

# 甘肃省冬小麦干旱时空分布特征研究

张诗祥, 马晓璐, 施红霞, 袁淑杰

成都信息工程大学, 四川 成都

收稿日期: 2022年10月4日; 录用日期: 2022年11月4日; 发布日期: 2022年11月15日

## 摘要

为了分析甘肃省冬小麦干旱时空分布的主要特征, 本文用中国地面气候资料日值数据集(V3.0), 全国地理信息资源目录服务系统中的甘肃局部矢量地图数据, 通过水分亏缺指数公式、作物水分需求量公式、干旱频率公式、FAO Penman-Monteith公式和局部多项式插值法, 对甘肃省冬小麦种植区的水分亏缺指数以及干旱灾害等级进行时间和空间上的分布进行分析, 结果表明: 1) 甘肃省冬小麦的水分亏缺指数较高, 相比较于其他省份的指数, 大约会高出10%到20%, 这说明甘肃省的冬小麦对水分的需求比较大, 自然的大气降水量基本无法满足甘肃冬小麦的生长发育, 而水分的供给不足会直接导致最终小麦的产量不足。2) 在时间上, 3个时期的水分亏缺指数(CWDI)都比较平缓, 年变化并不大, 指数大小为全生育期 > 乳熟 - 成熟期 > 拔节 - 孕穗期, 拔节期、乳熟期、全生育期的年水分亏缺指数分别在68%、55%、70%附近摆动, 而最大值分别为91%、79%、81%, 除了在175~1991年和2010~2016年CWDI有一个明显的下降, 其余年份几乎没有什么波动, 而最近几年, 水分亏缺指数处于下降趋势, 这说明甘肃省近些年的降水量是在增加的。3) 在空间上, 干旱频率大小为全生育期 > 乳熟 - 成熟期 > 拔节 - 孕穗期, 在拔节期、乳熟期、全生育期的严重干旱概率分别为27%~95%、40%~91%、70%~95%, 重旱概率分别为5%~51%、5%~27%、4%~23%, 中旱概率分别为0%~25%、3%~22%、1%~6%, 不同地区的干旱等级以及出现的概率有一个较大的差距, 整个研究区域呈现中央干旱较少较弱, 逐渐向四周扩散的局面, 而四周又以文县、武都、环县最为严重。

## 关键词

冬小麦, 作物水分亏缺指数, 干旱频率, 时空分布分析

## Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Winter Wheat Drought in Gansu Province

Shixiang Zhang, Xiaolu Ma, Hongxia Shi, Shujie Yuan

Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Received: Oct. 4<sup>th</sup>, 2022; accepted: Nov. 4<sup>th</sup>, 2022; published: Nov. 15<sup>th</sup>, 2022

文章引用: 张诗祥, 马晓璐, 施红霞, 袁淑杰. 甘肃省冬小麦干旱时空分布特征研究[J]. 气候变化研究快报, 2022, 11(6): 943-956. DOI: 10.12677/ccrl.2022.116099

## Abstract

In order to analyze the main characteristics of temporal and spatial distribution of winter wheat drought in Gansu Province, the Chinese surface climate data daily data set (V3.0) and the local vector map data of Gansu Province in the National Geographic Information Resource Catalogue Service System were used. The Temporal and spatial distribution of water deficit index (CWDI) and drought disaster grade in winter wheat growing areas of Gansu Province were analyzed by using the CWDI formula, crop water demand formula, drought frequency formula, FAO Penman-Monteith formula and local polynomial interpolation method. The results showed that: 1) The water deficit index of winter wheat in Gansu Province was higher, about 10% to 20% higher than that of other provinces, which indicated that the demand for water of winter wheat in Gansu Province was relatively large, and the natural atmospheric precipitation could not meet the growth and development of wheat in Gansu, and the insufficient supply of water would directly lead to insufficient yield of wheat. 2) Temporally, the water deficit index (CWDI) of the three stages is relatively flat, and the annual change is not large. The index is in the order of the whole growth period > milk-maturity period > jointing-booting period. The annual CWDI of jointing stage, milk-maturity stage and the whole growth period swings around 68%, 55% and 70%, respectively, and the maximum values are 91%, 79% and 81%, respectively. Except for a significant decline in CWDI in 175~1991 and 2010~2016, there is almost no fluctuation in other years, while in recent years, the water deficit index is in a downward trend, which indicates that the precipitation in Gansu Province is increasing in recent years. 3) The spatial distribution of drought frequency is in the order of whole growth period > milky mature-mature period > jointing-booting period. The probability of severe drought at jointing stage, milky maturity stage and whole growth period is 27%~95%, 40%~91%, 70%~95% respectively, and the probability of severe drought is 5%~51%, 5%~27%, 4%. The probability of moderate drought was 0%~25%, 3%~22% and 1%~6%, respectively. There was a big difference in the grade and probability of drought in different areas. The drought in the central area was less and weaker, and gradually spread to the surrounding areas, while the most serious drought was in Wenxian, Wudu and Huanxian.

## Keywords

Winter Wheat, Crop Water Deficit Index, Drought Frequency, Spatio-Temporal Distribution Analysis

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国人均水资源占有量为 2100 立方米, 仅仅为世界人均水资源占有量的四分之一, 这使得我国的水资源十分的紧缺。南水北调工程虽然解决了一部分地区水资源的匮乏, 但是在有一些地方, 水资源带来的压力仍然很大, 而作为中国西北部的甘肃省, 人均水资源占有量仅仅为 1119 立方米, 这对甘肃农作物的生长带来了极大的压力。甘肃地处青藏高原、蒙古、新疆和黄土高原之间, 与海洋的距离十分遥远, 因此高空水汽的含量十分不充裕, 降雨量十分稀少, 多年的平均的降水为 281 毫米, 还不到全国的一半, 而在其境内的黄河、长江以及内陆河所能带来的水资源也十分贫瘠, 这样特殊的地理环境让甘肃省的农业发展进度缓慢。

而小麦作为甘肃农业的一大重要支柱，它的产量高低对甘肃民生的影响有着极大的作用，在 2021 年发布的中国统计年鉴中，小麦的产量占到了甘肃省粮食产量的五分之一，但仍然产不足需，每年近 200 万吨的缺口使得对这方面的种植结构升级迫在眉睫，而干旱又是小麦产量问题的重中之重。

干旱作为影响农作物产量的最主要自然灾害，在甘肃省所带来的危害是中国许多地方难以企及的，旱灾面积与粮食单产之间有着十分显著的关系，0.77 的相关系数令我们不得不对其产生足够的重视，即使在科技如此发达的今天，旱灾所带来的粮食减产也让我们难以承受。

由于干旱的分布是不同的，则采取的措施也是不同的，对于干旱的时空分布，通过降水量平均值来做出一个等级划分[1]，对于干旱所带来的灾害影响，对于干旱、半干旱地区植被结构如何重新构建提出了相应的应对方法[2]。对全国农业综合干旱指数的分析发现甘肃的干旱灾害发生概率十分大[3]，此外，通过对 K 指数、SPI 指数、CI 指数和 MCI 指数的分析与实际土壤干旱的对比来得到甘肃地区发生干旱的概率以及严重程度也是一大进展[4]。全球变暖也给甘肃干旱情况带来了一定的影响，使得干旱面积进一步的扩大[5]，对于干旱时期小麦水资源的来源及该如何可持续的开发利用问题进行了分析[6]，对于甘肃省的干旱情况，也有研究者对于旱地的小麦种植技术提出了新的想法，并且加以实施使得旱地小麦的产量得以增加[7]，由于小麦的不同外源、不同生长期和不同基因型，干旱胁迫对于小麦造成的生理生化、产量、形态指标量也是不同的[8]-[13]，还有学者利用 APSIM 平台，对陇西地区的冬小麦旱灾概率出现时期做出了研究[14]，对于甘肃省冬小麦的气候进行分析，然后得到其适合的种植区域以及品种[15][16]，但是对于甘肃整个地区的冬小麦干旱时空分布的特征研究仍然没有一个完整的分析。

