

黄土塬区高底墒条件下养分差别对冬小麦产量的影响

李刚, 王亚萍, 李超, 刘文兆

(西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为研究底墒与施肥组合处理对冬小麦产量的影响,在黄土塬区王东沟小流域塬面农田开展田间试验。3个底墒水平土壤含水量比较高,其2 m土层相对含水量分别为72%,82%,94%;试验年份冬小麦生育期降水301 mm,超过多年平均值的39%。试验结果表明:不施肥时,产量因底墒不同差别较大,且底墒过高会造成产量与收获指数的下降,而施肥后冬小麦产量均显著提升,但底墒不同所致产量的差别减小;施肥可显著增加冬小麦穗数、穗粒数、千粒重、株高,提高水分利用效率与降水利用效率,耗水量虽有增加,但产量提高的程度更大;在试验年份的降水条件下,高底墒会造成土壤水分的深层渗漏,下渗深度可超过5 m。

关键词:冬小麦产量;高底墒;养分;耗水量;黄土塬区

中图分类号:S147.2; S152.7; S512.1⁺1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)04-0146-05

Effect of Nutrient Difference on Yield of Winter Wheat Under the Condition of High Soil Moisture in the Loess Tableland

LI Gang, WANG Yaping, LI Chao, LIU Wenzhao

(Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A field experiment was carried out in the Loess Tableland to study the effects of fertilization and soil water storage before sowing on the grain yield of winter wheat. The results showed that the soil water contents of the 3 types of soil water storage before sowing were relatively high, and the soil relative water contents of the 2 m soil layers were 72%, 82% and 94%, respectively; the precipitation during wheat growth period was 301 mm in the experimental year, exceeding the average annual precipitation of 39%. The results also showed that the yield varied with the soil moisture contents significantly, the yield and harvest index decreased due to high water content when no fertilizer was used, and the nutrient input could significantly increase the yield of winter wheat and the yield was of little difference under different soil water contents; fertilization significantly increased the spike number, kernel number per spike, 1000-grain weight and plant height of winter wheat, and could improve water utilization efficiency and precipitation utilization efficiency; fertilization increased water consumption of winter wheat, but the yield was improved significantly; under the condition of precipitation in the test year, the high soil moisture content could cause the deep leakage of soil moisture, the depth of water permeation was over 5 meters.

Keywords: winter wheat yield; high soil water storage before sowing; nutrient; water consumption; the Loess Tableland

黄土塬区是我国北方小麦主要栽植区之一,水分与养分条件是影响该区域冬小麦产量的两个主要因素。土壤水分状况影响养分的吸收、运转和利用^[1],而增施肥料可促进作物吸水,达到以肥调水、提高水分利用效率、充分发挥“土壤水库”作用的目的^[2]。二

者对冬小麦的生长发育及产量形成产生耦合效应,水分和养分只有在合理范围内,才能互相促进,发挥对小麦的增产作用^[1,3-4]。不同肥水条件下,作物产量表现不同,同时也会影响到水分、养分的利用效率。因此,合理调控水肥,提高水肥利用效率是发展旱作农

