

半干旱雨养农业区春小麦水分利用效率变化及其年型划分

刘江¹, 赵福年², 杨红燕³, 雷俊⁴

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730020; 3. 聊城市土壤肥料工作站, 山东 聊城 252000; 4. 定西市气象局, 甘肃 定西 743000)

摘要: 如何利用有限的水分获得更多的作物产量是干旱半干旱农业发展的目标和挑战。以半干旱雨养农业区春小麦为突破口, 研究了其在不同气候年型下对不同来源的水分利用效率, 以选择适宜种植春小麦的气候年型, 旨在为半干旱雨养农业区农民种植决策提供依据。以半干旱雨养农业区的典型代表区域定西市安定区为例, 采用定西地面气象观测站与定西农业气象试验站 1987—2011 年的观测资料, 分析了当地春小麦对不同来源水分的利用效率及其影响因素。结果表明, 定西市安定区 1987—2011 年 25 a 间春小麦主要生育期气候存在暖干化趋势, 但春小麦降水利用效率和播前土壤水分利用效率均未出现明显的变化。播前土壤水分是影响生育期降水利用效率的主要因素, 但生育期大气干湿状况对降水利用效率也有影响。同时, 大气干湿状况影响播前土壤水分利用效率, 而播前土壤水分的高低对大气干湿状况与播前土壤水分利用效率的关系亦有影响。根据播前土壤水分、主要生育期大气干湿状况、春小麦历年产量, 可将半干旱雨养农业区(定西市安定区)春小麦生长的气候年型划分为 5 个, 分别为高产年份、中高产年份、中产年份、中等偏低产量年份、低产水平年份。不同气候年型下, 降水利用效率和播前土壤水分利用效率不相同。水分限制情形下, 在春小麦达到最大水分利用效率之前, 越是适宜的环境, 越有利于提高春小麦水分利用效率。在相对适宜的气候条件下, 春小麦对播前 50 cm 土壤水分的利用效率要高于对主要生育期降水的利用效率。因此, 选择播前土壤水分高、大气湿润的气候年型种植春小麦能够保证获得较高产量。

关键词: 春小麦; 水分利用效率; 土壤含水量; 降水量; 大气干湿状况; 半干旱雨养农业区; 气候年型

中图分类号: S512.1; S162.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-2172(2023)09-0822-09

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2023.09.007

Variation of Water Use Efficiencies and Climatic Year Patterns for Spring Wheat in Semi-arid Rainfed Region

LIU Jiang¹, ZHAO Funian², YANG Hongyan³, LEI Jun⁴

(1. College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu 730070, China; 2. Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou Gansu 730020, China; 3. Liaocheng Soil and Fertilizer Workstation, Liaocheng Shandong 252000, China; 4. Dingxi Meteorological Bureau, Dingxi Gansu 743000, China)

Abstract: How to use limited water to obtain more crop yield is the goal and challenge of the development of arid and semi-arid agriculture. Spring wheat in semi-arid rainfed agricultural areas was taken as the potential breakthrough point for studying the water use efficiencies of different sources under different climatic year patterns to select suitable climatic year types for planting spring wheat and provide a basis for farmers' planting decisions in semi-arid rainfed agricultural areas. Anding District, Dingxi, a typical representative area for semi-arid rainfed agriculture, was taken as an example, the observation data from Dingxi surface meteorological observation station and Dingxi agricultural meteorological experimental station from 1987 to 2011 were used to analyze the utilization efficiencies and influencing factors of different sources of water used by local spring wheat. The results showed there was a warming and drying trend during spring wheat growing season from 1987 to 2011. However, There was no significant change in precipitation utilization efficiency and soil water utilization efficiency before sowing of spring wheat. Soil moisture before sowing is the main factor affecting the utilization efficiency of precipitation during the growth period, but the dry and wet conditions of the atmosphere during the growth period also have an impact on the utilization efficiency of precipitation. Meanwhile, air moisture condition during spring wheat growing season had great impact on soil water use efficiency before sowing, but the soil water content

收稿日期: 2023-08-03

基金项目: 甘肃省气象局人才项目(2122rczx-英才计划-02)。

作者简介: 刘江(1999—), 男, 甘肃漳县人, 硕士, 研究方向为作物水分关系研究。Email: gauliujiang@163.com。

通信作者: 赵福年(1987—), 男, 甘肃武威人, 副研究员, 博士, 研究方向为作物水分关系研究。Email: zfn0622@163.com。

before sowing also affected the relation between air moisture condition during spring wheat growing season and soil water use efficiency before sowing. According to soil moisture before sowing, the atmospheric dry and wet conditions during the growth period, and the annual yield of spring wheat, the climatic patterns of Anding could be classified into five types, namely high yield, medium high yield, middle yield, medium low yield, and low yield. Precipitation utilization efficiency and soil water utilization efficiency before sowing varied under different climate year types. Under limited water condition, the more optimal environment could lead to higher spring wheat water use efficiency. Under relatively suitable climatic conditions, the utilization efficiency of spring wheat for soil moisture at 50 cm before sowing was higher than that for precipitation during the growth period. Choosing a climate year with high soil moisture and humid atmosphere before sowing spring wheat can ensure higher yields.

