

黄土高原旱作区土壤贮水力和农田耗水量 对冬小麦水分利用率的影响

邓振镛¹, 张 强², 王 强², 王润元¹, 王劲松¹, 王鹤龄¹, 徐金强³

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省(中国气象局)干旱气候变化与减灾重点(开放)实验室, 兰州 730020;

2. 甘肃省气象局, 兰州 730020; 3 甘肃省气象科技服务中心, 兰州 730020)

摘要:选择黄土高原旱作区 8 个冬小麦测站 2m 土层深度多年土壤贮水量与产量资料, 从大气降水-土壤水-作物循环系统的理论观点出发, 研究了土壤贮水力和农田耗水量对冬小麦水分生产力的影响。该区域是一个贮水和保水性能良好的天然土壤水库, 半干旱区、半湿润区、湿润区 1m 和 2m 土层内最大贮水力分别为 270、299、331mm 和 561、605、676mm, 随湿润度增加而增大; 但实际贮水能力只有 111、183、269mm 和 230、370、550mm, 相当于半干旱区、半湿润区和湿润区最大贮水力的 41%、61% 和 81%, 可达到最适宜贮水量的 51%、76%、102%。半干旱区远不能满足冬小麦生长需要, 达到严重干旱程度; 半湿润区只能勉强维持生存需要, 达到轻度干旱, 必须采取一套有效保墒耕作抗旱措施。冬小麦全生育期 2m 土层农田实际耗水量和蒸腾系数分别为 304–343mm 和 330–648, 随干旱程度增加而增大。冬小麦全生育期降水量只能满足耗水量的 65%–95%, 有 5%–35% 的耗水量是从播前土壤贮水量补给的。冬小麦营养生长阶段浅层耗水量大于生殖阶段, 但深层耗水量正好相反。土壤贮水量是该区域冬小麦生产力最重要因素, 冬小麦土壤水分籽粒生产力为 0.30–1.38kg/mm, 平均为 0.87kg/mm, 生物产量生产力为 1.416kg/mm, 随干旱程度增大明显递减。旱作区冬小麦水分生产力低而不稳, 但潜力很大。必须在肥力、耕作、管理等措施要跟上, 水分生产力水平才能提高。

关键词:黄土高原; 旱作区; 冬小麦; 土壤贮水力; 农田耗水量; 水分生产力; 水分利用率

Effects of soil water storage capacity and consumption on winter-wheat water use efficiency in dryland areas of the Loess Plateau in western China

DENG Zhenyong¹, ZHANG Qiang², WANG Qiang², WANG Runyuan¹, WANG Jinsong¹, WANG Heling¹, XU Jinqiang³

1 Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster, Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Gansu Province, Lanzhou 730020, China

2 Gansu Province Meteorological Bureau, Lanzhou 730020, China

3 Gansu Province Meteorological Science and Technology Service Center, Lanzhou 730020, China

Abstract: Soil water storage capacity is the primary factor affecting crop productivity. To determine the effects of this capacity on winter wheat production in the Loess Plateau in western China, we have collected data of soil water content and winter wheat production over multiple years from eight observatory stations located in semi-arid, semi-humid and humid areas. These data were analyzed based on the circulatory theory of Air precipitation- Soil water-Plant (ASP). These areas were considered a high performance water resource. In semi-arid, semi-humid and humid areas, the calculated maximum soil water storage capacity was 270mm, 299mm, 331mm in 1 m depth and 561mm, 605mm, 676mm in 2m depth respectively. The capacity increases with increased humidity. However, the actual maximum soil water storage capacity determined was drastically lower, only 111mm, 183mm and 269mm in 1m depth and 230mm, 370mm and 550mm in 2m

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(40830957); 中国气象局气候变化 2009 年专项资助项目(CCSF-09-14); 国家科技部公益行业专项资助项目(GYHY200806021); 甘肃省科技支撑计划资助项目(090NKCA118)

