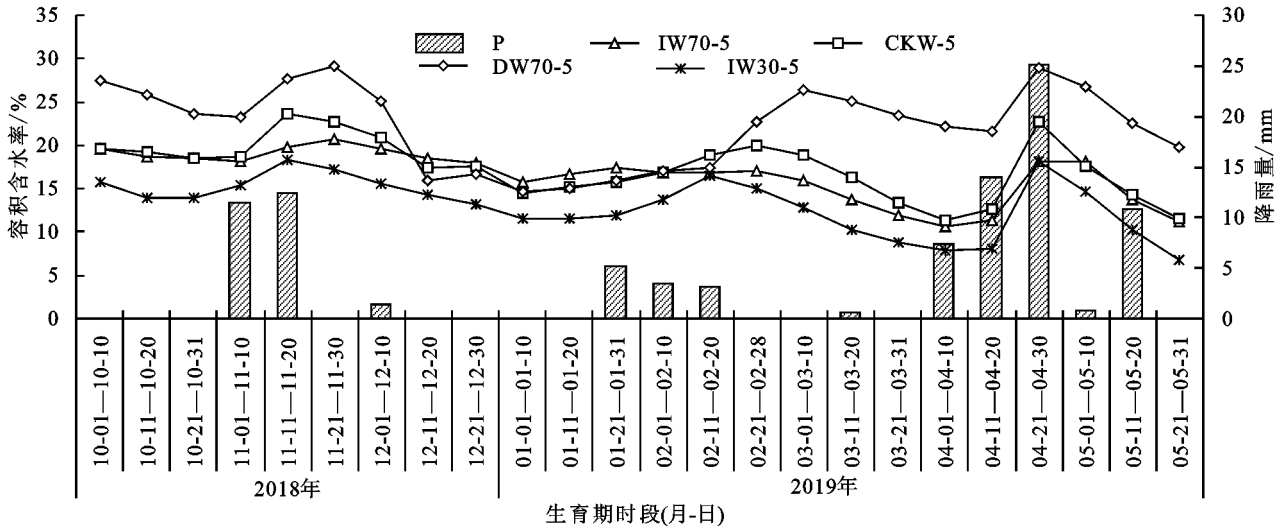


图 2 模拟增降温处理对麦田各时段表层土壤容积含水率的影响

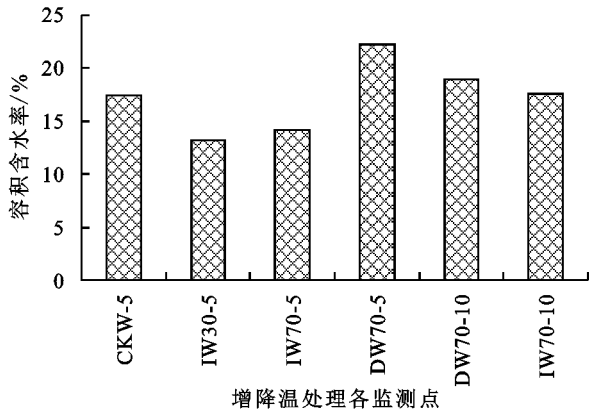


图 3 模拟增降温处理对麦田全生育期表层土壤容积含水率的影响

(3)模拟增降温麦田处理的全生育期 5 cm 表层土壤容积含水率显著性检验。对全生育期各处理监测点获取的 24 组表层土壤容积含水率数据进行不同处理监测点的配对 T 值检验,由表 2 可知,增温麦田、降温麦田、常规麦田处理的各监测点间在全生育期 5 cm 容积含水率均存在 1% 的显著性差异。