Key words: Spring wheat; Water utilization efficiency; Soil moisture content; Precipitation; Atmospheric dry and wet condition; Semi-arid rainfed agricultural region; Climatic year pattern

在西北半干旱雨养农业区, 春小麦是主要的粮食作物, 但是由于生育期降水量少且变率较大, 该区春小麦产量一直低而不稳^[1-4]。因此, 如何根据气候条件, 选择合适的年份种植春小麦, 以高效地使用有限的水分, 并最终获得较高的作物产量是该区农业结构布局急需解决的问题。

水分利用效率又称水分生产率, 是衡量作物利用水分的一个指标^[5-6]。根据研究的目的不同, 目前水分利用效率一般可分为叶片瞬时水分利用效率(叶片净光合速率与蒸腾速率的比值)、作物群体水分利用效率(作物生育期干物质积累与同期农田蒸散量之比)以及产量水平的水分利用效率(一般指作物经济产量与作物生育期耗水量或其他供水量的比值)^[7-9]。在叶片尺度上, 作物的水分利用效率往往受光照、二氧化碳浓度、空气饱和水汽压差、温度以及土壤水分供给等环境因素的影响^[10-11]。在群体尺度上, 作物的水分利用效率与叶片尺度水分利用效率紧密联系, 也对上述几种环境因素的变化敏感, 迄今, 冠层导度的模拟研究大多基于叶片尺度的气孔导度对环境响应的乘合模型或气孔导度与光合的耦合模型^[8]。然而在产量水平上, 作物水分利用效率的影响因素往往与叶片尺度的影响因素有较大的区别, 而且许多研究发现作物水分消耗与产量之间的关系不受播种时期、灌水量多寡等因素的影响, 在特定气候区其值固定^[12]。然而其他一些研究认为水分利用效率年际之间波动大, 其变化规律受周围环境的影响^[13-14]。此外, 除前文提及的几种环境因素外, 土壤蒸发以及作物收获指数等因素同样也会对作物产量水平水分利用效率造成较大的影响^[15-16]。

水分是半干旱雨养农业区作物高产稳产的首要限制因子。作物生长发育的水分包括生育期降水和休闲期降水, 而休闲期的降水往往通过转化

为播前土壤含水量以供作物生长发育使用。因此考虑雨养农业区的作物水分利用效率, 需要从生育期降水利用效率和播前土壤水分利用效率两个方面来衡量。同时, 气候变化与农业生产的相互关系是当前农业研究的热点^[17-19], 在气候变化背景下, 关注气候年型的差异对作物水分利用效率的影响将是一个非常有用且对作物种植选择有重要意义的问题。因此, 我们以半干旱雨养春小麦在不同气候年型下对不同来源的水分利用效率为研究突破口, 分析选择较为适宜种植春小麦的气候年型, 以为该区农民种植决策提供可借鉴的依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于黄土高原西端的甘肃省定西市安定区, 地理位置 104° 12' ~ 105° 01' E, 35° 17' ~ 36° 02' N 之间, 周围环山, 平均海拔为 1 898.7 m。年平均气温 6.3 °C, 年平均降水量约 400 mm, 无霜期 141 d。降水量年内分布极不均匀, 主要集中在夏秋季 7—9 月。太阳辐射强且热量资源丰富, 非常适合春播作物生长。春小麦、春玉米以及马铃薯是安定区最主要的三种粮食作物。由于缺乏河川径流, 除少数河沟地带有灌溉条件外, 绝大部分地区作物生长发育依赖雨养, 该区属于典型的半干旱雨养农业区。

1.2 数据收集

气象资料来源于甘肃省气象局的气象观测站, 该气象站位于甘肃省定西市气象局院内, 资料包括 1987—2011 年定西气象站逐日降水量、蒸发量、最高最低气温以及日照时数等。

1987—2011 年春小麦农业气象观测资料来自定西市气象局农业气象试验站。春小麦农业气象观测资料主要包括春小麦播种至收获主要发育日期、茎秆质量、地段实际产量、播前 50 cm 土层土壤相

对含水量以及 50 cm 层次土壤物理性质(包括土壤容重、土壤田间持水量以及植株萎焉土壤含水量等)。

定西地面气象观测站与定西农业气象试验站在试验观测期间站点固定, 每年观测方法相同, 试验观测地段一致, 耕作方式年际之间无差异, 保证了数据连续性与一致性。春小麦供试品种与当地农户普遍选择种植的品种一致, 1987—2011 年间春小麦品种主要包括渭春 1 号、陇春 8139、陇春 20 号以及定西 24 号。

1.3 要素定义与计算

播前 50 cm 土层土壤含水量(SWC)由播种前测得的土壤相对含水量、土壤田间持水量以及土壤容重计算, SWC>94 mm 为湿润土壤, SWC≤94 mm 为干燥土壤。生育期降水量(P)与蒸发量(E)分别由 3—6 月逐日降水量与蒸发量累加计算。生育期平均日照时数(SD)与平均温度(Tem)分别取 3—6 月逐日日照时数以及逐日最高与最低气温的平均值。主要生育期大气干湿状况(AM)由 3—6 月蒸发量与降水量之差计算获得, AM≥425 mm 为干燥

大气, AM<425 mm 为湿润大气。

降水利用效率: $PUE=Yield/P$

式中, Yield为春小麦产量, 下同。

播前土壤水分利用效率: $SWUE=Yield/SWC$

1.4 数据处理

采用 SPSS 13.0 中的 K-means 分类方法进行聚类分析, 并采用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验法对不同分类之间进行差异显著性分析。

线性回归及其检验由 R 语言中的 lm 函数和 summary 函数完成 [20], 不同组别之间的方差分析由 R 语言中的 TukeyHSD 函数完成。

2 结果与分析

2.1 环境条件变化分析

在全球变暖的背景下, 定西春小麦生育期的气候要素如 SD、Tem、P、SWC、E、AM 也发生了不同程度的变化(图 1)。3—6 月的平均日照时数(SD)呈极显著的增加趋势(P<0.001), 每 10 a 增加 0.52 h。平均温度(Tem)呈不断增高趋势, 增幅为 0.9 °C/10 a, 增幅极显著(P<0.001)。生育期降水量