小麦是一种在世界各地广泛种植的禾本科植物，是世界三大谷物之一，是世界上总产量第二的粮食作物(6.51 亿吨)，仅次于玉米(2010 年)。在我国，小麦已有 5000 多年的种植历史，目前，我国小麦的种植面积和总产量仅次于水稻，居我国粮食作物第二位。小麦颖果是人类的主食之一，磨成面粉后可制作面包、馒头、饼干等食物发酵后可制成啤酒、伏特加或者生质燃料。小麦亦具有较高的营养价值，富含淀粉、蛋白质、脂肪、矿物质、钙、铁、硫胺素、核黄素、烟酸、维生素 A 及维生素 C 等。冬小麦作为我国小麦的主要作物，冬种夏收，之后再种植上夏种秋收的玉米，对于土地资源的合理利用十分的完善，冬小麦在甘肃的分布也十分的广泛，但由于甘肃的地理位置原因、降水原因、供水问题等等，该地的农业对于水资源的匮乏是一个老生常谈的问题，而对于其干旱时空分布特征的研究可以帮助我们更加清晰的了解到甘肃省冬小麦对于水分的需求大小，引导冬小麦的种植结构得到进一步的更新，对于甘肃省不同时间、不同地区的小麦供水变得精确，把握好每一分水资源，使得旱灾对于该地冬小麦的破坏得到降低。让甘肃省的冬小麦产量能够提升，从而不再依赖外地进口，实现自产自用，供需完善。

## 2. 资料和方法

### 2.1. 研究区概括

甘肃省位于中国西北地区，东通陕西，南至四川、青海，西达新疆，北到宁夏、内蒙古。总面积 42.58 万平方千米，处在北纬 32°11'~42°57'，东经 92°13'~108°46'，气候类型从北向南包括高原山地气候、温带大陆性干旱气候、温带季风气候和亚热带季风气候四大类型。甘肃全年平均温度是 6.0℃~19.0℃，甘肃全省各地年降水量在 36.6~734.9 mm，不到中国平均值的一半，大致从东南向西北递减，乌鞘岭以西降水明显减少，陇南山区和祁连山东段降水偏多。

### 2.2. 资料概括

此研究主要是针对甘肃陇东、陇西地区的干旱时空分布特征的研究，数据来源于中国地面气候资料日值数据集(V3.0)，数据经过质量控制后，1951~2010 年各要素数据的质量及完整性相对于以往发布的地

面同类数据产品明显提高, 期间纠正了大量的错误数据, 并对数字化遗漏数据进行了补录, 使得数据质量得到明显提升各要素项数据的实有率普遍在 99% 以上, 数据的正确率均接近 100%。通过对甘肃主要冬小麦种植区的筛选, 选择了环县、华家林、麦积等等站点, 并且选择了数据集里面站点的平均温度、日最高温度、日最低温度、平均相对湿度、20~20 时累计日降水量、平均风速、日照时数等 7 个参数。

地理位置数据来源于全国地理信息资源目录服务系统中的甘肃局部矢量地图数据, 再运用 ArcGIS 软件对甘肃地区的行政区域进行整合。

## 2.3. 研究方法

### 2.3.1. 水分亏缺指数(CWDI)的算法

即由于 CWDI 的定义和算法, 为了更加准确和贴合实际情况, 需要对每日的 CWDI 进行一个加权计算, 使得水分在土壤中对冬小麦的之后的影响能够被计算进去, 而不会出现误差过大的现象, 因此每日的 CWDI 的计算公式是:

$$CWDI = a \times CWDI_k + b \times CWDI_{k-1} + c \times CWDI_{k-2} + d \times CWDI_{k-3} + e \times CWDI_{k-4} \quad (1)$$

该算式中: CWDI 为该日的水分亏缺指数;  $CWDI_k$  为过去第 1 天至过去第 10 天的水分亏缺指数;  $CWDI_{k-1}$  为过去第 11 天至过去第 20 天的水分亏缺指数;  $CWDI_{k-2}$  为过去第 21 天至过去第 30 天的水分亏缺指数;  $CWDI_{k-3}$  为过去第 31 天至过去第 40 天的水分亏缺指数;  $CWDI_{k-4}$  为过去第 41 天至过去第 50 天的水分亏缺指数;  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$  为对应的天数的水分亏缺指数权重系数,  $a$  为 0.30、 $b$  为 0.25、 $c$  为 0.2、 $d$  为 0.15 和  $e$  为 0.1。

CWDI 的基础算式为:

$$CWDI_k = \begin{cases} \frac{ET_{c_k} - P_k}{ET_{c_k}} \times 100\% & ET_{c_k} > P_k \\ 0 & ET_{c_k} \leq P_k \end{cases} \quad (2)$$

该算式中:  $CWDI_k$  为  $k$  时间内(10 d)的水分亏缺指数(%),  $ET_{c_k}$  为  $k$  时间内(10 d)的累计作物水分需求量;  $P_k$  为  $k$  时间内(10d)的累计降水量, 而当  $ET_{c_k} \leq P_k$  时, 认为作物没有处于水分亏缺状态。

作物水分需求量的公式为:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (3)$$

该算式中:  $ET_0$  为当天的作物参考蒸散量;  $K_c$  为小麦的作物系数, 由于小麦的不同生育期对于水分的需求不同,  $K_c$  的值也会随之变化, 根据中华人民共和国气象行业标准小麦干旱灾害等级给出的冬小麦作物系数(表 1)。

**Table 1.** Crop coefficient  $K_c$  values for different fertility stages of wheat

**表 1.** 小麦不同生育期阶段的作物系数  $K_c$  值

时段	初期阶段	前期阶段	中期阶段	后期阶段
界定	从发芽到覆盖土地 10%	从覆盖土地 10% 到 80%	从覆盖土地 80% 到开始成熟	从开始成熟道收获
取值	0.3~0.4	0.7~0.8	1.05~1.2	0.65~0.75

注: 取值第一个数字表示在高湿(最小相对湿度 > 70%)和弱风(风速 < 5 m/s)条件下, 第二个数字表示正在低湿(最低相对湿度 < 20%)和大风(风速 > 5 m/s)条件下。



对于  $ET_0$ , 采取联合国粮农组织推荐的 FAO Penman-Monteith 公式求取。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{\text{mean}} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (4)$$

该算式中:  $ET_0$  为可能蒸散量(mm/d);  $\Delta$  为饱和水汽压曲线斜率(kPa/°C);  $R$  为地表净辐射(MJ/(m·d));  $G$  为土壤热通量(MJ/(m<sup>2</sup>·d));  $\gamma$  为干湿表常数(kPa/°C);  $T_{\text{mean}}$  为日平均气温(°C);  $u_2$  为 2 m 高出风速(m/s);  $e_s$  为饱和水汽压(kPa);  $e_a$  为实际水汽压(kPa)。