业的关键。已有研究表明,在不同的土壤水分条件下,形成最大产量需要的养分量不同,当底塬为 600 mm 时,冬小麦产量、水分利用效率均在 240 kg/hm² 施氮量时达到最大,而底塬较低时,则需要更高的施氮量^[5]。有灌水试验研究发现,拔节期灌溉可显著提高 120 kg/hm² 施氮水平下冬小麦的产量、水分利用效率和有效穗数,而在 180 kg/hm² 施氮量时没有显著影响^[6]。金修宽等^[7] 研究发现,当施氮量为 240 kg/hm² 时,于冬小麦拔节、开花期补灌至田间持水量的 60% 时,可获得最高的产量、水分利用效率与氮素利用效率。在多种灌水水平下,随施肥量增加,冬小麦产量增加,但施肥增产的边际效率逐渐减小^[8]。前人多通过生育期灌水与施肥量的差异来研究冬小麦的水肥耦合效应,而黄土塬区地下水深埋,灌溉受到限制,充足的底塬作为作物耗水的重要来源,是取得高产稳产的基础条件^[9]。同时该区域存在施肥过量的现象,带来严重的环境污染^[10]。因此,适塬适肥,优化水肥配给模式是冬小麦取得高产、高效的重要途径之一。本试验年份降水多,播前底塬高,通过田间试验探究在该水分条件下养分对冬小麦产量的影响,以期为因塬施肥、提升底塬利用效率,充分挖掘黄土塬区降水生产潜力提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2016 年 7 月—2017 年 6 月在黄土高塬沟壑区的陕西长武国家野外试验站进行,试验地海拔 1 220 m;暖温带半湿润偏旱性季风气候,年均气温 9.1℃,降水年际及季节变化大,年均降水量 578 mm,多集中在 7—9 月,无霜期 171 d,为典型的一年一熟雨养旱作农业区;地带性土壤为中壤质黑垆土,母质为马兰黄土,土层深厚,地下水埋深 40—80 m,土壤容重 1.3 g/cm³,田间持水量 22.4%,萎蔫湿度

6.7%~7.0%^[11-12]。2016 年 9 月—2017 年 6 月,冬小麦生长期降水量为 301 mm,高于多年同期平均值 212 mm,逐月分布见图 1。

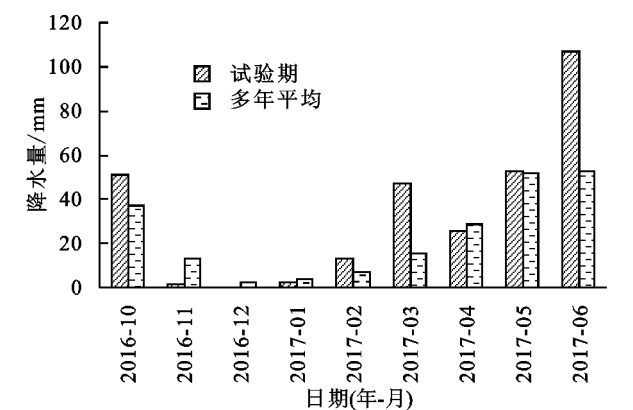


图 1 试验期间逐月降水量

1.2 试验设计

2016 年 7—9 月为不同底塬形成期,通过夏闲期种植玉米耗水与播前灌水形成不同底塬基础,为消除养分差异,播种前把所有小区耕层土壤整平混匀。供试冬小麦品种为长旱 58,于 2016 年 9 月 28 日播种,人工开沟播种,播种量为 170 kg/hm²,行距 20 cm,翌年 6 月 25 日收获。

试验设计为底塬、施肥量两因素,底塬计算深度为 2 m,设计为 3 水平:W₁(相对湿度 72%),W₂(相对湿度 82%),W₃(相对湿度 94%);施肥水平设 3 个,分别为:F₁ 不施肥;F₂ 中肥(N, 90 kg/hm²; P₂O₅, 50.6 kg/hm²; K₂O, 16.9 kg/hm²);F₃ 高肥(N, 180 kg/hm²; P₂O₅, 101.3 kg/hm²; K₂O, 33.8 kg/hm²)。试验共 F₁W₁, F₁W₂, F₁W₃, F₂W₁, F₂W₂, F₂W₃, F₃W₁, F₃W₂, F₃W₃ 9 组底塬、养分差别处理,设置 3 个重复,由田间小区进行试验研究,每小区面积 27 m²,各处理根据不同小区底塬情况进行布设,田间管理同当地农户一致。各处理播前 2 m 土壤水分状况见表 1。

表 1 播种前 0—200 cm 各土层土壤含水量

底塬 水平	土壤含水量/%												
	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm	100—120 cm	120—140 cm	140—160 cm	160—180 cm	180—200 cm	0—200 cm
W ₁	18.7	18.4	17.8	17.9	18.0	17.9	17.2	16.3	15.2	13.8	13.3	13.7	16.5
W ₂	18.5	18.1	17.4	17.9	18.7	19.1	18.6	18.5	18.6	18.4	18.1	17.8	18.3
W ₃	21.0	21.2	21.4	21.4	20.9	20.6	20.8	20.9	20.9	20.9	20.7	21.3	21.0