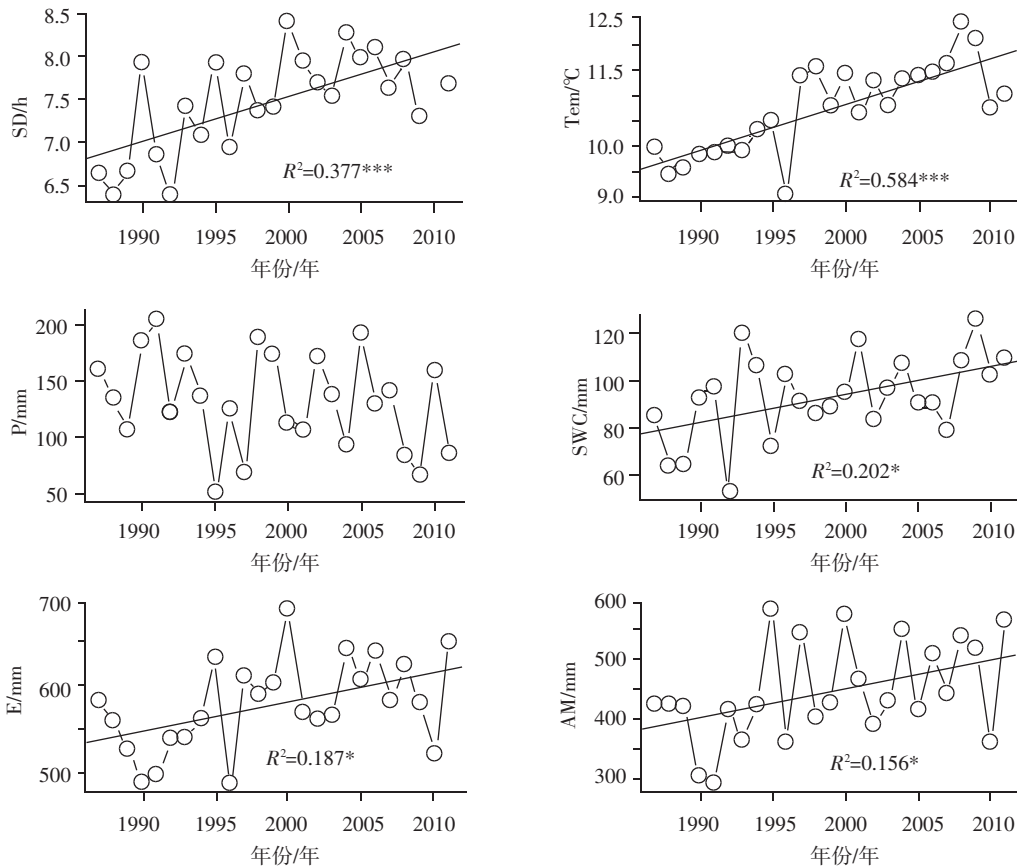


图 1 试验区域春小麦生长发育主要环境要素变化^①

① “***” 表示统计检验在 0.001 显著水平; “*” 表示统计检验在 0.05 显著水平。

(*P*)无明显增减趋势,但是年际变率极大,达35.5%。播前 50 cm 土层土壤水分(*SWC*)呈显著的增加趋势,增加幅度为 11.9 mm/10 a。同时在温度、空气饱和气压差(呈极显著的增加趋势,图略)以及风速(显著的减小趋势,图略)等要素的共同影响下,蒸发量(*E*)呈显著的增加趋势,增幅达 33.1 mm/10 a。由于研究区降水量无明显增加或减少趋势,而蒸发量增大,生育期大气干燥状况(*AM*)呈显著增加趋势,增幅为 48.5 mm/10 a。从上述气象要素的变化分析来看,1987—2011 年这 25 a 间定西春小麦生育期气候在逐渐变暖变干。

2.2 水分利用效率初步分析

定西市春小麦生育期气候呈暖干化趋势,但春小麦对不同来源水分的利用效率却并未呈现出明显的变化趋势。从图 2 a 可知,1987—2011 年间春小麦主要生育期降水利用效率并未表现出明显的增大或者减少趋势。从降水与产量的关系来看(图 2 c),相同的降水量下,产量有高有低。研究时间段内春小麦降水利用效率平均为 11.0 kg/(mm·hm²),最小值为 3.3 kg/(mm·hm²),最大值为 33.0 kg/(mm·hm²)。同时春小麦对播前 50 cm 土层

土壤水分的利用效率也未有明显变化趋势(图 2 b),仅 1987—1994 年水分利用效率整体较高,此后略微减少,但差异不显著。分析播前 50 cm 土层土壤水分利用与产量的关系(图 2 d),发现相同的土壤水分条件下,产量表现也是高低不同,无明显规律。土壤水分利用效率最大为 33.0 kg/(mm·hm²),最小为 4.0 kg/(mm·hm²),平均值为 17.6 kg/(mm·hm²)。

2.3 年型划分

2.3.1 水分利用效率影响因素分析 降水利用效率与其他环境因子的相互关系,发现播前 50 cm 土层土壤水分与降水利用效率呈极显著相关关系(表 1),且随着播前 50 cm 土层土壤含水量的增加,降水利用效率不断增大(图 3 a)。此外,分析图 3 a 可发现,降水利用效率与播前土壤水分的相互关系随生育期大气干湿状况不同可以被分为 2 种,即当大气干湿状况 ≥425 mm 时,降水利用效率随着土壤水分的增加而呈增加趋势,且增幅极显著,每 1 mm 土壤水分使降水利用效率增大 0.456 kg/(mm·hm²);而当大气干燥状况 <425 mm 时,降水利用效率随着土壤水分的增加亦呈增加趋势,但增幅相对较小,为 0.147 kg/(mm·hm²)。