### 2.3.2. 干旱频率的算法

由前面计算出的作物水分亏缺指数, 再根据不同的生育期与表 2 小麦干旱灾害等级指标进行一个归类, 即将每个站点发生不同旱灾的次数与所选资料的总年份进行比较。

$$F = n/N \times 100\% \quad (5)$$

该算式中:  $n$  为站点出现旱灾的次数,  $N$  为总的年份数。

### 2.3.3. 甘肃冬小麦生长期

根据[15]提供的甘肃冬小麦物候期以及中国统计年鉴上资料的汇总, 总结的甘肃冬小麦不同地区生长期见表 2。

**Table 2.** Growth period of winter wheat in Gansu (month\ten)

**表 2.** 甘肃冬小麦生长期(月\旬)

地点	经度	纬度	播种	出苗	三叶生长	停止	返青	拔节	孕穗	开花	乳熟	成熟
华家岭	105.01	35.23	9\下	10\中	10\下	11\上	3\下	5\中	6\上	6\中	7\上	7\下
崆峒	106.4	35.33	10\上	10\中	10\下	11\下	3\中	4\下	5\中	5\下	6\中	6\下
合作	102.54	35.59	10\上	10\中	10\下	11\上	3\下	4\下	5\下	6\上	6\中	7\上
麦积	105.52	34.43	10\上	10\中	11\上	11\中	3\上	4\中	5\上	5\中	6\上	6\下
白银	104.09	36.33	9\下	10\上	10\中	11\上	3\上	4\中	5\中	6\下	6\下	7\中
西峰	107.38	35.44	9\中	9\下	10\中	11\中	3\中	4\中	5\中	5\下	6\中	7\上
临洮	103.52	35.22	9\下	10\上	10\下	11\中	3\下	5\上	6\上	6\上	7\上	7\中
环县	107.18	36.34	9\下	10\上	10\中	11\中	3\中	4\下	5\中	5\下	6\中	7\上
武都	104.55	33.24	10\中	10\下	11\中			3\中	4\中	4\下	5\上	6\上

### 2.3.4. MK 突变检验法

对于具有  $n$  个样本量的时间序列  $X$ , 构造一秩序列:

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, i \quad (6)$$

可见, 秩序列  $s_k$  是第  $i$  时刻数值大于  $j$  时刻数值个数的累计数。在时间序列随机独立的假定下, 定义统计量:

$$UF_k = \frac{s_k - E(s_k)}{\sqrt{\text{Var}(s_k)}} \quad k=1,2,\dots,n \quad (7)$$

式中  $UF_1 = 0$ ,  $E(s_k)$ ,  $\text{Var}(s_k)$  是累计数  $s_k$  的均值和方差, 在  $x_1, x_2, \dots, x_n$  相互独立, 且有相同连续分布时, 它们可由下式算出:

$$E(s_k) = \frac{n(n+1)}{4} \quad \text{Var}(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (8)$$

$UF_i$  为标准正态分布, 它是按时间序列  $x$  顺序  $x_1, x_2, \dots, x_n$  计算出的统计量序列, 给定显著性水平  $\alpha$ , 查正态分布表, 若  $|UF_i| > U_\alpha$ , 则表明序列存在明显的趋势变化。按时间序列  $x$  逆序  $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$ , 再重复上述过程, 同时使  $UB_k = -UF_k$ ,  $k = n, n-1, \dots, 1$ ,  $UB_1 = 0$ 。这一方法的优点在于不仅计算简便, 而且可以明确突变开始的时间, 并指出突变区域。

### 3. 研究结果

#### 3.1. 甘肃省冬小麦水分亏缺指数(CWDI)在干旱等级的判别

根据中华人民共和国气象行业标准小麦干旱灾害等级中提出, 依据小麦主要发育期、全生育期的作物水分亏缺率, 确定小麦干旱等级指标; 其中作物水分亏缺率适用于全国麦区, 将小麦干旱灾害分为轻旱、中旱、重旱、严重干旱四级, 见表 3。

Table 3. Wheat drought disaster level indicators

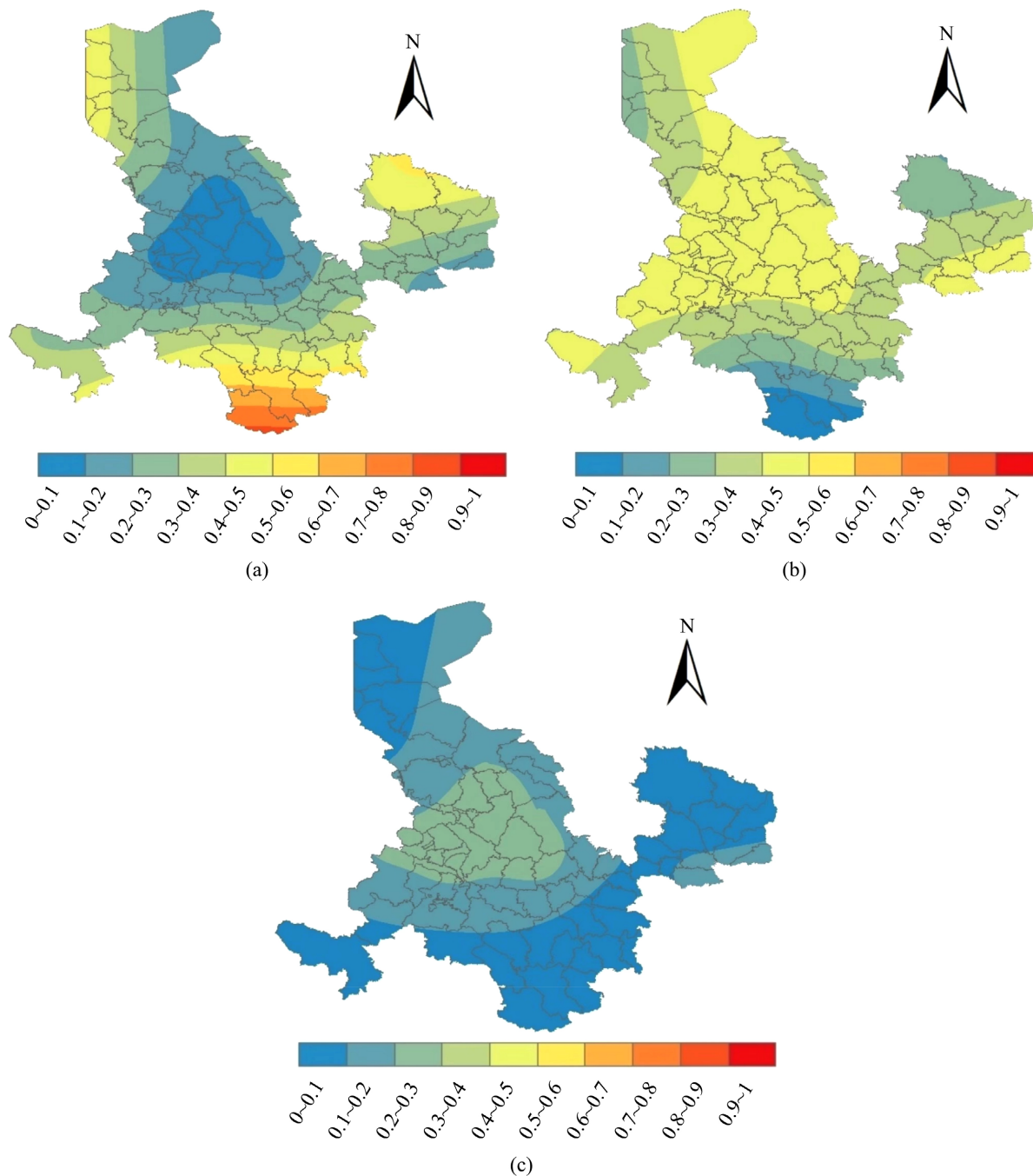
表 3. 小麦干旱灾害等级指标

因子	时段	等级			
		轻旱	中旱	重旱	严重干旱
作物水分亏缺率 CWDI(%)	全生育期	CWDI < 15	15 ≤ CWDI < 30	30 ≤ CWDI < 50	CWDI ≥ 50
	播种期	CWDI < 40	40 ≤ CWDI < 50	50 ≤ CWDI < 60	CWDI ≥ 60
	拔节-孕穗	CWDI < 15	15 ≤ CWDI < 45	45 ≤ CWDI < 70	CWDI ≥ 70
	乳熟-成熟期	CWDI < 20	20 ≤ CWDI < 35	35 ≤ CWDI < 45	CWDI ≥ 45