收稿日期: 2009-12-15; 修订日期: 2010-04-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Dengzhy23@Sohu.com

depth, corresponding to 41%, 61% and 81% of the maximum water storage capacity for semi-arid, semi-humid and humid areas, respectively. The capacity amounted to 51%, 76%, and 102% of the optimum water storage amount in these three areas. As a result, the semi-arid areas were far short of water supply to meet the requirement of winter wheat growth, causing a severe drought condition. Whereas, the sub-humid areas barely met the water supply, sustaining a mild drought condition. Hence, appropriate soil moisture conservation measures were necessary to increase wheat production in sub-humid areas. During the entire growth period of winter wheat, the transpiration ratio and water consumption in 2m soil layer were 330—648mm and 304—343mm, which increase with increasing drought conditions. Natural precipitation accounted for about 65%—95% of the water requirement, and pre-sowing soil storage water supplied 5%—35%. In shallow soil layer, winter wheat water consumption was higher during vegetative growth than that during reproductive growth period. In contrast, in deep soil layer, reproduction growth consumed more water than vegetative growth. For winter wheat, the soil water grain productivity was 0.30—1.38kg/mm with an average of 0.87 kg/mm. The biomass productivity was 1.416kg/mm. The productivity decreased dramatically with worsening drought conditions. These data suggested that the winter wheat water productivity in dryland areas of Loess Plateau in western China was low and unstable. To increase the water use productivity, appropriate measures in fertilizer use, farming techniques, management, etc will have to be taken into account.

Key Words: the Loess Plateau; arid region; wheat; soil water storage capacity; soil water consumption; water productivity; water use efficiency

黄土高原旱作区主要是丘陵沟壑地形,塬是黄土高原的主体地貌。它以中壤土为主,多为黄绵土和黑垆土,土层深厚,土壤肥沃,具有结构疏松、透水、绵软、易耕、性熟等特点。是一个保水贮水性能良好的土壤土库^[1-3]。

该区域以旱作物为主的雨养农业区,年降水量为 250—850mm,作物供水主要依赖于大气降水,而大气降水对作物的水分供应又需要依附于土壤调节。因此,从大气降水-土壤水-作物循环系统的理论观点出发,探讨旱作物土壤水库的贮水能力、农田耗水特点以及土壤水分生产力,对土壤水库 2 次开发具有十分重要的农业意义。以往对该区域的土壤水分变化特征、土壤水分供需平衡、土壤水分演变及其对气候响应等方面研究比较多^[4-18],尽管开展研究土壤贮水力和农田耗水量对作物水分生产力以及产量的影响也有报道^[19-23],但涉及到不同水分气候区的研究相对较少。然而,这方面研究是涉及到广大旱作区粮食安全生产的重大问题。因此,开展这方面研究具有较为重要的现实生产意义和实用价值。

1 数据来源和计算方法

1.1 数据来源

在黄土高原旱作农业区,选择不同水分气候区 8 个冬小麦测站 2m 土层田间实测土壤水分数据,测定时间为每年 9 月上旬至翌年 7 月上旬,即从冬小麦播种开始至成熟收割止,每月逢 8 日测定,每次测 3 个重复。同步进行冬小麦产量和产量要素测定。数据年代:西峰站为 1989—2008 年;通渭、天水、礼县、环县站为 1989—2004 年;泾川、镇原、成县站为 1989—2000 年。降水量为各测站同年代的资料。

根据年降水量对当地农业生产的影响和满足程度^[1],划分 4 种水分气候区的标准,干旱区(年降水量 < 300mm)、半干旱区(年降水量 300—450mm)、半湿润区(年降水量 450—600mm)、湿润区(年降水量 > 600mm)。根据《甘肃省(1971—2000)整编气候资料》,通渭(392.3mm)、环县(407.6mm)定为半干旱区,该区域为 2 测站的多年平均值;礼县(476.6mm)、镇原(478.0mm)、天水(496.5mm)、泾川(514.5mm)、西峰(526.7mm)定为半湿润区,该区域为 5 测站的多年平均值;成县(620.8mm)定为湿润区。