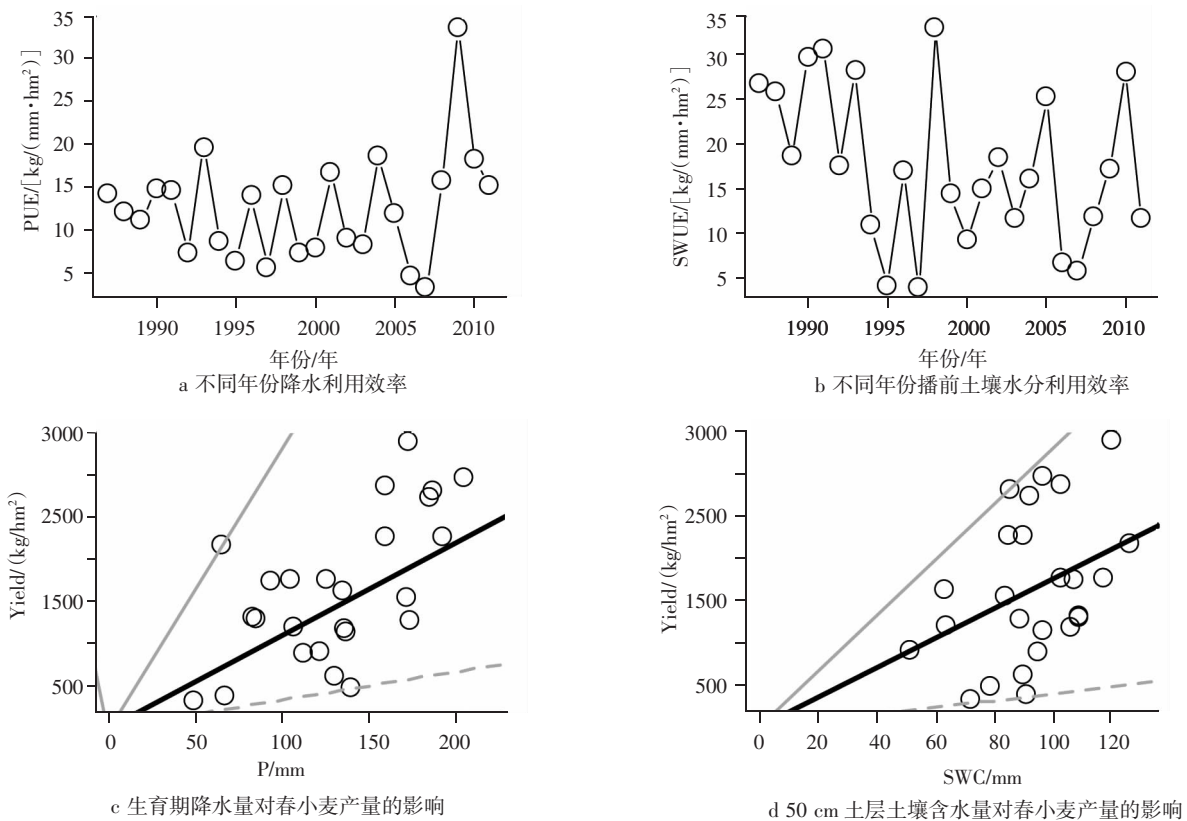


图 2 春小麦水分利用效率年际间变化以及春小麦产量对生育期降水量及播前 50 cm 土层土壤含水量的响应

同时可以看到在土壤水分较小时，相同的土壤水分供给，在大气湿润的年份降水利用效率较高，而随着播前土壤水分的增大，不同大气干湿状况的年份水分利用效率趋于相同。尽管降水量与降水利用效率呈反比，但是较小的大气干湿状况有利于提高作物产量，相同的土壤水分条件下反而有利于提高降水利用效率。

分析土壤水分与其他环境因子的相互关系，发现土壤水分利用效率与大气干湿状况以及 5 月份温度和空气饱和气压差相关关系显著。其中土壤水分利用效率与生育期大气干湿状况关系极显著(图 3 b、表 1)，且随着大气干燥程度增大，土壤水分利用效率降低。同时，发现土壤水分利用效率与大气干湿状况的相互关系可以依据播前土壤水分的不同划分为两组，即当播前土壤水分 >94 mm 时，土壤水分利用效率随大气干燥程度降低较缓，为 0.059 kg/(mm·hm²)，且极显著；而当播前土壤水分 ≤94 mm 时，土壤水分利用效率随大气干燥状况降低较快，为 0.112 kg/(mm·hm²)。同时，还可以发现，当大气干湿状况大于 >425 mm 时，

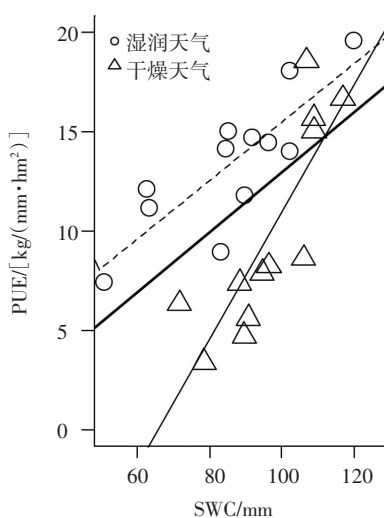
相同的大气干湿状况，较大的播前土壤水分含量土壤水分利用效率较高，而较低的播前土壤水分含量土壤水分效率则较低。而在大气干湿状况 <425 mm 时，实际观测计算获得的土壤水分利用效率之间差异不明显。说明大气干燥时，土壤水分越大产量越高，尽管土壤水分与土壤水分利用效率呈反比，但是产量的提高反而有利于提高土壤水分利用效率。

2.3.2 以产量为标准分析气候年型 土壤水分和小麦主要生育期大气干湿状况影响小麦最终产量和土壤水分以及降水利用效率，而且在半干旱区产量的提高有利于增大水分利用效率，因此以产量为标准，分析土壤水分与大气干燥状况对产量的影响。同时从国内外的研究文献可知，播前充足的土壤水分有利于一年生作物营养生长，如茎秆等干物质的积累。因此以 2.3.1 分析中获得的不同大气干燥状况以及土壤水分为类别，分析春小麦茎秆与最终产量的关系。从图 4 可以看出，春小麦茎秆与春小麦产量呈极显著的相关关系，而且茎秆与产量的关系可分为 3 个年型，即高产年型、中产年型、低产年型。在高产年型，播前土