#### 3.2. 甘肃省冬小麦干旱频率的时空分布

##### 3.2.1. 甘肃省冬小麦拔节至孕穗期干旱概率

根据图 1(a)~(c)发现, 在甘肃冬小麦拔节到孕穗这一较关键时期, 1) 严重干旱概率(CWDI 指数 > 70%)总范围为 26%~95%, 平均值在 50%, 最大值(95%)出现在甘肃省南部的文县, 其次为武都区和原县南部的 81%, 最小值(26%)出现在甘肃省中部的榆中县、临洮县和安定区, 并且呈现从甘肃中部往四周扩散逐渐增大的趋势。2) 而重旱概率(CWDI 指数处于 45%~70%)总范围为 5%~51%, 平均值为 37%, 在临洮县达到最大值 48%, 在文县出现最小值 5%, 其次为武都的 7%, 变化趋势为从甘肃中部向四周逐渐减少。3) 出现中旱概率(CWDI 指数处于 15%~45%间)概率很小, 范围为 0%~25%, 平均值为 11%, 最大值(25%)在华家林和白银区, 最小值出现在西和县 0%, 趋势呈现中部高, 四周低。4) 空间分布上重旱概率和中旱概率的趋势大致一致, 而严重干旱概率则与之相反, 武都区与文县出现较极端的干旱灾害分布, 严重干旱概率过高, 使得其冬小麦的在拔节时期对水分的需求很大, 这可能导致小麦的先天不足, 最终导致产量的不足, 而华家岭区域的干旱频率相对于其他地区是最好的。



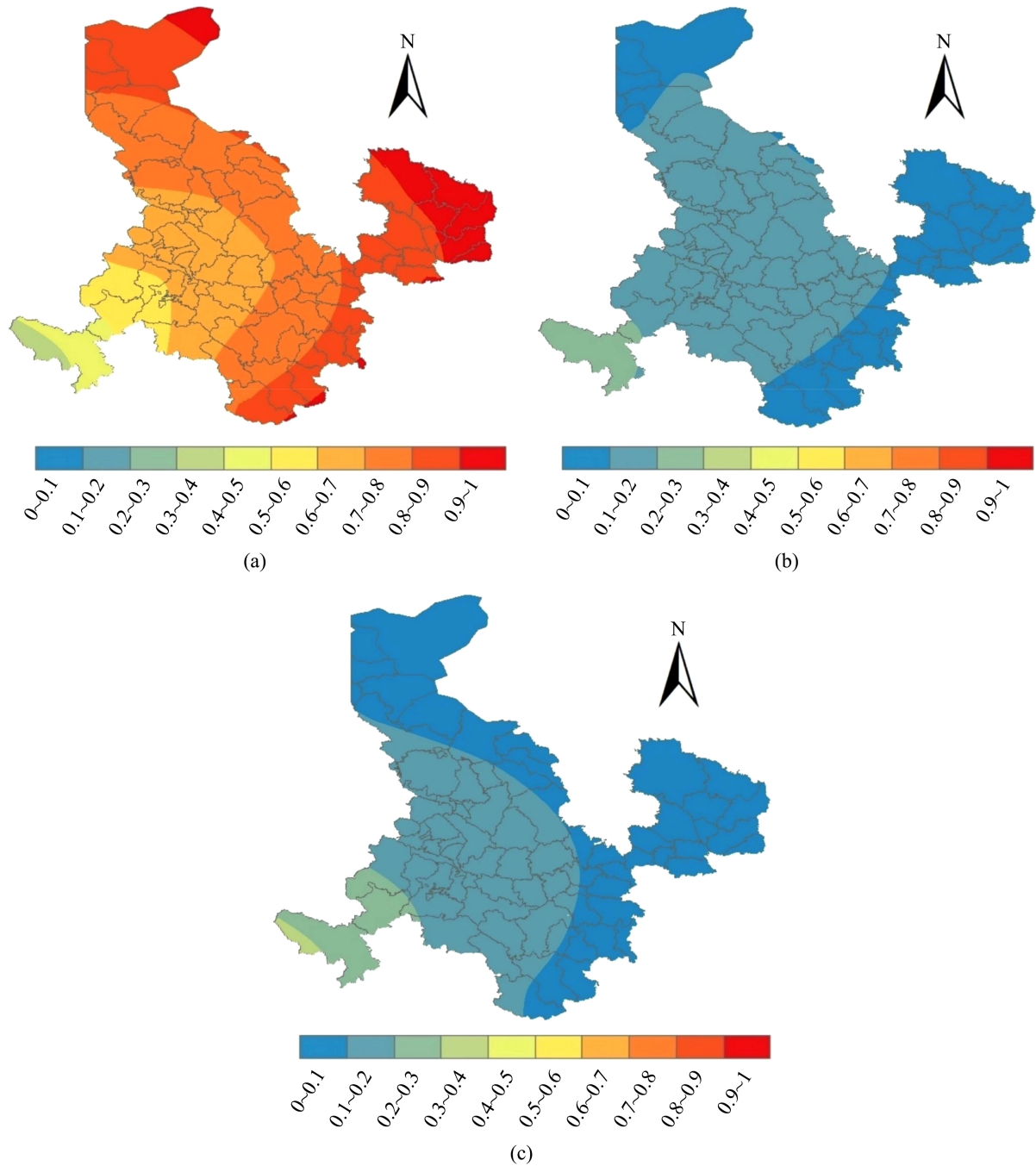
**Figure 1.** Spatial and temporal distribution of drought probability during the plucking-earling period of winter wheat in Gansu Province from 1956 to 2016. (a) Severe drought; (b) Severe drought; (c) Medium drought

**图 1.** 1956~2016 年甘肃省冬小麦拔节 - 孕穗期干旱概率时空分布图。(a) 严重干旱; (b) 重旱; (c) 中旱

### 3.2.2. 甘肃省冬小麦乳熟至成熟期干旱概率

根据图 2(a)~(c), 乳熟至成熟期这一对于小麦产量最为关键的小麦关键期, 1) 严重干旱概率(CWDI 指数  $> 70\%$ )总范围为 40%~91%, 平均值在 72%, 最大值(91%)出现在甘肃省东北部的环县, 其次为民勤县的 90%, 最小值(40%)出现在甘肃省西南部的玛曲县, 并且呈现出从玛曲向东北方向呈扇形递增的趋势。2) 而重旱概率(CWDI 指数处于 45%~70%)总范围为 5%~27%, 平均值为 13%, 在碌曲县达到最大值 27%,

在两当县出现最小值 5%。3) 出现中旱概率(CWDI 指数处于 15%~45%间)概率很小, 范围为 3%~22%, 平均值为 12%, 最大值(22%)为碌曲县和夏河县, 华池县出现了最小值 3%。4) 中旱和重旱分布区基本相同, 而严重干旱和前两者相反, 环县和华池县成为乳熟期干旱最严重的区域, 而玛曲及周边的水分压力最小, 和拔节期相比, 甘肃省整体的干旱灾害等级更高, 说明乳熟期的水分亏缺更加的严重, 这与实际的夏季的到来形成对应, 也是决定冬小麦亩产的最关键时期。