1.2 计算方法

1.2.1 土壤最大贮水量的计算方法

土壤最大贮水量是指一定土层厚度的土壤总含水量,以土层深度(mm)表示。其计算式为:

$$U = F \times h \times E \times 10 \quad (1)$$

式中, U 为土壤贮水量(mm); F 为土壤容量(g/cm^3); h 为土壤厚度(cm); E 为田间持水量(%)。

1.2.2 土壤最大有效贮水量的计算方法

土壤有效贮水量是指土壤中含有大于凋萎湿度的水分贮存量。其计算式为:

$$\mu = F \times h \times (E - E_R) \times 10 \quad (2)$$

式中, μ 为有效贮水量(mm); E_R 为田间凋萎湿度(%)。

1.2.3 麦田累积耗水量的计算方法

$$C_t = \sum_{i=1}^n (D_t - D_{t+1} + P_{t-t+1})^2 \quad (3)$$

式中, D 为旬(月)测定的某一土层土壤水分; t 为冬小麦从播种起以旬(月)为单位的时间序列; P_{t-t+1} 为 2 次测定土壤水分期间的降水量; n 为要计算的旬(月)数。冬季(12—2 月份), 因土壤冻结未进行土壤水分测定, 则(3)式无 $D_t - D_{t+1}$ 项, 只有 P_{t-t+1} 项。

2 结果与分析

2.1 土壤贮水力

2.1.1 土壤最大贮水量

从表 1 看出, 不同水分气候区土壤最大贮水量差异很大, 半干旱区、半湿润区和湿润区 1m 土层分别为 270、299、331mm, 2m 土层分别为 561、605mm 和 676mm。与湿润程度和田间持水量有关, 气候越湿润、田间持水量越大, 土壤贮水能力越大。

2.1.2 土壤最大有效贮水量

受作物凋萎湿度的影响, 各水分气候区最大有效贮水量也有较大差别, 半干旱区、半湿润区和湿润区分别占最大贮水量的 79%、75% 和 58%, 有随湿润度增加而减少趋势(表 1)。

2.1.3 不同干旱程度的贮水量

不同农业干旱程度, 其土壤贮水量标准不同。以田间持水量 40%、60% 和 80% 的土壤水分分别确定为严重干旱、轻度干旱和最适宜冬小麦生长发育的土壤贮水量指标。

从表 1 看出, 在 1m 土层内, 半干旱区最适宜、轻度干旱和严重干旱的贮水量指标为 216、162mm 和 108mm; 半湿润区分别为 240、180mm 和 120mm; 湿润区分别为 265、198mm 和 132mm。在 2m 土层内, 半干旱区分别为 449、337mm 和 225mm; 半湿润区分别为 484、363mm 和 242mm; 湿润区分别为 541、406mm 和 271mm。总的趋势是气候越湿润, 贮水量的标准越高, 这是由最大贮水能力的差异造成的。各地应根据不同季节的土壤贮水量标准采取不同的农业耕作和管理措施。

2.1.4 土壤实际贮水量

实际测定的土壤贮水量比最大贮水量和最适宜贮水量有很大差异。半干旱区、半湿润区和湿润区 1m 土层实际贮水量分别为 111、183mm 和 269mm。2m 土层分别为 230、370mm 和 550mm(表 1)。实际贮水量分别占最大贮水量的 41%、61% 和 81%; 占最适宜贮水量的 51%、76% 和 102%。随湿润度增加贮水量越多。湿润区的实际贮水量比最适宜贮水量还多 4—9mm。各地实际贮水量与年降水量呈明显正相关关系。因此, 不

表 1 不同水分气候区土壤贮水能力/mm

土层 Soil layers	项目 Items	半干旱区 Semiarid	半湿润区 Subhumid	湿润区 Humid
0—100cm	最大贮水量	270	299	331
	最大有效贮水量	212	225	192
	最适宜贮水量	216	240	265
	轻度干旱	162	180	198
	严重干旱	108	120	132
	实际贮水量	111	183	269
0—200cm	最大贮水量	561	605	676
	最适宜贮水量	449	484	541
	轻度干旱	337	363	406
	严重干旱	225	242	271
	实际贮水量	230	370	550