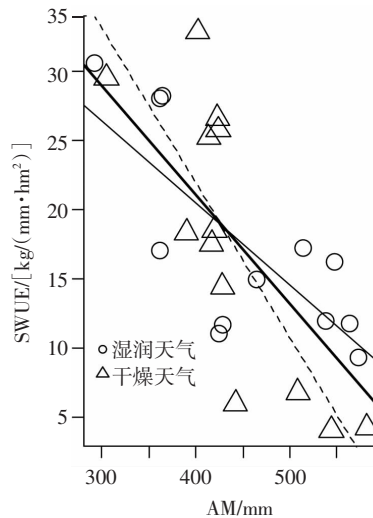
表 1 春小麦水分利用效率对环境因素的响应^①

水分利用效率与环境要素	条件	斜率	截距	R ²
PUE-SWC	无	0.221	-7.974	0.377 7***
	湿润大气(AM>425 mm)	0.147	0.720	0.653 0***
	干燥大气(AM<425 mm)	0.456	-33.411	0.701 0***
SWUE-AM	无	-0.079	52.737	0.534 0***
	湿润土壤(SWC>94 mm)	-0.059	44.363	0.535 0**
	干燥土壤(SWC≤94 mm)	-0.112	66.865	0.596 0**

① “***”表示统计检验在 0.001 显著水平；“**”表示统计检验在 0.01 显著水平。



a 播前土壤水分对生育期降水水分利用效率的影响



b 大气干湿状况对土壤水分利用效率的影响

图 3 环境因素对播前 50 cm 土层土壤水分利用效率及春小麦主要生育期降水水分利用效率的影响

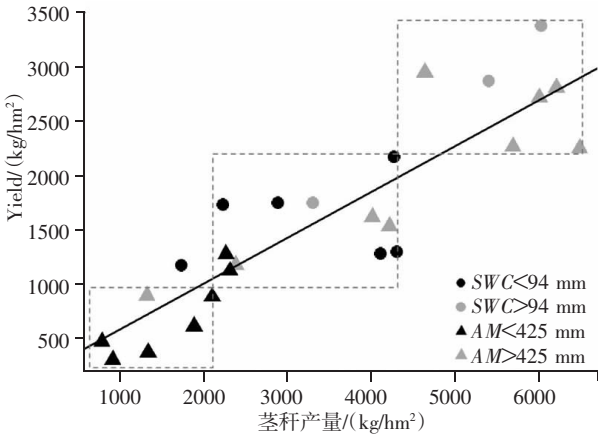


图 4 不同环境条件下春小麦茎秆产量与籽粒产量的相互关系

壤水分存在大于或者小于 94 mm 的两个类别, 但是大气干燥度状况均 < 425 mm, 说明大气越湿润越有利于高产, 即使播前土壤水分偏小。在中产年型, 存在播前土壤水分大于或者小于 94 mm 的类别, 也存在大气干燥度大于 425 mm 或者小于 425 mm 的类别, 说明产量高低与大气干燥度以及土壤播前水分无明显规律。在低产年型, 可以发现土壤水分均 < 94 mm, 且大气干燥状况基本为 > 425 mm 的类别, 说明大气越干燥, 播前土壤水分越少, 越不利于获得高产。同时观察图 4 可以发现土壤水分偏大的年份, 在回归线左上方; 而土壤水分偏小的年份集中在回归线右下方。说明土壤水分的大小对收获指数(对应作物对籽粒和茎秆

等部分的分配)具有一定的影响。

由于以两个大气干燥状况和两个土壤水分阶段不能详细划分春小麦产量类型, 我们再采用聚类分析法以产量为标准, 以大气干燥状况和播前土壤水分为划分变量, 再次划分气候年型。从图 5 可以看出, 根据产量的高低不同分别对应 5 个两两之间差异极显著的气候年型。即高产年份(I), 播前土壤水分相对较高, 大气非常湿润; 中高产年份(II), 土壤水分最高, 但是大气干燥状况变干, 处于相对的中等干燥程度; 中产年份(III), 土壤水分减低, 处于相对中等的水平, 但是大气干湿状况相对较大; 中等偏低产年份(IV), 土壤水分相对较小, 但是大气干燥程度处于中等水平; 低产年份(V), 播前土壤水分较小, 且大气干燥程度最大。

2.4 不同气候年型下的水分利用效率分析

依据已划分的气候年型分别分析降水、土壤水分与产量的相互关系, 从图 6 中可以很明显的看出, 在气候年型 I 下, 降水利用效率最高。II 气候年型在较小的降水量下, 获得了相对较高的春小麦产量, 其降水利用效率与 I 气候年型无显著差异, 源于其有较高的播前土壤含水量。III 气候年型降水利用效率在 5 个气候年型中居于中间, 显著小于 I、II 两个气候年型, 大于 IV 与 V 两个气候年型。IV 气候年型由于播前水分降低, 降水利用效率偏小。而 V 气候年型则由于大气偏干燥与