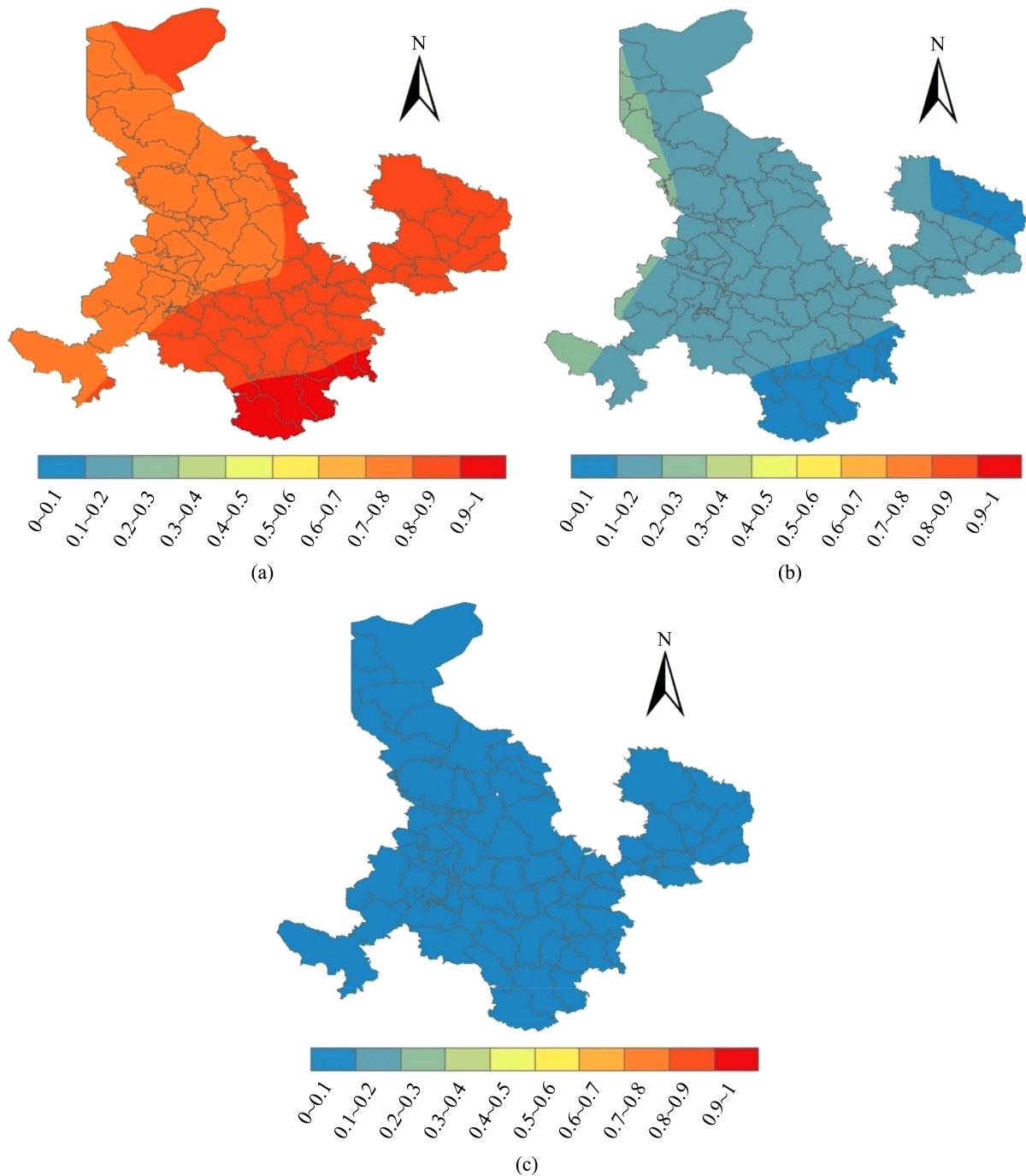


**Figure 2.** Spatial and temporal distribution of drought probability during the milking-maturity period of winter wheat in Gansu Province, 1956~2016. (a) Severe drought; (b) Severe drought; (c) Medium drought

**图 2.** 1956~2016 年甘肃省冬小麦乳熟 - 成熟期干旱概率时空分布图。(a) 严重干旱; (b) 重旱; (c) 中旱

### 3.2.3. 甘肃省冬小麦全生育期干旱概率

根据图 3(a)~(c), 全生育期的冬小麦干旱情况最为严重, 中旱的概率最大仅仅为 6%, 重旱的平均值也仅为 15%, 大部分地区都处在严重干旱的, 在武都、环县更是高达 95%、91%, 平均值也是来到了 81% 的一个高值, 整个西和以东的严重干旱概率都突破了 90%, 发展趋势表现为逐渐西南行, 逐渐减弱。



**Figure 3.** Spatial and temporal distribution of drought probability for the whole reproductive period of winter wheat in Gansu Province, 1956-2016. (a) Severe drought; (b) Severe drought; (c) Medium drought

**图 3.** 1956-2016 年甘肃省冬小麦全生育期干旱概率时空分布图。(a) 严重干旱; (b) 重旱; (c) 中旱



1) 严重干旱概率(CWDI 指数 > 70%)总范围为 70%~95%，平均值在 81%，最大值(95%)出现在甘肃省南部武斗区的，最小值(70%)出现在甘肃省中部的陇西县和华家岭，并且呈现从甘肃夏河县、临夏县和永登县向东边逐渐增大的趋势。2) 而重旱概率(CWDI 指数处于 45%~70%)总范围为 4%~23%，平均值为 16%，在永登县达到最大值 23%，在徽县出现最小值 4%，变化趋势为从甘肃甘肃夏河县、临夏县和永登县向东边逐渐减少。3) 出现中旱概率(CWDI 指数处于 15%~45%间)概率很小，范围为 1%~6%，平均值为 3%，最大值(6%)在华家林，最小值出现在原县，变化趋势较为平缓。4) 全生育期反映了拔节期和乳熟期的一个中的趋势，并且发现严重干旱的概率更加频繁，这与上文的调查背景相似，说明了甘肃省整体的水分亏缺情况十分严重，冬小麦时常遭受干旱。而其中又以武都区、文县、民勤县、成县最为严重。

### 3.3. 甘肃省冬小麦水分亏缺指数(CWDI)的时间变化

#### 甘肃省冬小麦时间逐年变化

1) 对各个站点的年水分亏缺指数平均之后，先分析拔节至孕穗期的变化(图 4)，发现 1956 年~2016 年水分亏缺指数范围为 40%~91%，5 年滑动平均在 69%上下浮动，整体的水分亏缺指数分布为周期震荡型，在 1961 年出现最大值 91%，其次为 1994 年的 86%，最低值(40%)出现在 1966 年，在 1967 年~1981 年、1990 年~1995 年和 2001~2007 年出现上涨的趋势，而 1961 年~1967 年、1981 年~1990 年和 2007 年~2016 年为下降时段，其他年份都表现平缓的趋势。