1.3 田间测定与计算

1.3.1 土壤含水量及贮水量 采用烘干法测定土壤含水量,播种期和收获期各测定 1 次,测定深度为 5 m,其中 1 m 以上土层每 10 cm,1 m 以下土层每 20 cm 测定 1 次,称量土壤湿重后 105℃ 烘至恒重,再称量干重,计算土壤质量含水量。

土壤贮水量计算公式如下:

SW=0.1×θ×ρ×H (1)

式中:SW 为贮水量(mm);θ 为土壤质量含水量(%);ρ 为土壤容重(g/cm³),试验田土壤取值 1.3 g/cm³;H 为土层深度(cm)。

1.3.2 冬小麦耗水量与水分利用效率 采用农田水

量平衡法计算冬小麦生育期耗水量(ET)。研究区域无灌溉条件,地下水埋藏较深,很难被作物利用,地下水供给可忽略不计;同时试验田地势平坦,小区四周起垄,地表无径流产生;一般情况下农田水分入渗深度有限,以 5 m 深度计,降水难能造成渗漏损失。因此,黄土塬区旱作农田 ET 计算表达式可简化为:

ET=P+ΔSW

(2)

式中:ET 为全生育期耗水量(mm);P 为生育期降水量(mm);ΔSW 为计算时段 5 m 土层土壤贮水量初始值与期末值之差(mm)。水分利用效率(WUE)、降水利用效率(PUE)分别由公式(3)―(4)进行计算:

WUE=Y/ET

(3)

PUE=Y/P

(4)

式中:WUE 为作物水分利用效率[kg/(hm²·mm)];PUE 为作物降水利用效率[kg/(hm²·mm)];Y 为作物籽粒产量(kg/hm²);ET 为全生育期耗水量(mm);降水等气象资料由试验站内气象观测场提供。

1.3.3 产量及产量构成

产量及产量构成测定按照

表 2 相同底墒条件下养分处理间产量及产量构成多重比较

底墒	施肥量	产量/ (kg·hm ⁻²)	生物量/ (kg·hm ⁻²)	收获 指数/%	株高/ cm	穗数/ (万穗·hm ⁻²)	穗粒数/ 粒	千粒重/ g
W ₁	F ₁	1937b	5183b	36a	65.0c	293.4b	27.4a	38.8a
	F ₂	3119a	8827a	35a	80.7b	419.2a	25.3a	42.3a
	F ₃	3758a	10438a	36a	87.4a	387.1a	30.0a	38.2a
W ₂	F ₁	951c	3373c	28b	60.8b	403.1a	17.8b	36.3b
	F ₂	3245b	8990b	36a	83.5a	455.6a	26.0a	42.9a
	F ₃	4031a	10974a	37a	87.1a	450.5a	29.3a	40.0ab
W ₃	F ₁	1027c	3546c	29b	67.1b	260.6c	24.9b	36.9c
	F ₂	3319b	9093b	37a	84.0a	334.3b	30.4a	44.2a
	F ₃	4004a	10795a	37a	83.5a	477.2a	26.3ab	41.1b

注:小写字母不同表示在 0.05 显著水平下有差异,株高、穗粒数每小区测定样本为 10 株。

此外,从表 2 还可以看出,收获指数在 W₁ 底墒时 3 种肥力水平间无显著差异,在 W₂、W₃ 底墒时 F₂、F₃ 肥力水平收获指数相近且显著高于 F₁。在 3 种底墒水平下,施肥处理株高均显著高于不施肥处理,表明施肥对冬小麦株高也有显著影响。总的来看,不同底墒、施肥处理产生不同耦合效应进而影响产量,在 W₁ 底墒时,施肥可显著提高有效穗数,穗粒数、千粒重较不施肥有所增加但差异并不显著;在 W₂、W₃ 底墒时,穗粒数、穗数、千粒重施肥处理较不施肥均有所增加,W₂ 底墒时施肥可显著增加穗粒数,W₃ 底墒时施肥处理下的穗数、千粒重较不施肥显著提高。