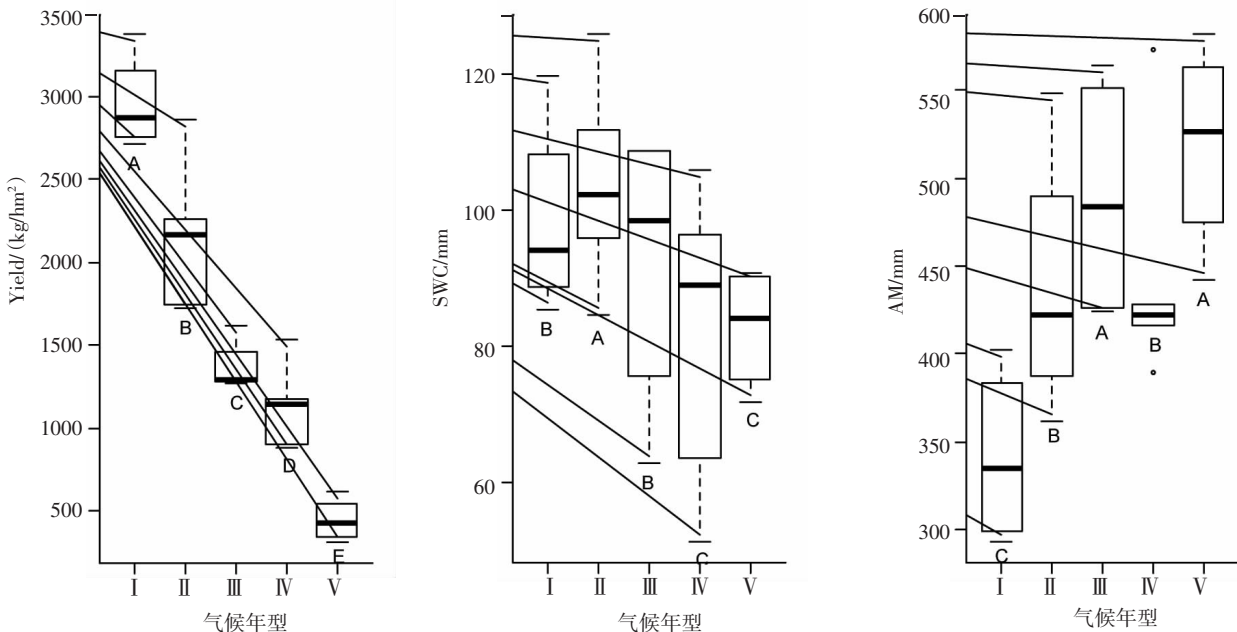


图 5 以产量为标准划分气候年型①

①图中每个类型箱箱下不同大写字母表示类别之间差异极显著, 下图相同。

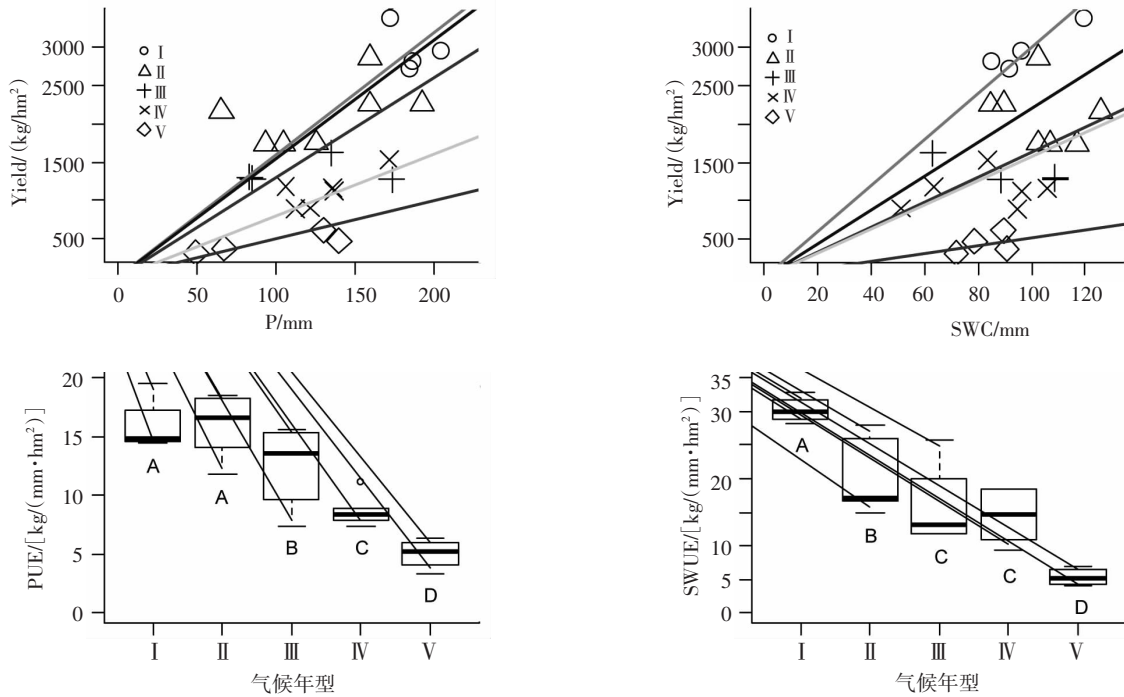


图 6 不同气候年型下的春小麦不同水分的利用效率变化规律

播前土壤水分较小的共同影响，降水利用效率最低。同时，土壤水分利用效率除 III 气候年型与 IV 气候年型之间无差别外，其他各年型之间均差异显著。相同的土壤水分供给下，I 气候年型具有较大的土壤水分利用效率，源于其主要生育期大气相对湿润。II 气候年型由于具有较高的播前土壤含水量，尽管土壤水分与土壤水分利用效率成反比，但是其土壤水分利用效率依然较大。III 气候年型与 IV 气候年型各只占据一个水分优势，致使它们土壤水分利用效率相对于 I 气候年型与 II 气候年型偏低。而 V 气候年型则不仅降水利用效率低，且土壤水分利用效率也同样最低。