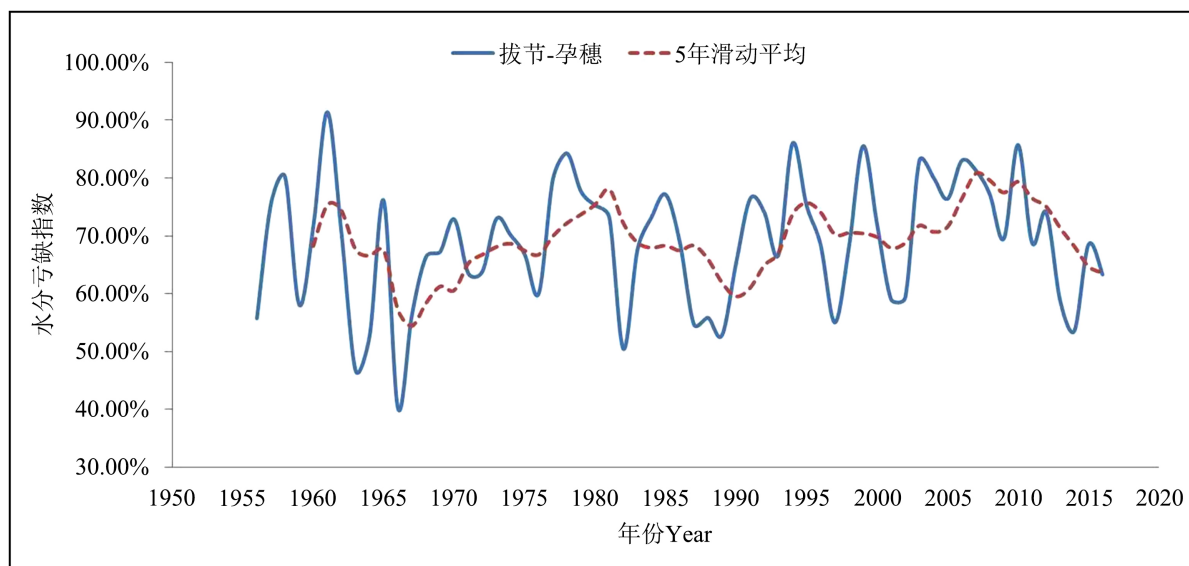
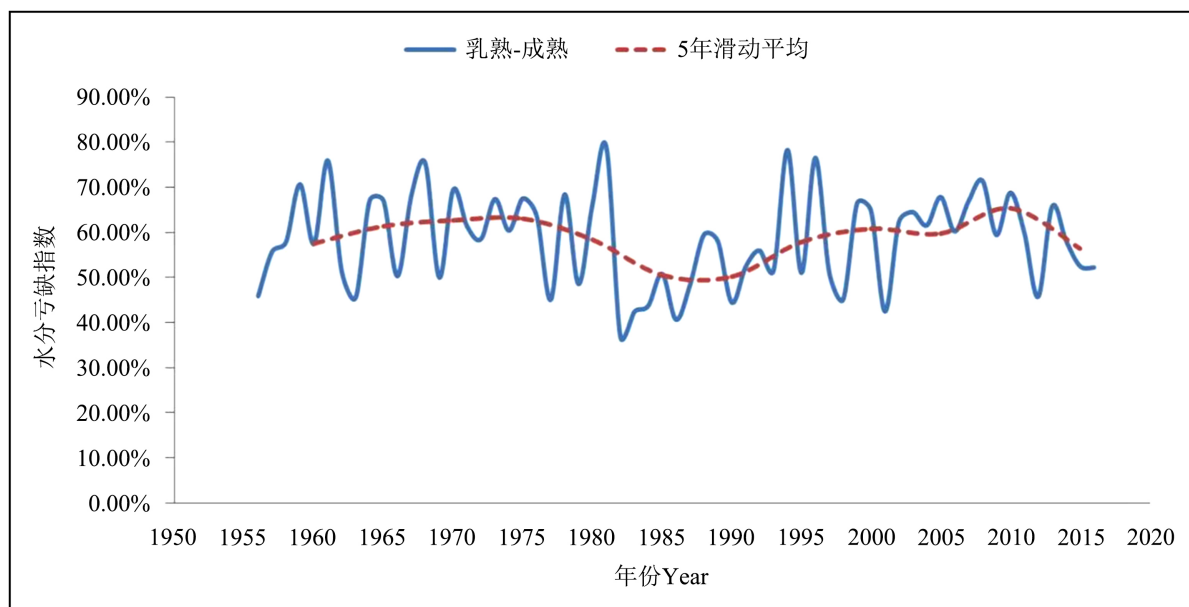


Figure 4. Water deficit index (CWDI) of winter wheat in Gansu Province during plucking-earling period, 1956~2016  
图 4. 1956~2016 年甘肃省冬小麦拔节 - 孕穗期水分亏缺指数(CWDI)

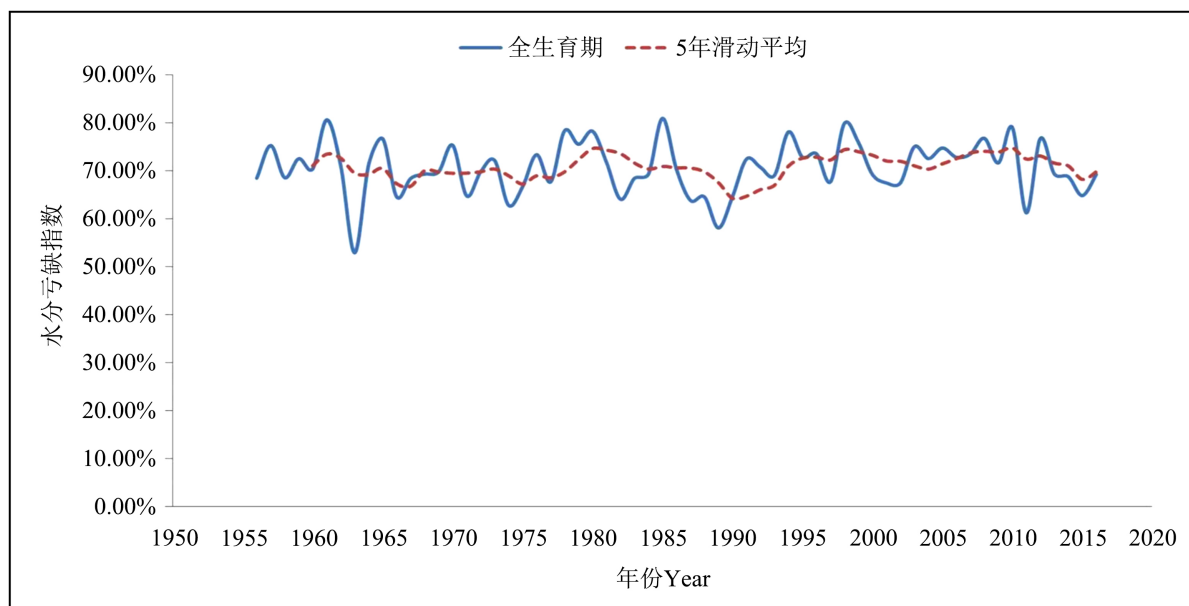
2) 在乳熟至成熟期(图 5)，发现 1956 年~2016 年水分亏缺指数范围为 37%~79%，5 年滑动平均在 58% 上下浮动，在 1981 年出现最大值 79%，其次为 1994 年的 78%，最低值(37%)出现在 1982 年，其次为 1986 年的 41%，在 1986 年~1996 年和 2001 年~2011 年出现上涨的趋势，而 1981 年~1986 年、1996 年~2001 年和 2011 年~2016 年为下降时段，而 1918 年之前表现出多波动的趋势。

3) 而在全生育期(图 6)，发现 1956 年~2016 年水分亏缺指数范围为 52%~81%，5 年滑动平均在 71% 上下浮动，水分亏缺指数分别在 1965 年、1985 年出现了最大值 81%，其次为 1998 年的 80%，最小值(52%)出现在 1963 年，其次为 1989 年的 58%，1975 年~1980 年和 1990 年~1998 年出现了明显的上升，1980 年~1990 年和 2010 年~2015 年出现在明显的下降趋势，其余年份变化趋势较小。



**Figure 5.** Water deficit index (CWDI) of winter wheat in Gansu Province during the milky-ripening period, 1956~2016

**图 5.** 1956~2016 年甘肃省冬小麦乳熟 - 成熟期水分亏缺指数(CWDI)



**Figure 6.** Water deficit index (CWDI) of winter wheat in Gansu Province during the whole reproductive period, 1956~2016

**图 6.** 1956~2016 年甘肃省冬小麦全生育期水分亏缺指数(CWDI)

4) 这三个时间段的变化趋势都比较平滑, 没有出现突然年份的剧烈变化, 拔节期的水分亏缺指数比乳熟期的更大, 而整个生育期的水分亏缺基本与拔节期相同。这三个时期中, 1990 年~1995 年都呈现上升趋势, 而 1981 年~1986 年和 2010 年~2016 年都呈现下降趋势, 水分亏缺指数的下降, 这说明近几年甘肃省的干旱情况得到了一定的改善。而中国统计年鉴的甘肃小麦产量的上升也从侧面映照了这一现实。1981 年之前变化趋势为多波动型, 没有明显的趋势, 但是变化的幅度也比较小, 随后的年份趋势逐渐明显, 而且幅度也在逐渐增加, 这种趋势也给甘肃省冬小麦的种植带来了一定的麻烦。