表 2 不同增降温麦田处理监测点全生育期 5 cm 表层土壤容积含水率的配对 T 检验

处理	CKW-5	DW70-5	IW70-5
DW70-5	5.9469**		
IW70-5	9.2934**	8.4316**	
IW30-5	20.2170**	9.8389**	3.5105**

2.2.2 模拟增降温处理对麦田土体水分的影响

(1)增温麦田、降温麦田处理对不同生育时期土

同。各处理监测点全生育期麦田 5 cm 土层的平均容积含水率大小依次为 DW70-5、CKW-5、IW70-5、IW30-5,其中 DW70-5、IW70-5、IW30-5 分别与常规麦田处理监测点 CKW-5 相差 4.84%, -3.25%, -4.28%;全生育期麦田 10 cm 土层的平均容积含水率 DW70-10(19.02%)>IW70-10(17.57%),二者相差 1.45%。

壤贮水量的影响。由图 4 可知,增降温麦田处理对不同生育期不同土层贮水量的影响不同。增温、降温及常规麦田均表现随生育期的延后 0-100, 0-200 cm 土层的水分贮量均在下降,其中返青期、拔节期、灌浆期、成熟期 0-100, 0-200, 100-200 cm 土层土壤贮水量均表现为降温麦田或常规麦田>增温麦田;成熟期增温、降温麦田 0-100 cm 土壤贮水量差异较小, 100-200 cm 土层贮水量差异较大;0-100 cm 土层贮水量低于 100-200 cm 土层贮水量增温麦田和常规麦田均出现在小麦返青期至灌浆期,而降温麦田则出现在灌浆期至成熟期;进一步分析增温麦田与降温麦田不同生育期贮水量的差异性表明,二者在 0-100, 0-200, 100-200 cm 土层间均存在 5% 差异。

(2)增温麦田、降温麦田处理对麦田不同生育阶段不同土层耗水量的影响。由图 5 可知,增温麦田、降温麦田处理对麦田不同生育阶段不同土层耗水量的影响不同。增温、降温及常规麦田在不同生育阶段 0-100 cm 土层的土壤耗水量:增温麦田在播种期一越冬期、越冬期一返青期 2 个阶段耗水量大于降温麦田在此阶段的耗水量,而在返青期一拔节期、拔节期一灌浆期、灌浆期一成熟期 3 个阶段的耗水量则表现为降温麦田>常规麦田>增温麦田;播种期至成熟期的耗水量增温麦田>降温麦田>常规麦田,其中增温麦田与降温麦田二者差异不大。增温、降温及常规麦田在播种期至成熟期 100-200 cm 土层的土壤耗水量增温麦田>常