2.2 相同养分条件下底墒对产量及产量构成的影响

由表 2 数据可知,在 F₁ 养分条件下,W₁ 底墒时产量最高,W₂、W₃ 底墒水平下产量较 W₁ 减产 50% 左右,底墒增加产量反而降低。进一步分析其产量构

《农业气象观测规范》^[13]进行。产量、穗数为每小区取 3 行样品进行测定,同时取样测量千粒重。每小区取 10 株典型小麦样进行收获期株高、穗粒数的测定。
1.3.4 数据处理及分析 采用 Microsoft Excel 2010,SPSS 21.0 等软件进行数据处理及统计分析。

2 结果与分析

2.1 相同底墒条件下养分对产量及产量构成的影响

表 2 为试验各处理间产量及产量构成比较,可以看出:在 3 种底墒条件下,施肥均能显著提高冬小麦产量。在 W₁ 底墒水平时,中肥 F₂ 与高肥 F₃ 产量无显著差异但都显著高于不施肥处理 F₁,F₂ 和 F₃ 产量较 F₁ 分别提高 60%,94%;在 W₂、W₃ 底墒水平时,产量均随施肥量增加而增加,且施肥处理 F₂、F₃ 较 F₁ 显著增加,F₃ 产量也显著高于 F₂,生物量也有类似规律。由此可见,在 3 种底墒条件下,养分投入均能显著提高冬小麦产量、生物量,但是随施肥量的增加,单位施肥量的增产幅度下降。

成发现,F₁W₂ 处理下的冬小麦株高、穗粒数、千粒重均为所有处理中最低值,但穗数较多;F₁W₃ 时穗数为所有处理最低,穗粒数、千粒重较 W₁ 均有所下降,进而导致产量较 F₁W₁ 显著下降。F₂、F₃ 养分条件下,冬小麦产量随底墒增加而略有增加,但并不显著。

水肥通过影响作物产量构成进而影响作物产量,在 F₂、F₃ 养分条件下,虽然不同底墒水平下的产量无显著差异,但穗数、穗粒数、千粒重却有差别。F₂ 养分时,株高、穗粒数、千粒重随底墒增加而增加,穗数在 W₂ 底墒时最高,W₃ 底墒时最低。F₃ 养分条件下,随底墒增加,穗数、千粒重增加,穗粒数、株高下降。当不施肥时,处理 F₁W₂、F₁W₃ 产量与收获指数均显著低于处理 F₁W₁,因底墒不同产量差别较大,而在 2 种施肥条件下,冬小麦产量受底墒影响较小,3 种底墒下产量接近,无显著差异。

2.3 不同底墒与养分处理对冬小麦的影响

通过对施肥量、播前底墒 2 因素作用下的冬小麦产量、各性状指标进行方差分析(表 3),可以看出,从平均意义上讲,施肥对冬小麦产量、产量构成、株高、收获指数均有极显著影响,而底墒对穗数有极显著影响、对收获指数有显著影响。施肥量与底墒的交互作

用对产量、收获指数、穗数均有极显著影响,对生物量、株高、穗粒数有显著影响,对千粒重无明显作用。由此可见,此试验条件下,不同的播前底墒与施肥量组合对冬小麦产量产生不同的效应,整体上表现为施肥产量高于不施肥,而底墒对产量影响较小,但可显著影响作物收获指数与成穗数。

表 3 底墒与施肥量二因素方差分析 F 值

处 理	产 量	生物量	收获指数	株高	穗粒数	穗数	千粒重
施肥量	218.4**	185.8**	30.3**	142.8**	6.4**	23.2**	19.5**
底墒	1.3	1.0	3.6*	0.3	2.7	11.5**	0.7
施肥量×底墒	5.9**	3.2*	7.7**	3.1*	4.0*	6.2**	1.4