### 3.4. 甘肃省冬小麦水分亏缺指数(CWDI)的 MK 突变检验

#### 甘肃省冬小麦水分亏缺指数 MK 突变检验

通过图 7~9, 发现 3 个时期的甘肃省冬小麦水分亏缺指数的 MK 的突变趋势都比较缓慢, 拔节至孕穗期在 1957 年、1961 年和 1976 年分别发生了一次突变, 而 1976 年的突变最为关键; 乳熟至成熟期分别在 1974 年、1998 年发生了突变; 全生育期在 1956 年、1962 年、1991 年和 2014 年发生了两次突变, 这与上文的甘肃省冬小麦 CWDI 指数明显上升和下降的年份变化是一致的。

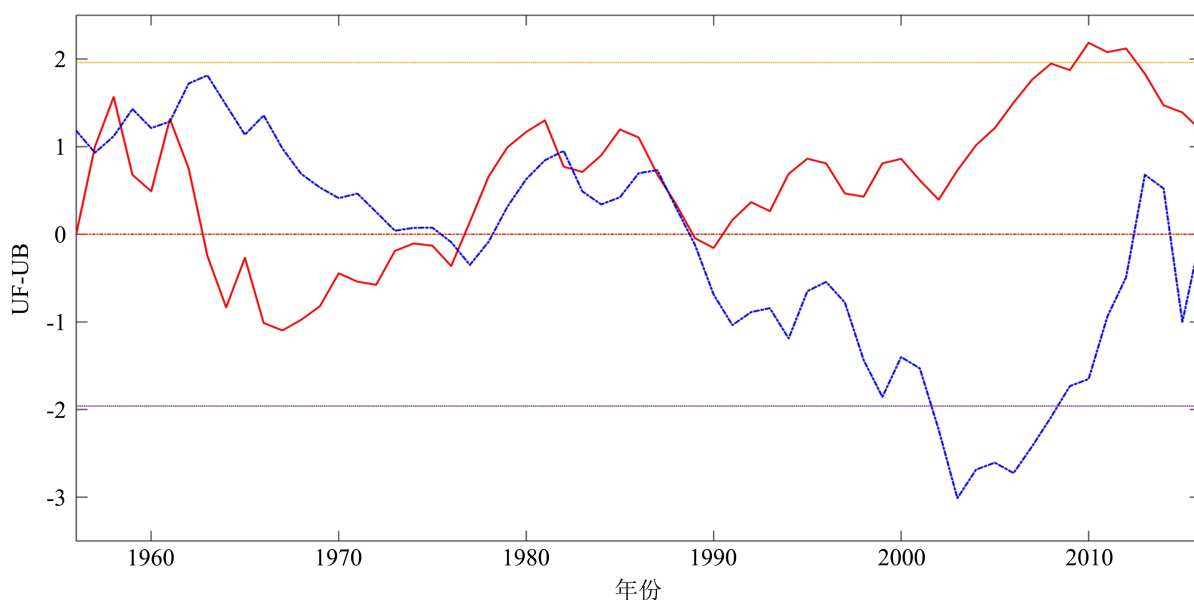


Figure 7. MK test of water deficit index (CWDI) during the plucking-earling period of winter wheat in Gansu Province, 1956~2016

图 7. 1956~2016 年甘肃省冬小麦拔节 - 孕穗期水分亏缺指数(CWDI) MK 检验

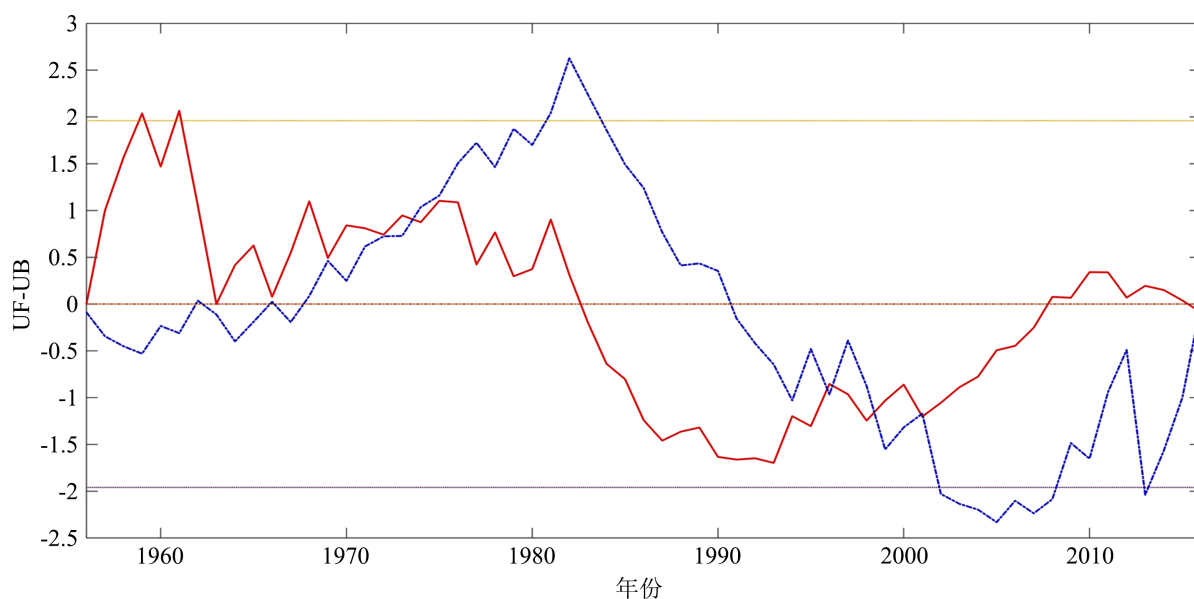
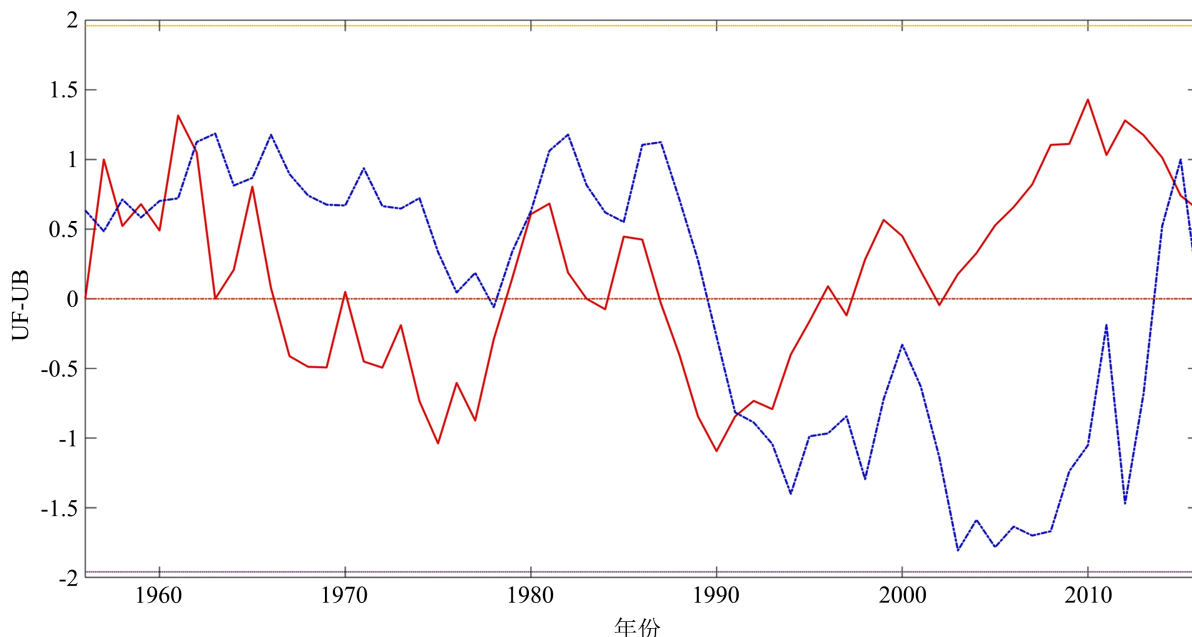