同水分气候年型(正常年、干旱年、丰水年)实际贮水量有较大的差异。

2.2 农田耗水量

2.2.1 冬小麦耗水量指标

从表 2 看出,冬小麦全生育期 2m 土层实际耗水量为 304—343mm,平均为 330mm。各水分气候区耗水量差异并不大,有随湿润度增大而递减的趋势。蒸腾系数为 330—648,平均为 442。随湿润度增加而迅速递减,半干旱区差异比较大,比湿润区约大一倍。

表 2 不同水分气候区冬小麦实际耗水量和蒸腾系数
Table 2 Reality water consumption and Transpiration ratio of winter wheat in different climate region

气候区 Climate region	贮水量/mm Water storage	耗水量/mm Water consumption	蒸腾系数/(g/g) Transpiration ratio
半干旱区 Semiarid region	230	342	648
半湿润区 Sub-humid region	370	343	348
湿润区 Humid region	550	304	330

从表 3 和图 1 看出,冬小麦冬前生长阶段,实际耗水量不多,耗水量全部来源于 0—30cm 土壤耕作层。此时降水较多,可满足植株对水分需要,尚有 34.3% 的盈余水分贮存于土壤中。返青后耗水量开始加大,拔节期正值春季少雨阶段,降水量只能满足耗水量的 75%,有 25% 的亏缺水分要靠土壤贮水供给,其中 82.6% 的水分来自 100cm 以上土层,17.4% 的水分来自 100cm 以下土层。拔节抽穗期是全生育期中需水关键期,也是耗水高峰期。正常水分年,此时降水量基本能满足麦田耗水量,但干旱年要靠土壤贮水供给。抽穗灌浆期正值春末夏初少雨期,麦田耗水量较大,此时降水量仅能满足麦田耗水量的 14%,剩余 86% 的水分完全依赖于播前 100cm 以下的土壤贮水补给,因此,有“伏秋雨春用”之说。灌浆成熟期需水量逐渐减少,此时正值当地 6 月下旬至 7 月上旬的一段相对多雨期,其降水量在多数年份能满足麦田对水分需要,且少数年份有盈余的水分贮存于土壤之中。

经统计得出,不同水分气候区冬小麦生育期降水量只占实际耗水量的 65%—95%,有 5%—35% 的耗水量是从播种前土壤贮水量补给的。看来,冬小麦对土壤贮足伏秋底墒,尤其干旱年显得非常重要。

表 3 西峰冬小麦不同生育阶段实际耗水量与降水量满足率
Table 3 Actual water consumption and precipitation satisfying rate at Xifeng in different growth periods of winter wheat

项目 Item	播种-越冬 Sowing to overwinter	越冬-返青 Overwinter to reviving	返青-拔节 Reviving to jointing	拔节-抽穗 Jointing to ear	抽穗-灌浆 Ear to filling	灌浆-成熟 Filling to mature	全生育期 Whole growth period
耗水量 Water consumption/mm	62.9	21.5	92.6	110.3	80.7	73.6	441.6
日耗水量 Daily water consumption/mm	1.60	0.20	1.85	5.25	3.84	2.73	1.51
耗水率 Water consumption ratio/%	14.1	4.9	21.0	25.0	18.3	16.7	100.0
降水量 Precipitation /mm	95.7	17.1	69.6	104.8	11.4	111.0	409.6
降水占耗水比/% Percentage of precipitation in water consumption	152.5	79.5	75.2	95.0	14.1	150.8	92.7
土壤供水量 Soil water/mm	-33.0	4.4	23.0	5.5	69.3	-37.4	32.0
土壤供水占耗水比/% Percentage of soil water in water consumption	-52.5	20.5	24.8	5.0	85.9	-50.8	7.3

2.2.2 农田耗水量变化特点

冬小麦不同生育阶段消耗不同土层水分(表 4)。在冬小麦营养生长阶段,2m 土层耗水率为 53.4%。由于根系主要分布在土壤上层,故 50 cm 内土壤水分消耗明显,耗水率达 33.3%,越往深层递减。进入生殖生长阶段,冬小麦生长进入旺盛阶段,耗水量不断增大,2m 土层总耗水率为 62.2%,比营养阶段提高 8.8%。由