注:*表示在 0.05 水平下达显著水平,**表示在 0.01 水平下达显著水平。

冬小麦的籽粒产量是在产量构成三要素的共同作用下形成的,不同处理条件下,冬小麦的籽粒产量会产生较大差异,产量构成三要素也必然有所差异。对所有处理产量构成要素进行变异性分析,结果表明,因不同底墒与施肥组合导致的变异性均表现为穗数>穗粒数>千粒重,相应变异系数为 20.5%,17.1%,7.7%,即不同底墒施肥量组合主要是通过改变冬小麦有效穗数、穗粒数来影响产量的。

2.4 冬小麦生育期水量平衡及水分利用分析

2.4.1 冬小麦耗水组成及水分利用分析 本次试验冬小麦生育期降水量 301 mm,较多年平均降水量高出

89 mm,为丰水年,生育期内降水分布不均,仅 6 月份便有 107 mm 降水。因部分小区存在深层水分渗漏,耗水量难以确定,只分析表 4 中 4 个处理的耗水量—产量关系。由表 4 可以看出,当施肥量为 F₃ 时,随底墒的增加,耗水量、土壤供水量增加,水分利用效率接近。当底墒为 W₁ 时,F₂、F₃ 施肥处理下的 ET,WUE,PUE 均高于不施肥处理;在不同的施肥处理下,高肥 F₃ 的土壤供水量、耗水量高于中肥 F₂,水分利用效率 F₂W₁、F₃W₁ 间没有差异。由此可见,施肥可增加冬小麦耗水量,提高水分利用效率、降水利用效率。相同底墒下,随施肥量增加,耗水量、土壤供水量均有所增加。

表 4 2016—2017 年冬小麦生育期耗水量组成及水分利用

处 理	土壤供水量/ mm	总耗水量/ mm	水分利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	降水利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	土壤供水占 总耗水量比值/%
F ₁ W ₁	—46	255	7.6	6.4	—18
F ₂ W ₁	25	326	9.5	10.4	8
F ₃ W ₁	94	395	9.4	12.4	24
F ₃ W ₂	142	443	9.2	13.4	32

试验中获得高产的 F₃W₁、F₃W₂ 处理土壤供水量占全生育期耗水量 24%~32% 范围内,平均耗水深度均超过 2 m。即使是产量、水分利用效率俱佳的 F₃W₁ 处理,土壤水库依然提供了占生育期耗水量 24% 的水分。另外,F₁W₁ 处理耗水量较少,生育期内土壤水分增加 46 mm,即由于多降水与耗水量少产生土壤水分补给。

2.4.2 冬小麦生育期深层土壤水分下渗分析 本试验夏闲期(7—9 月)降水恰与生育期降水量相同,为 301 mm,在播种前对部分小区进行了灌水以形成较高底墒,灌水量为 60 mm,因此土壤水分条件较好。土壤水分测定深度为 5 m,通过对比播种与收获时期的水分剖面分布(图 2),发现高底墒时,部分小区存在深层水分下渗现象。图 2A 为 F₁W₃ 处理 1 个试验小区,在播前 2—4 m 土层范围内土壤含水量超过田

间持水量,4 m 土层以下低于田间持水量,而收获时情况相反,即 4 m 以上土层水分产生入渗,补给到 4 m 以下土层。图 2B 为 F₃W₃ 处理一试验小区,与 F₁W₃ 处理土壤水分剖面类似,收获时 3.6 m 以下土层水分得到补充。2 种情况水分入渗深度均在 5 m 以下,难以为冬小麦吸收利用。在收获时,F₁W₃ 处理小区整层土壤含水量高于 15%,而 F₃W₃ 处理 1—2 m 土层含水量较低,形成明显的低湿层,表现出不施肥与施高肥时的土壤水分消耗差异。