常规麦田>降温麦田,增温麦田较降温麦田耗水量多约 37.46 mm;增温、降温及常规麦田在播种期至成熟期

0—200 cm 土层的土壤耗水量与 0—100 cm 土壤耗水量趋势一致即增温麦田>降温麦田>常规麦田。

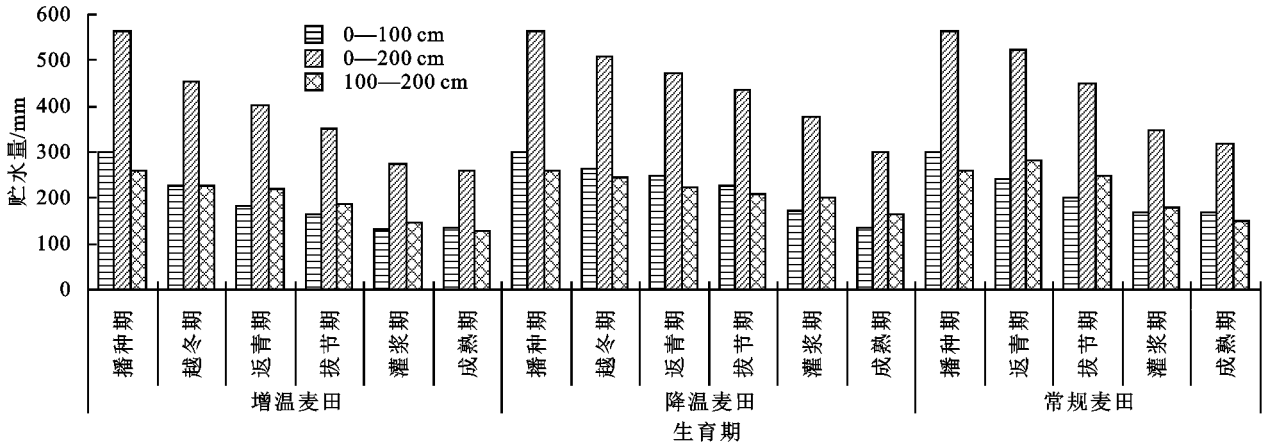


图 4 模拟增、降温处理对不同生育时期土壤贮水量的影响

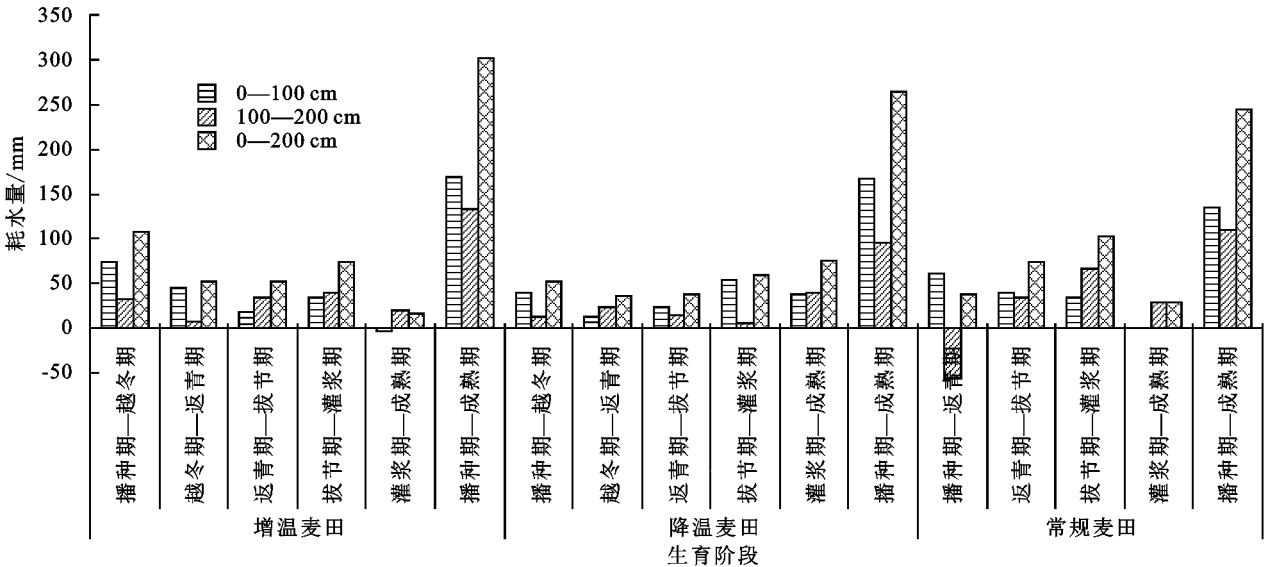


图 5 模拟增降温处理对麦田不同生育阶段不同土层土壤耗水量的影响

(3)增温麦田、降温麦田处理全生育期 0—100, 100—200 cm 土层耗水量占 0—200 cm 土层耗水量的比例。由图 6 可知,增温麦田、降温麦田处理全生育期 0—100,100—200 cm 土层耗水量占 0—200 cm 土层耗水量的比例不同。增温、降温、常规麦田三者 0—100 cm 土层耗水量占 0—200 cm 土层耗水量的比例均大于其 100—200 cm 土层耗水量占 0—200 cm 土层耗水量的比例;0—100 cm 土层耗水量占 0—200 cm 土层耗水量的比例常规麦田(55.14%)<增温麦田(55.72%)<降温麦田(63.45%),100—200 cm 土层耗水量占 0—200 cm 土层耗水量的比例常规麦田(44.86%)>增温麦田(44.28%)>降温麦田(36.55%);其中增温麦田与常规麦田二者 0—100 cm 土层耗水量占 0—200 cm 土层耗水量的比例及 100—200 cm 土层耗水量占 0—200 cm 土层耗水量的比例均差异不大。