于上层土壤水迅速减少,不能满足需要,迫使根系不断下伸吸收深层土壤水,所以 50 cm 内的上层水比营养阶段耗水率下降 12%;50 cm 以下的各层土壤水耗水率均大于营养生长阶段 5.9%—8.5%,致使深层土壤水分不断向上层输送,以满足冬小麦生长需要。因此,在农田耕作和管理上,尤其要注意贮好和管好底墒,以防生殖阶段干旱的发生和危害。

2.3 冬小麦水分生产力

限制旱作区冬小麦产量高低的重要因素是水分。因此,可用大气降水生产力和土壤水分生产力来表示某地旱作冬小麦水分生产力。其表达式分别为:

$$P_r = w/R \text{ 和 } P_s = W/C \quad (4)$$

式中, P_r 和 P_s 分别为大气降水生产力/(kg/mm)和土壤水分生产力/(kg/mm), W 为冬小麦籽粒产量/(kg/mm), R 和 C 分别为冬小麦生育期大气降水量/mm和土壤耗水量/mm。这两个指标能比较客观真实地反映土壤贮水和有效降水对冬小麦产量的贡献。

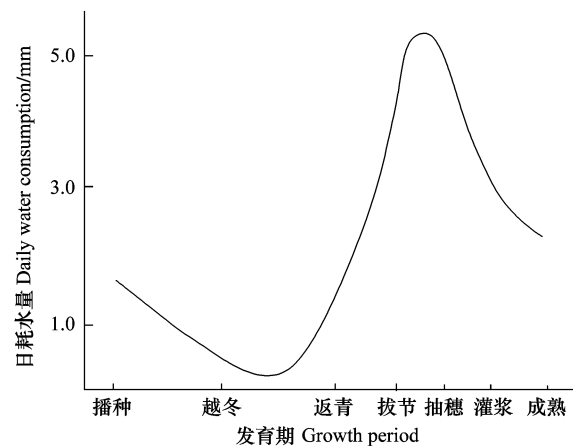


图1 冬小麦日耗水量变化趋势

Fig. 1 Changes of daily water consumption during the growth period of winter wheat

表4 冬小麦不同生育阶段不同土层耗水率/%

Table 4 Water consumption ratio of winter wheat in different layer of soil

生长期 Growth period	土层 Soil layer/cm				
	0—50	51—100	101—150	151—200	0—200
营养生长期(返青—孕穗) Vegetative growth period (Reviving to booting)	33.3	7.6	7.6	4.9	53.4
生殖生长期(孕穗—成熟) Reproductive growth phase (Booting to mature)	21.3	16.1	13.5	11.3	62.2

表5 不同水分气候区冬小麦水分生产力/(kg/mm)

Table 5 Water productivity of winter wheat in different climate regions

气候区 Climate region	正常年 Normal year			干旱年 Drought year		
	大气降水 生产力 Precipitation productivity	土壤水分 生产力 Soil water productivity	差值 Difference	大气降水 生产力 Precipitation productivity	土壤水分 生产力 Soil water productivity	差值 Difference
半干旱区 Semi-arid region	0.33	0.30	0.03	0.19	0.24	−0.05
半湿润区 Sub-humid region	1.01	0.94	0.07	0.67	0.69	−0.02
湿润区 Humid region	1.54	1.38	0.16	0.91	0.76	0.15

从表5看出,在正常年份,冬小麦生育期大气降水生产力为0.33—1.54 kg/mm,平均为0.96kg/mm。土壤水生产力为0.30—1.38 kg/mm,平均为0.87kg/mm。土壤水生产力比大气降水生产力低0.09kg/mm;约少9.4%。干旱年比正常年水分生产力低得多,大气降水生产力低0.14—0.63 kg/mm,约少40%;土壤水生产力低0.06—0.62 kg/mm,约少23%。看来,旱作小麦由于受水分因素的制约,水分生产力极不稳定,年际变化很大,尤其20世纪90年代以后,气候暖干化的影响,冬小麦水分生产力大幅下降^[19-20]。因此,要特别注意气候暖干化后,水分生产力严重下降的安全生产问题。