Figure 8. MK test of water deficit index (CWDI) of winter wheat at milk ripening-maturity in Gansu Province, 1956~2016

图 8. 1956~2016 年甘肃省冬小麦乳熟 - 成熟期水分亏缺指数(CWDI) MK 检验



**Figure 9.** MK test for water deficit index (CWDI) of winter wheat in Gansu Province for the whole reproductive period 1956~2016

**图 9.** 1956~2016 年甘肃省冬小麦全生育期水分亏缺指数(CWDI) MK 检验

## 4. 结论与展望

### 4.1. 主要结论

本文通过中国地面气候资料日值数据集(V3.0)的数据,通过水分亏缺指数的求取以及对数据的多方面分析,通过对时间与空间的分布情况,得到以下几项结论:

1) 甘肃省冬小麦的水分亏缺指数较高,相比较于其他省份的指数,大约会高出 10%到 20%,这说明甘肃省的冬小麦对水分的需求比较大,自然的大气降水量基本无法满足甘肃冬小麦的生长发育,而水分的供给不足会直接导致最终小麦的产量不足,而乳熟-成熟期的供水在整个生育期是比较重要的,当时这个时期的水分亏缺也比较严重,这就会导致即使前面的生育期供水满足了,最终的产量仍然不乐观,需要在这个阶段更加注意供水。

2) 在时间上,3 个时期的水分亏缺指数都比较平缓,年变化并不大,指数大小为全生育期 > 乳熟-成熟期 > 拔节-孕穗期,通过对甘肃省冬小麦水分亏缺指数 MK 的突变检验,发现全生育期,乳熟-成熟期,拔节-孕穗期的突变年份分别为 1991 年,1974 年,1976 年,在 2011~2016 年,可以明显看到水分亏缺指数是处于一个下降的趋势,这说明甘肃省近些年的降水量是在增加的,这对之后的种植结构进一步升级是十分友好的,但根据历年的趋势,在指数下降后一般会迎来一个小幅度的上升,应该更加注意在之后的年份对冬小麦的供水补给,防止严重的干旱突然到来,使得小麦减产过于严重。

3) 在空间上,干旱频率大小为全生育期 > 乳熟-成熟期 > 拔节-孕穗期,不同地区的干旱等级以及出现的概率有一个较大的差距,整个研究区域呈现中央干旱较少较弱,逐渐向四周扩散的局面,而四周又以文县、武都、环县最为严重,发现文县、武都附近的干旱频率高于其他地区,这个地区的降水量低其他地方也侧面验证了这一事实,而玛曲区域干旱等级以及概率就明显低于甘肃其他地方,而在调查区域的中部,由于是种植的主要区域,虽然干旱没有过于严重,但对于这个区域的小麦干旱防护也比较更加加强。

## 4.2. 存在的问题与展望

虽然水分亏缺指数能够反映地区的干旱等级,但是仅仅这一个方法对于干旱时空分布的分析还是显得过于单薄,需要新增一些其他方法,比如累计湿润指数来辅助分析;而甘肃冬小麦的作物指数  $K_c$  值需要一个更加精确的分类以及根据甘肃省特点进行重新计算,而不是仅仅通过联合国粮食及农业组织(FAO)给出的一个常规值,因为FAO给出的是一个更偏向于西方地区的参考值,而甘肃省的独特地貌需要研究者通过一定的蒸腾量和作物的特性来单独计算出来;在做空间分布图是,由于局部多项式(LPI)是一个平滑(不精确)的中等速度插值器,它比全局多项式方法更灵活,但是需要确定的参数多,此方法可提供与普通克里金法的测量误差相当的预测、预测标准误差和条件数表面,局部多项式方法不允许研究数据的自相关,这使得它比克里金法的灵活性要差一些,而且对于冬小麦干旱灾害等级的差值并不是那么的契合。

因此,通过实际蒸腾量和理论蒸腾量的计算对比来进行,分析出完美贴合甘肃省冬小麦作物指数  $K_c$  值是在未来的一个重点,此外,引用更多可以帮助分析干旱情况的方法,不断优化不同指数对于甘肃冬小麦干旱的监测。

## 参考文献

- [1] 王红丽,张绪成,于显枫,侯慧芝,方彦杰,马一凡. 甘肃半干旱区季节性干旱分布特征研究[J]. 甘肃农业科技, 2018(7): 69-72.
- [2] 朱紫虎,苏宏斌. 论干旱气候条件下甘肃无灌溉区植被恢复与重建[J]. 林业实用技术, 2014(11): 13-16. <https://doi.org/10.13456/j.cnki.lykt.2014.11.004>
- [3] 倪深海,王亨力,刘静楠,顾颖. 中国农业干旱灾害特征及成因分析[J]. 中国农学通报, 2022, 38(10): 106-111.
- [4] 成青燕. 不同干旱指标在甘肃旱作区的适用性研究及未来干旱预估[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- [5] 刘德祥,白虎志,宁惠芳,郭俊琴,董安祥. 气候变暖对甘肃干旱气象灾害的影响[J]. 冰川冻土, 2006(5): 707-712.
- [6] 陈兴鹏,康尔泗. 甘肃干旱与半干旱地区水资源可持续开发利用对比分析[J]. 冰川冻土, 2001(1): 74-79.
- [7] 鲁清林,等. 甘肃旱地小麦丰产栽培技术集成与示范[Z]. 甘肃省农业科学院小麦研究所, 2012-11-16.
- [8] 阚文杰,席金凤,姚缘圆,苏鹏飞,曹明辉,袁梦,李明浩,汤才国,吴丽芳. 外源  $H_2S$  对干旱胁迫下小麦幼苗光合指标的影响[J]. 山西农业科学, 2021, 49(12): 1419-1425.
- [9] 刘义国,万雪洁,张艳,李玲燕,周宣材,孙新灵,郭卫卫,师长海. 干旱锻炼对小麦幼苗期形态指标的影响[J]. 西北农业学报, 2022(2): 1-7.
- [10] 李刚,白阳,贾子颖,马正阳,张祥池,李春艳,李诚. 两种磷素水平下小麦苗期对干旱胁迫的离子组和代谢组响应[J]. 中国农业科学, 2022, 55(2): 280-294.
- [11] 时丽冉,王梅菊,付庆云,郭凤英,马长胜,孟津,赵凤梧,孙利. 干旱胁迫对小麦新品种盈亿 165 生长及光合特性的影响[J]. 农业科技通讯, 2021(12): 69-72.
- [12] 李瑛. 不同小麦品种对干旱胁迫的生理生化响应[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [13] 许红. 干旱胁迫下多胺对小麦种子萌发的影响及其机理研究[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2016.
- [14] 聂志刚,任新庄,李广,雒翠萍,马维伟,刘小鹅. 基于 APSIM 的甘肃春小麦干旱致灾风险评价[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6): 194-200.
- [15] 蒲金涌,邓振镛,姚小英,王位泰,胡利平,贾海源. 甘肃省冬小麦生态气候分析及适生种植区划[J]. 干旱地区农业研究, 2005(1): 179-185+196.
- [16] 邓振镛,尹东,张毅. 甘肃省小麦生态气候适生种植区的研究[J]. 气象科技, 2000(1): 36-40. <https://doi.org/10.19517/j.1671-6345.2000.01.008>