3 讨论

底墒对冬小麦产量形成的作用毋庸置疑^[14-17]。冬小麦耗水一般在 3 m 土层内,主要用水层在 2 m 以内。本试验中 2 m 土层相对含水量分别为 72%,82%,94%,相对较高,可定义为高底墒。试验不施肥处理 F₁W₂,

F_1W_3 处理产量低于 F_1W_1 处理,底墒增加产量下降,主要与播种时水肥不协调有关。殷修帅等^[6]通过 2 a 试验发现当不施用氮肥时,拔节期灌水较不灌水处理产量分别下降 42%,35%,与本试验结果有相似之处。冬小麦苗期至返青期主要消耗表层水分,拔节期开始耗水逐渐延伸至 2 m 及以下^[15],本试验中不施肥时 W_2 ,

W_3 底墒水平高,冬小麦前期生长优于 W_1 处理,植株群体数量多,过早地消耗了耕层有限的养分与水分,同时由于不施肥,根系下扎浅,难以吸收利用深层土壤储水,在孕穗、灌浆期出现水肥供应不足,最终导致有效穗数、穗粒数、千粒重降低,影响了作物产量,且由于前期旺长,收获指数也降低。

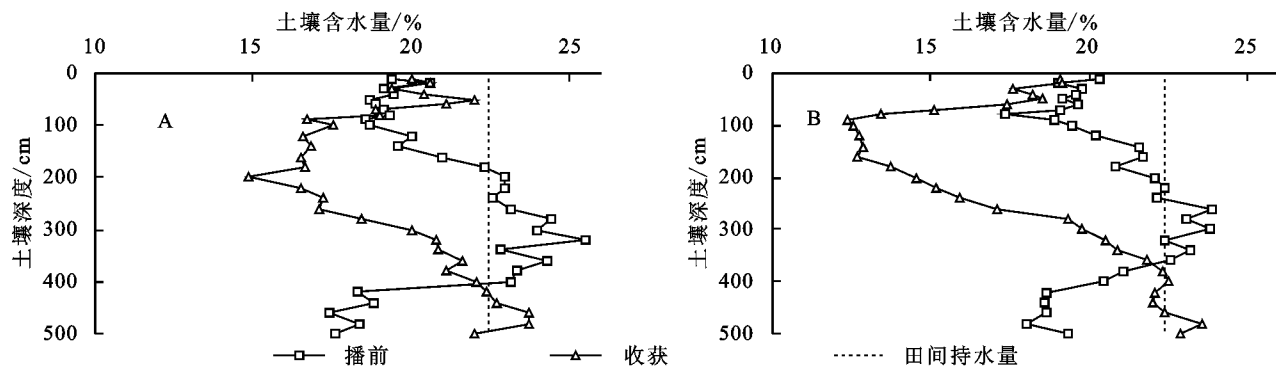


图 2 冬小麦播前、收获时期深层土壤水分入渗剖面比较

在雨养条件下,养分便成为限制产量增长的主导因素,施肥可显著提高作物产量与水分利用效率^[18],而随肥料的施用,生产力逐步提高,首要限制因子由肥到水转变^[19]。试验中的高肥施肥量为当地中上水平,李开元等^[20]在长武的研究表明在不同水文年与土壤水分条件下,施肥均可引起产量的显著提高,而水分只在干旱年份才能显著提升产量。张福锁等^[21]认为旱地小麦生产的第一因素在年降水量低于 300 mm 时为水分,在降水量 300~800 mm 时,肥力是制约因素。本次试验养分对冬小麦产量影响大于底墒,2015—2016 年该试验地研究表明,冬小麦产量随底墒增加而线性增加^[22],本试验中高肥处理产量随底墒并未表现出此特点,这与该年份生育期内降水充足且底墒较高有关,2015—2016 年冬小麦生育期降水 216 mm,为正常年份,本次试验为丰水年,尤其是 6 月 4—5 日降水 70 mm,有效弥补了灌浆后期的土壤供水不足。因而在多降水与较高底墒形成的充足供水条件下,养分是限制小麦产量的主导因素,底墒差异并没有显著影响小麦产量。