同一种气候年型,以湿润区的水分生产力最高,正常年份1mm大气降水和土壤水可生产1.54 kg和1.38 kg;其次是半湿润区1mm大气降水和土壤水可生产1.01 kg和0.94 kg,以半干旱区水分生产力最低,1mm大气降水和土壤水可生产0.33 kg和0.30 kg。比半湿润区和湿润区分别下降为68%和78%,随干旱程度增加

水分生产力明显递减。

表 6 不同气候年型冬小麦实际耗水量、蒸腾系数与生物产量

Table 6 Actual water consumption, transpiration ratio and biomass in different climate years

地区 Site	正常年 Normal year			干旱年 Serious drought year		
	耗水量/mm Water consumption	蒸腾系数/(g/g) Transpiration ratio	生物产量 /(kg/hm ²) Biomass	耗水量/mm Water consumption	蒸腾系数/(g/g) Transpiration ratio	生物产量 /(kg/hm ²) Biomass
西峰	500.5	402.3	12442.5	321.6	339.5	9472.5
天水	467.5	419.8	11137.5	142.6	355.1	4012.5

在同一地区不同气候年型耗水量不同,生物产量差异很大。冬小麦生育期间干旱年实际耗水量比正常年要少 200—300mm,蒸腾系数小 65 左右,生物产量也明显偏低 3000—7000kg/hm² (表 6)。实际耗水量与生物产量呈显著正相关,相关系数达 0.989。当生物产量在 4000kg/hm² 水平时,实际耗水量为 150mm,蒸腾系数为 350 左右;当产量在 12500kg/hm² 时,实际耗水量为 500mm,蒸腾系数为 400 左右。生物产量增加,使耗水量增大的幅度远远超过蒸腾系数增大的幅度。在一般情况下,1mm 耗水量可生产生物产量 1.416kg。当生产水平达到一定高度时,生物产量增加,其实际耗水量却相对减少,蒸腾系数也相应降低。

3 结论与讨论

(1)黄土高原西部旱作区是一个贮水和保水性能良好的天然水库,为冬小麦生长发育提供较好的水分生存环境,应予大力开发和利用。1m 和 2m 土层最大贮水量以及最适宜贮水量分别为 270—331mm 和 561—676mm 以及 216—265mm 和 449—541mm,总的趋势是随湿润度增加而增大。但实际贮水量 1m 和 2m 土层分别为 111—269mm 和 230—550mm,只相当于半干旱区、半湿润区和湿润区最大贮水量的 41%、61% 和 81%;只达到最适宜贮水量的 51%、76%、102%。愈是干旱地区实际贮水量愈少,与气候类型相吻合。半干旱区远不能满足冬小麦生长需要,达到严重干旱程度;半湿润区只能勉强维持生存需要,达到轻度干旱,必须采取一套有效保墒耕作抗旱措施;只有湿润区达到最适宜指标能满足冬小麦需水要求。

(2)黄土高原旱作区冬小麦全生育期 2m 实际耗水量和蒸腾系数分别为 304—343mm 和 330—648,总的趋势是随干旱程度增加而增大。冬小麦全生育期降水量只能满足耗水量的 65%—95%,有 5%—35% 的耗水量是从播前土壤贮水量补给的。冬小麦拔节抽穗期是耗水高峰期,也是需水关键期。2m 土层营养和生殖阶段分别消耗土壤贮水量的 53.4% 和 62.2%,随深度增加而减少;营养阶段浅层的耗水量大于生殖阶段,生殖阶段深层的耗水量大于营养阶段。