2.3 模拟增降温处理对水分利用效率的影响

由表 3 可知,增温麦田、降温麦田和常规麦田对

产量、总耗水量及水分利用效率的影响不同。产量和水分利用效率呈现随麦田温度的升高而下降,总耗水量则表现为增温麦田>降温麦田>常规麦田。

3 讨论

3.1 增降温装置

本增降温装置利用太阳光能热辐射的原理同时模拟了增温麦田与降温麦田,依据任国玉等^[19]对近 50 年地表气温变暖研究结果,该项研究的增温麦田以常规麦田为对照、常规麦田以降温麦田为对照、增温麦田以降温麦田为对照分别可以模拟未来不同时间区间的增温情景。增温麦田和降温麦田的增温、降温效应形成了不同梯度;增温麦田和降温麦田的面积分别为 7.5,5.5 m²基本可满足研究需求;本装置增温效应冬季(越冬期—返青期)最大,基本符合我国季节性增温特征,旬温度变化趋势增温麦田与常规麦田及气温变化趋势基本一致,未改变麦田各生育阶段或不同季节实际的温度变化规律,与田云录等^[20]设计的

开放式增温系统的增温趋势相一致,但其建造及运行成本远低于其开放式增温系统。本装置增降温板,可不同程度降低增温麦田的风速和降温麦田的日照时数,而风速降低和日照时数减少也是未来气候变化的特征之一^[21-22],因此,本装置形成的增温麦田实际模

拟了温度升高和风速降低的 2 个气象因子,降温麦田则是模拟了温度降低和日照时数减少的 2 个气象因子(二者均是依据试验点所处区域的季风特点和日照特点判定),该增降温装置的研制与应用丰富了模拟气候变化的研究内容。

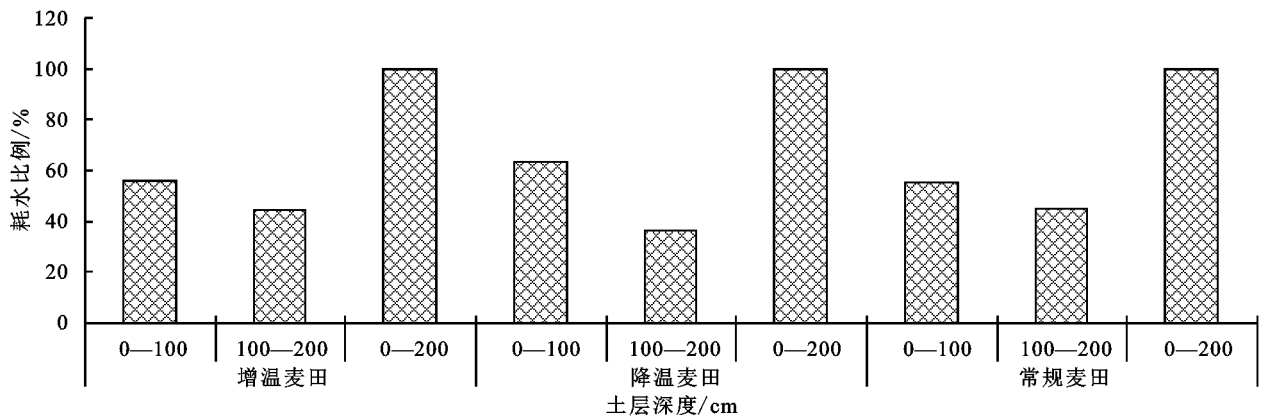


图 6 模拟增降温处理对麦田全生育期土壤耗水量比例的影响

表 3 模拟增温、降温麦田处理对(2017—2018 年)水分利用效率的影响

处理	产量/ (kg · hm ⁻²)	土壤贮水量/mm		生育期 降水量/mm	总耗 水量/mm	水分利用效率/ (kg/(mm · hm ⁻²))
		播前	收获			
增温麦田	2485.80	561.86	260.05	185.10	486.91	5.10
常规麦田	2962.65	561.86	317.85	185.10	429.10	6.90
降温麦田	4404.75	561.86	298.71	185.10	448.25	9.83