3 讨论与结论

随着全球气候变暖，许多研究认为干旱和半干旱地区水分短缺问题将进一步加重^[21]。根据定西市统计局资料，由于品种或其他管理措施的变化，1964—2011 年定西春小麦产量变化可分为 2 个主要阶段(各阶段内产量变动平稳,无显著趋势)，分别为 1964—1982 年的低产阶段(平均产量为 789.3 kg/hm²) 与 1983—2011 年的相对高产阶段(平均产量为 1 250.9 kg/hm²)。而本试验观测位于第二个阶段，从产量变动来看，试验观测期间春小麦产量平均为 1 625.7 kg/hm²，且 1987—2011 年间无显著变化趋势，可认为品种和管理措施的

变化对该试验春小麦产量无显著影响，产量的年际变动只受气象要素变动的影响。本研究分析了春小麦主要生育期的气候要素变化，发现本研究所所在区域春小麦主要生育期气候存在暖干化倾向。日照时数升高意味着辐射量的增加，空气温度增加引起空气饱和差增大，这两个因素共同作用使所研究地区的大气蒸发量(由蒸发量表示)增大。而该区同期降水量并没有明显的增加，因而该区大气干湿状况呈变干的趋势。半干旱雨养农业区作物生长发育水分供给原本就不足，气候变化势必将更加加剧该区春小麦生长发育水分短缺问题。

春小麦主要生育期降水与播前土壤水分相互影响，共同制约着春小麦降水利用效率和播前土壤水分利用效率的变化。当播前土壤水分较大时，有利于短生育期作物如春小麦，可使其干物质积累加快^[22-23]，并增大了叶面积指数，从而提高春小麦最终产量^[24]；若生育期降水少，则会获得较大的降水利用效率(即相同产量下，降水量越大，降水利用效率越低)。然而在半干旱雨养农业区，水分是春小麦产量提高最主要的限制因素，当播前土壤水分大，生育期降水又多时，春小麦产量会大幅增加，但增加的降水量对水分效率的降低程度小于增加的产量对水分利用效率的提高程度，因此在相同播前土壤水分条件下，生育期大气较

为湿润时降水利用效率往往高于生育期降水少的年份。不同大气状况下的 2 条回归直线存在交点, 即降水利用效率在土壤水分 < 125 mm 之前, 土壤水分越大, 相对湿润的大气环境条件越有利于降水利用效率提高, 增加的降水并不足以降低降水利用效率, 说明在土壤水分 < 125 mm 之前, 降水对产量的提高依旧制约着降水利用效率的变化。同时, 在大气逐渐干燥的过程中, 土壤水分利用效率不断减小, 但是在大气干燥状况 > 425 mm 之后, 湿润的土壤反而有利于提高土壤水分利用效率, 说明在大气较为干燥时, 春小麦产量依赖于播前土壤水分供给。虽然土壤水分增大, 但是由于产量的提高, 土壤水分利用效率反而会增大。所以, 尽管 1987—2011 年试验地区大气蒸发量显著增大, 但是由于 1987—2011 年播前土壤水分提高显著, 从而使得 1987—2011 年土壤水分利用效率并未表现出显著的下降趋势。虽然土壤水分利用效率依然与大气蒸发量的提高呈相反的变化趋势, 即 1987—1993 年大气蒸发量小时, 土壤水分利用效率相对较大, 此后随着大气蒸发量的升高, 土壤水分利用效率变得相对较低。

一般认为越是处于水分限制条件下的植物对水分变化越敏感, 水分利用效率越高^[25]。但是本研究发现播前土壤含水量低, 且生育期大气非常干燥的情况下, 每 1 mm 降水和播前土壤水分利用率反而最低(低产年份)。而随着播前含水量以及生育期天气状况的改善, 春小麦产量越高, 春小麦对不同来源的水分利用效率也逐渐提高。说明干旱环境限制作物产量, 较为适宜的环境能够提高作物的水分利用效率。因此, 可得出作物的最大水分利用效率出现在环境相对较为适宜的条件下。

作物的水分利用效率在获得最大产量之前存在一个最大值, 但是从本研究分析来看, 无论是降水还是播前土壤水分, 均是随着气候条件的改善, 效率逐渐增大, 最大值并未出现, 说明本试验所在地区, 半干旱雨养区春小麦产量离潜在最大产量还有很大差距。从国内外的研究文献中可知, 若不考虑纬度以及播种密度品种等的差异, 水分供给充足的春小麦产量可达到 5 000~7 000 kg/hm²^[26], 本试验所在地环境最适宜的高产年份

下获得的最大产量仅为 3 300 kg/hm², 仅接近最大观测产量的 1/2。由此可见, 该区春小麦产量提高依然存在很大的空间, 而且随着生长环境的改善水分利用效率在不断增加, 说明改变或者选择更适宜的年份种植春小麦是半干旱雨养区农业生产的关键。

相同的水量供给, 50 cm 土层土壤水分的利用效率明显高于主要生育期降水的利用效率。最不利的气候年型下, 相同的水分, 降水和播前土壤水分利用效率接近, 每 100 mm 水分均只能生产 500 kg/hm² 春小麦。但是在较为有利的气候条件下, 土壤水分生产效率明显大于降水的生产效率。在相对最优的气候条件下(高产年份), 每 100 mm 土壤水分可以产生 3 000 kg/hm² 左右的春小麦, 而每 100 mm 降水只能生产 1 600 kg/hm²。说明增加播前土壤水分更有利于该区春小麦产量提高。

较高的播前土壤水分有利于保产, 获得高产依旧取决于主要生育期的大气干湿状况。分析不同的气候年型, 可以发现春小麦产量最高的年型(高产年份)对应相对较高的土壤水分和主要生育期大气偏湿的气候。而中高产年份尽管播前土壤水分最大, 但是由于生育期大气相对较干, 产量显著低于高产年份。同时可以看出, 春小麦获得高产往往更取决于主要生育期的天气状况, 尽管播前土壤水分利用效率高于降水利用效率, 但是播前土壤水分毕竟有限, 研究区域 50 cm 土层土壤田间持水量为 126.5 mm, 试验开展年份最大的土壤含水量也基本接近此值, 即使土壤水分利用效率再大, 也无法大于此值。较高的播前土壤水分能够保证获得一定的水平的产量, 但是要获得更大的春小麦产量还是有赖于主要生育期的大气干湿状况。因此该区农户可以选择在底墒较好的年份种植春小麦, 即使生育期大气较为干燥, 也能够保证一定的产量, 若当年遇到较好的气象条件, 春小麦产量可能会达到一个相对较高的水平。