(3)土壤贮水量是旱作区冬小麦生产力的最重要因素。旱作区冬小麦水分利用率低,水分生产力低而不稳,但潜力很大。正常年土壤水分生产力为 0.30—1.38kg/mm,平均为 0.87kg/mm;但干旱年只有 0.24—0.76kg/mm,平均为 0.56kg/mm,比正常年下降 23%。水分生产力的变化,总的趋势是随干旱程度增大,水分利用率和水分生产力明显递减。冬小麦生物产量与农田实际耗水量呈显著正相关关系,1mm 农田耗水量可生产生物产量为 1.416kg。因此,在半湿润区以及湿润区气候暖干年份,必须在肥力、耕作、管理等措施一定要跟上,水分生产力是有很大的潜力。在半干旱区以及半湿润区气候暖干年份要调整作物种植结构,适当控制冬小麦播种面积,扩大耐旱作物和饲草作物面积以及实行轮作倒茬等措施。

References:

[1] Deng Z Y. Study of Ecological Adaptability of Crops Planting in Plateau with Arid Climate. Beijing: Meteorology Press, 2005: 25-38.
[2] Deng Z Y, Chou H M, Li H D. Development of Climate and Agriculture in East Gansu. Beijing: Meteorological Press, 2000: 33-46.
[3] Deng Z Y. Agrometeorology Research in Arid Region. Beijing: Chinese Meteorological Press, 1999: 41-96.
[4] Pu J Y, Yao X Y, Deng Z Y. The impact of climate change on soil water storage on the Loess Plateau in Gansu. Journal of Soil Science, 2006, 37 (6): 1086-1090.
[5] Pu J Y, Yao X Y, Jia H Y. A study on characteristics of soil water and it's utilization in Loess Plateau of Longxi. Journal of Soil Science, 2005,

- 36(4): 483-486.
- [6] Sun B Q, Zhang Q, Dong A X. The characteristics of climatic soil water on Loess Plateau in Gansu. *Advance in Earth Sciences*, 2005,20(9): 1041-1046.
- [7] Wang Y R. The characteristics of soil water in the exceptional period. *Agriculture Research in Arid Area*, 2005, 23(2): 209-229.
- [8] Wang R Y, Yang X G, Zhang J L. A study on soil water, evaporation and climate on Longdong Loess Plateau. *Advance in Earth Science*, 2007, 22(6): 625-635.
- [9] Chen S Y, Dong A X. Climatic respond on soil moisture in Loess Plateau. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(1): 66-72.
- [10] Guo H Y, Zhao J P, Han T. A study on characteristics of soil drought in Longdong Loess Plateau. *Journal of Soil Science*, 2007, 28(5): 837-877.
- [11] Yang X L. Respond of soil water and it's variation in Longdong Loess Plateau. *Journal of Desert Research*, 2009,29(2):305-311.
- [12] Zhang G S, Li L, Xu W X. A study on characteristic of soil moisture in the east of Qinghai. *Journal of Desert Research*, 2000, 20(3):314-316.
- [13] Ma Z G, Fu C B, Xie L. A few problem on soil moisture and climate change research. *Advance in Earth Science*, 2001,16(4): 563-568.
- [14] Li Q P, Ding Y H, Dong W J. A numerical study on effects of the soil moisture upon the regional short-term climate. *Journal of Applied Meteorology*, 2007,18(1):1-11.
- [15] Wang X W, Wang Y R, Zhang C J. Respond of thermal and water on soil moisture on semiarid region in Loess Plateau. *Journal of Desert Research*, 2007,27(1):123-129.
- [16] Li Y H, Zhao G B. A study on soil water in autumn in high flow year at Namxiao, Xi'an. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(1): 113-116.
- [17] Chou H M, Deng Z Y, Fang D B. A study on variation characteristics of soil water in arid area farming eastern of Gansu. *Plateau Meteorology*, 1996,15(3):334-341.
- [18] Deng Z Y, Lin R N. A study on agriculture hydrological characteristics in Gansu. *Journal of Natural Resource*, 1989,4(2):136-144.
- [19] Zhang Q, Deng Z Y, Zhao Y D. The influence of globe climate changing to agriculture over Northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008,28(3):1210-1218.
- [20] Deng Z Y, Zhang Q, Pu J Y. The impact of climate warming on crop planting and production in northwestern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8):3760-3768.
- [21] Fang Q X, Chen Y H, Li Q Q. The. Effect of irrigation on water use efficiency of winter wheat. *Transactions of the CSAE*, 2004,20(4):34-39.
- [22] Xu Z Z, Yu Z W, Dong Q Y. The soil water variation laws in rainfed wheatfields under different cultivation conditions. *Agriculture Research in Arid Area*, 1996, 14(3): 20-24.
- [23] Yang X Y, Yu Z W, Xu Z Z. Effects of irrigation regimes on water consumption characteristics and nitrogen accumulation and allocation in wheat. *Acta Ecologica Sinica*, 2009,29(2):846-853.