生育期降水作为除底墒之外唯一的水分来源,影响旱作冬小麦产量。孟晓瑜等^[5]研究发现,充足底墒下生育期降水亏缺会造成产量降低,不同降水年型下底墒、施肥量对冬小麦的产量、耗水特点亦有很大不同^[14,19]。施用磷肥可促进作物吸收土壤水分,提高底墒利用率^[18],无论何种降水年型,土壤供水都是冬小麦必不可少的一部分,生育期降水多且分布合理,土壤供水少,反之土壤供水多^[11],本试验生育期降水量充足,若获得高产仍需土壤提供 24%~32% 的水分,而在平水年或干旱年作物需吸收更多的土壤储水。

4 结论

在旱作农业为主的长武黄土塬区,冬小麦产量受底墒、养分、生育期降水量共同作用。不同底墒下施肥均可显著提高小麦产量,不施肥时,产量因底墒不同差别较大,而施肥时产量接近。施肥可增加冬小麦耗水,提高水分利用效率与降水利用效率,对冬小麦产量、产量构成、株高均有极显著影响,而底墒对穗数、收获指数有显著影响。播前底墒与施肥量的不同组合对冬小麦产量产生不同的效应,在不施肥与高底墒时由于水肥配合不当,较其他处理产量与收获指数显著下降。在试验年份的降水条件下,高底墒会造成土壤水分的深层渗漏,下渗深度可超过 5 m,造成农田水资源的浪费。

参考文献:

- [1] 梁运江,依艳丽,许广波,等.水肥耦合效应的研究进展与展望[J].湖北农业科学,2006,45(3):385-388.
- [2] 李玉山.旱作农业作物生产力若干规律性及提高途径[J].土壤通报,1990(5):194-197.
- [3] 张凤翔,周明耀,徐华平,等.水肥耦合对冬小麦生长和产量的影响[J].水利与建筑工程学报,2005,3(2):22-24.
- [4] 胡凯军,赵桂琴,吴昌顺,等.麦类作物水肥耦合研究进展[J].中国农学通报,2011,27(12):7-12.
- [5] 孟晓瑜,王朝辉,李富翠,等.底墒和施氮量对渭北旱塬冬小麦产量与水分利用的影响[J].应用生态学报,2012,23(2):369-375.
- [6] 殷修帅,王仕稳,邓西平,等.不同施氮水平下拔节期灌溉对旱地冬小麦的群体动态、产量及耗水特性的影响[J].水土保持研究,2018,25(5):179-186.