在气候暖干化背景下, 位于半干旱雨养农业区的定西市安定区春小麦降水利用效率和播前土壤水分利用效率无明显变化趋势。但是依据春小麦产量, 使用春小麦主要生育期大气状况和播前 50 cm 土层土壤含水量可以将半干旱雨养农业区春小麦生长气候年型可以分为 5 类, 即高产年份、

中高产年份、中产年份、中等偏低产年份、低产水平年份。在不利的的气候条件下，春小麦对降水和播前土壤水分利用率低，且随着供水条件的改善，春小麦降水和播前土壤水分利用效率提高。试验所在地区春小麦产量离潜在最大产量还有很大的差距，选择底墒较好、天气湿润的年份播种春小麦可以保证获得一定水平的产量。

参考文献:

- [1] 魏虹, 林魁, 李凤民, 等. 有限灌溉对半干旱区春小麦根系发育的影响[J]. 植物生态学报, 2000, 24(1): 106-110.
- [2] 杨文雄, 柳娜, 刘效华, 等. 半干旱区膜上覆土穴播对春小麦旗叶光合作用和水分利用的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2264-2272.
- [3] 葛丽娟, 王小平, 王清涛, 等. PROSAIL 模型在半干旱区春小麦不同干旱胁迫条件下的适用性分析[J]. 干旱气象, 2017, 35(6): 926-933.
- [4] 韩凡香, 常磊, 柴守玺, 等. 半干旱早雨养区秸秆带状覆盖种植对土壤水分及马铃薯产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(7): 874-882.
- [5] 张开乾, 郑立龙. 陇中半干旱地区地膜覆盖和补灌对玉米及土壤温湿度影响[J]. 节水灌溉, 2016(2): 51-54.
- [6] BLUM A. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential—are they compatible, dissonant, or mutually exclusive[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2005, 56: 1159-1168.
- [7] CONDON A G, RICHARDS R A, REBETZKE G J, et al. Breeding for high water-use efficiency[J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55: 2447.
- [8] 房全孝, 陈雨海, 李全起, 等. 灌溉对冬小麦水分利用效率的影响研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 34-39.
- [9] MEDRANO H, TOMÁS M, MARTORELL S, et al. From leaf to whole-plant water use efficiency(WUE) in complex canopies: Limitations of leaf WUE as a selection target[J]. 作物学报(英文版), 2015, 3: 220-228.
- [10] GAGO J, DOUTHE C, FLOREZ-SARASA I, et al. Opportunities for improving leaf water use efficiency under climate change conditions[J]. Plant Science An International Journal of Experimental Plant Biology, 2014, 226: 108-119.
- [11] MEDRANO H, FLEXAS J, GALM S J. Variability in water use efficiency at the leaf level among Mediterranean plants with different growth forms[J]. Plant & Soil, 2009, 317: 17-29.
- [12] JONES H G. Plants and microclimate. A quantitative approach to environmental plant physiology[M]. London: Cambridge University Press, 1992.
- [13] RODRIGUEZ D, SADRAS V O. The limit to wheat water-use efficiency in eastern Australia. I. Gradients in the radiation environment and atmospheric demand[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2007, 58: 520-525.
- [14] SADRAS V O, RODRIGUEZ D. The limit to wheat water-use efficiency in eastern Australia. II. Influence of rainfall patterns[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2007, 58: 657-69.
- [15] 许振柱, 周广胜. 农业水分利用率及其对环境和管理工作活动的响应[J]. 自然资源学报, 2003, 18(3): 294-303.
- [16] 温斐斐, 孙敏, 邓联峰, 等. 旱地小麦休闲期深翻覆盖对土壤水分及其利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(11): 1358-1364.
- [17] OLESEN J E, TRNKA M, KERSEBAUM K C, et al. Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change[J]. European Journal of Agronomy, 2011, 34: 96-112.
- [18] CHALLINOR A J, WATSON J, LOBELL D B, et al. Smith DR, Chhetri N. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation[J]. Nature Climate Change, 2014, 4: 287-291.
- [19] LOBELL D B, BURKE M B. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2010, 150: 1443-1452.
- [20] TEAM R D C. R: a language and environment for statistical computing[J]. Computing, 2011, 1: 12-21
- [21] JIN Z, ZHUANG Q, TAN Z, et al. Do maize models capture the impacts of heat and drought stresses on yield using algorithm ensembles to identify successful approaches[J]. Global Change Biology, 2016, 22: 3112-3126.
- [22] NIELSEN D C, HALVORSON A D, VIGIL M F. Critical precipitation period for dryland maize production[J]. Field Crops Research, 2010, 118: 259-263.
- [23] LYON D J, BOA F, ARKEBAUER T J. Water-yield relations of several spring-planted dryland crops following winter wheat[J]. Journal of Production Agriculture, 1995, 8: 281.
- [24] 刘静, 马力文, 张学艺. 宁夏灌区春小麦 LAI 与生长性状和产量的关系[J]. 干旱气象, 2017, 35(3): 358-366.
- [25] HUXMAN T E, SMITH M D, FAY P A, et al. Convergence across biomes to a common rain-use efficiency[J]. Nature, 2004, 429: 651.
- [26] 李军, 王立祥, 邵明安, 等. 黄土高原地区小麦生产潜力模拟研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16(2): 161-165.