参考文献:

- [1] 邓振镛. 高原干旱气候作物生态适应性研究. 北京:气象出版社,2005:25-38.
- [2] 邓振镛,仇化民,李怀德. 陇东气候与农业开发. 北京:气象出版社,2000:33-46.
- [3] 邓振镛. 干旱地区农业气象研究. 北京:气象出版社,1999:41-96.
- [4] 蒲金涌,姚晓英,邓振镛. 气候变化对甘肃黄土高原土壤水量的影响. *土壤通报*,2006,37(6):1086-1090.
- [5] 蒲金涌,姚晓英,贾海源. 甘肃陇西黄土高原旱作区土壤水分变化规律及其有效利用程度研究. *土壤通报*,2005,36(4):483-486.
- [6] 孙秉强,张强,董安祥. 甘肃黄土高原土壤水分气候特征. *地球科学进展*,2005,20(9):1041-1046.
- [7] 王毅荣. 黄土高原土壤干旱异常阶段特征. *干旱地区农业研究*,2005,23(2):209-229.
- [8] 王润元,杨兴国,张九林. 陇东黄土高原土壤蓄水量与蒸发和气候研究. *地球科学进展*,2007,22(6):625-635.
- [9] 陈少勇,董安祥. 中国黄土高原土壤湿度变化的气候响应. *中国沙漠*,2008,28(1):66-72.
- [10] 郭海英,赵建萍,韩涛. 陇东黄土高原土壤干旱特征分析. *土壤通报*,2007,28(5):837-877.
- [11] 杨小利. 陇东黄土高原土壤水分演变及其对气候变化的响应. *中国沙漠*,2009,29(2):305-311.
- [12] 张国胜,李林,徐维新. 青海省东部农业区旱地土壤水分演变特征分析. *中国沙漠*,2000,20(3):314-316.
- [13] 马柱国,符淙斌,谢力. 土壤湿度和气候变化关系研究中的某些问题. *地球科学进展*,2001,16(4):563-568.
- [14] 李巧萍,丁一汇,董文杰. 土壤湿度异常对区域短期气候影响的数据模拟试验. *应用气象学报*,2007,18(1):1-11.
- [15] 王锡稳,王毅荣,张存杰. 黄土高原半干旱区水热变化及其土壤水分响应. *中国沙漠*, 2007,27(1):123-129.
- [16] 李艳花,赵果波. 西安全效丰水年秋季土壤水分研究. *中国沙漠*,2006,26(1):113-116.
- [17] 仇化民,邓振镛,方德彪. 甘肃东部旱作区土壤水分变化规律研究. *高原气象*, 1996, 15(3):334-341.
- [18] 邓振镛,林日暖. 甘肃省土壤农业水文特征的研究. *自然资源学报*,1989,4(2):136-144.
- [19] 张强, 邓振镛,赵映东. 全球气候变化对我国西北地区农业的影响. *生态学报*,2008,28(3):1210-1218.
- [20] 邓振镛,张强,蒲金涌. 气候变暖对中国西北地区农作物种植的影响. *生态学报*,2008,28(8):3760-3768.
- [21] 房全孝,陈雨海,李全起. 灌溉对冬小麦水分利用效率的影响研究. *农业工程学报*,2004,20(4):34-39.
- [22] 许振柱,于振文,董庆裕. 不同栽培条件下旱地麦田土壤水分变化规律. *干旱地区农业研究*,1996,14(3):20-24.
- [23] 杨晓亚,于振文,许振柱. 灌水量和灌水时期对小麦耗水特性和氮素积累分配的影响. *生态学报*,2009,29(2):846-853.