- [13] 张经廷,刘云鹏,李旭辉,等.夏玉米各器官氮素积累与分配动态及其对氮肥的响应[J].作物学报,2013,39(3):506-514.
- [14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [15] Cheang H S, Pell M D. The sound of sarcasm[J]. Speech Communication, 2008,50(5):366-381.
- [16] 梁国鹏, Houssou A. Albert, 吴会军,等.施氮量对夏玉米根际和非根际土壤酶活性及氮含量的影响[J].应用生态学报,2016,27(6):1917-1924.
- [17] 张南翼.模拟增温和氮沉降对松嫩草原土壤养分状况的影响[D].长春:东北师范大学,2013.
- [18] 马兴华,于振文,梁晓芳,等.施氮量和底施追施比例对土壤硝态氮和铵态氮含量时空变化的影响[J].应用生态学报,2006,17(4):630-634.
- [19] 马宗斌,熊淑萍,何建国,等.氮素形态对专用小麦中后期根际土壤微生物和酶活性的影响[J].生态学报,2008,28(4):1544-1551.
- [20] Allison S D, Czimczik C I, Treseder K K. Microbial activity and soil respiration under nitrogen addition in Alaskan boreal forest [J]. Global Change Biology, 2008,14(5):1156-1168.
- [21] Allison S D, Vitousek P M. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2005,37(5):937-944.
- [22] 方运霆,莫江明,周国逸.离子交换树脂袋法研究森林土壤硝态氮及其对氮沉降增加的响应[J].生态环境学报,2005,4(4):483-487.
- [23] 谢孟林,李强,查丽,等.低氮胁迫对不同耐低氮性玉米品种幼苗根系形态和生理特征的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(8):946-953.
- [24] 汪晓丽,陶玥玥,盛海君,等.硝态氮供应对小麦根系形态发育和氮吸收动力学的影响[J].麦类作物学报,2010,30(1):129-134.
- [25] 苏冰莹,颜丽,关连珠,等.长期不同施肥对黑土无机磷组分的影响[J].中国土壤与肥料,2010(3):4-7.
- [26] 李奕林.不同水稻品种根际土壤硝化特征研究[D].南京:南京农业大学,2007.
- [27] 杨柳燕,王楚楚,孙旭,等.淡水湖泊微生物硝化反硝化过程与影响因素研究[J].水资源保护,2016,32(1):12-22.
- [28] 杨迪,马瑞,黄文斌,等.养分和水分胁迫下2年生落叶松根系有机酸的分泌行为研究[J].安徽农业科学,2013(36):13932-13934.
- [29] 戢林,李廷轩,张锡洲,等.水稻氮高效基因型根系分泌物中有机酸和氨基酸的变化特征[J].植物营养与肥料学报,2012,18(5):1046-1055.
- [30] Gao W, Cheng S, Fang H, et al. Effects of simulated atmospheric nitrogen deposition on inorganic nitrogen content and acidification in a cold-temperate coniferous forest soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(2):114-121.

(上接第150页)

- [7] 金修宽,马茂亨,赵同科,等.测墒补灌和施氮对冬小麦产量及水分、氮素利用效率的影响[J].中国农业科学,2018,51(7):1334-1344.
- [8] 罗赛阳.不同水肥条件对冬小麦干物质积累及产量的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [9] 李玉山,喻宝屏.土壤深层储水对小麦产量效应的研究[J].土壤学报,1980,17(1):43-54.
- [10] 刘芬,同延安,王小英,等.渭北旱塬小麦施肥效果及肥料利用效率研究[J].植物营养与肥料学报,2013,19(3):552-558.
- [11] 董大学,郭民航.渭北旱塬农田水分状况与提高小麦水分利用途径的研究[J].水土保持通报,1990,10(6):13-20.
- [12] 程立平,刘文兆,李志.黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征[J].生态学报,2014,34(8):1975-1983.
- [13] 国家气象局.农业气象观测规范[Z].北京:气象出版社,1993.
- [14] 董大学,钟良平.冬小麦产量与底墒关系分析[J].水土保持通报,1993,13(5):58-61.
- [15] 邓振镛,张强,王强,等.黄土高原旱塬区土壤贮水量对冬小麦产量的影响[J].生态学报,2010,31(18):5281-5290.
- [16] 韩美坤,张萌,李金鹏,等.播前贮墒量对黑龙江平原旱作冬小麦产量及水分利用的影响[J].麦类作物学报,2017,37(9):1201-1208.
- [17] 任三学,赵花荣,郭安红,等.底墒对冬小麦植株生长及产量的影响[J].麦类作物学报,2005,25(4):79-85.
- [18] 党廷辉.施肥对旱地冬小麦水分利用效率的影响[J].生态农业研究,1999,7(2):28-31.
- [19] 钟良平,邵明安,李玉山.农田生态系统生产力演变及驱动力[J].中国农业科学,2004,37(4):510-515.
- [20] 李开元,邵明安,李玉山.不同水文年型作物的水肥产量效应与水分利用[C]//李玉山.黄土高原土壤水分循环与农田生产力.西安:陕西人民出版社,2015.
- [21] 张福锁,朱耀瑄.旱地小麦生产第一因素[J].干旱地区农业研究,1992,10(1):39-42.
- [22] 李超,刘文兆,林文,等.黄土塬区冬小麦产量及水分利用效率对播前底墒变化与生育期差别供水的响应[J].中国农业科学,2017,50(18):3549-3560.