3.2 增温麦田表层土壤容积含水率的差异显著性

本增降温装置条件下,不同增降温麦田处理表层土壤容积含水率测定值其全生育期的各生育时段 5 cm 表层土壤容积含水率均存在 1% 的显著性差异,这与田云录等^[20]的研究结果不同,其主要是由于该装置在增温麦田和降温麦田设置了隔水层,避免了增温麦田与降温麦田的水分交换。

3.3 增降温麦田土体耗水比例特征

从本装置模拟增温麦田、降温麦田 0—100, 100—200 cm 土层耗水量占 0—200 cm 土层耗水量比例看,增温、降温及常规麦田三者 0—100 cm 土层耗水比例均大于 100—200 cm 土层的耗水比例,降温麦田 100—200 cm 土层耗水比例低于增温麦田和常规麦田,这与靖华等^[12]开展的利用低海拔区域模拟高海拔区域未来增温情景对土壤水分变化的影响趋势相一致;但增温麦田与常规麦田相比二者差异不大,分析其原因主要是增温麦田在播种期至拔节及孕穗期(2018 年 10 月至 2019 年 4 月上旬)均有增温效应,加快了小麦生长发育进程,在 2018 年 4 月 6—7 日低温冻害中降温麦田冻穗率为 0,增温麦田冻穗率(26.25%)高于常规麦田(14.54%)导致增温麦田后期 100—200 cm 土层土壤耗水量减小;增温麦田全生育期的总耗水量高

于降温麦田和常规麦田,这与气温升高增加地表蒸发速率和植物蒸腾速率,从而降低土壤水分含量^[23]的结果一致,而另有学者^[24]认为,增温会导致植物早衰,降低蒸腾速率造成土壤水分增加,本项研究中则出现由于小麦冻害和早衰(成熟期分别较常规麦田、降温麦田早 4~5, 7~8 天)造成增温麦田后期耗水量下降(与常规麦田相比)的现象。

3.4 降温装置的不足之处

本增降温装置在增温麦田与降温麦田之间设置了隔水层膜,有效降低了增温麦田与降温麦田土体间的水分交换,但其增温麦田、降温麦田的其他 3 边并未设置隔水层膜,增温麦田、降温麦田二者的 3 个边界可能存在与相邻麦田的水分交换;本项研究中为了消除这一因素的影响,表层水分固定测定点选择在增温麦田、降温麦田东西中心线,增温麦田、降温麦田不同关键生育时期的土体水分测定点分别选择在距挡板 0.5, 0.75 m 的南北中心线;本项研究用烘干称重法测定土壤质量含水率可能不同程度扰动土体结构;本项研究中对增温麦田、降温麦田的风速、日照时间均未测定。

4 结论

该增降温装置基本符合我国季节性增温特征,且

增温麦田温度的变化趋势与常规麦田和气温变化趋势基本一致,未改变麦田实际的温度变化规律;增温麦田、降温麦田在全生育期 5 cm 平均地温分别较常规麦田平均升高 0.85 °C 和降低 2.57 °C,增温麦田、降温麦田在全生育期 5 cm 容积含水率分别较常规麦田平均降低 3.76% 和提高 4.84%;增温麦田土体各生育期不同土层的贮水量均低于降温麦田,增温麦田在播种期至灌浆期不同土层的贮水量均低于常规麦田,全生育期土壤耗水量增温麦田大于降温麦田和常规麦田,其中 0—100 cm 土层耗水量比例增温麦田和常规麦田均低于降温麦田,而 100—200 cm 土层耗水量比例增温麦田和常规麦田均高于降温麦田;水分利用效率增温麦田低于常规麦田和降温麦田。该项研究可为气候变暖对小麦生产系统的影响提供理论依据和技术支撑。

参考文献:

- [1] 秦大河.气候变化与干旱[J].科技导报,2009,27(11):3.
- [2] 任国玉,徐铭志,初子莹,等.近 54 年中国地面气温变化[J].气候与环境研究,2005,10(4):717-727.
- [3] 张卉,郭慕萍,赵双巧,等.1960—2008 年山西省气温变化特征[J].气象与环境学报,2012,28(2):16-21.
- [4] 苗爱梅,武捷,贾利冬.1958—2008 年山西气温变化的特征及趋势研究[J].地球科学进展,2010,25(3):264-272.
- [5] 费晓玲,丁春兰.甘肃黄土高原地温与冬小麦发育期的关系分析[J].干旱气象,2009,27(2):148-151.
- [6] 王春玲,申双和,王润元,等.天水地区冬春地温变化与冬小麦生长和产量的相关分析[J].干旱地区农业研究,2012,30(5):41-45.
- [7] 刘新月,裴磊,卫云宗,等.气温变化背景下中国黄淮旱地冬小麦农艺性状的变化特征:以山西临汾为例[J].中国农业科学,2015,48(10):1942-1954.
- [8] 唐晓培,宋妮,陈智芳,等.黄淮海地区冬小麦种植北界时空演变及未来趋势分析[J].农业工程学报,2019,35(9):129-137.
- [9] 周英霞,王全九,何斌,等.气温和 CO₂ 浓度变化对陕北地区冬小麦产量影响的模拟分析[J].水土保持学报,2017,31(5):292-297.
- [10] 周林,王汉杰,朱红伟.气候变暖对黄淮海平原冬小麦生长及产量影响的数值模拟[J].解放军理工大学学报:自然科学版,2003,4(2):76-82.
- [11] 杨轩,王自奎,曹铨,等.陇东地区几种旱作作物产量对降水与气温变化的响应[J].农业工程学报,2016,32(9):106-114.
- [12] 靖华,亢秀丽,马爱平,等.不同海拔麦田土壤水分变化特征及其对水分利用效率的影响[J].干旱气象,2019,37(4):656-662.
- [13] 牛书丽,韩兴国,马克平,等.全球变暖与陆地生态系统研究中的野外增温装置[J].植物生态学报,2007,31(2):262-271.
- [14] 张凯,王润元,王鹤龄,等.模拟增温对半干旱雨养区春小麦物质生产与分配的影响[J].农业工程学报,2016,32(16):223-232.
- [15] 冯学民,蔡德利.土壤温度与气温及纬度和海拔关系的研究[J].土壤学报,2004,41(3):489-491.
- [16] Hartley A E, Neill C, Melillo J M, et al. Plant performance and soil nitrogen mineralization in response to simulated climate change in subarctic dwarf heath [J]. *Oikos*, 1999, 86: 331-343.
- [17] Bergh J, Linder S. Effects of soil warming during spring on photosynthetic recovery in boreal Norway spruce stands [J]. *Global Change Biology*, 1999, 5: 245-253.
- [18] 唐启义,冯明光.实用统计分析及其 DPS 数据处理系统 [M].北京:科学出版社,2002.
- [19] 任国玉,郭军,徐铭志,等.近 50 年中国地面气候变化基本特征[J].气象学报,2005,63(6):942-956.
- [20] 田云录,郑建初,张彬,等.麦田开放式昼夜不同增温系统的设计及增温效果[J].中国农业科学,2010,43(18):3724-3731.
- [21] 申双和,盛琼.45 年来中国蒸发皿蒸发量的变化特征及其成因[J].气象学报,2008,66(3):452-460.
- [22] 亢秀丽,靖华,马爱平,等.区域(临汾)水分相关气象因子变化及其对小麦产量的影响[J].农学学报,2019,9(7):62-67.
- [23] Kimball B A. Theory and performance of an infrared heater for ecosystem warming [J]. *Global Change Biology*, 2005, 11: 2041-2056.
- [24] Zavaleta E S, Thomas B D, Chiariello N R, et al. Plants reverse warming effect on ecosystem water balance [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2003, 100: 9892-9893.