

不同施肥处理下麦田水分利用过程及其效率特征

张燕青¹, 刘文兆²

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:通过田间试验(2010—2011 年),就不同施肥处理下麦田水分利用过程及其效率特征进行研究。结果表明:施磷量为 90 kg/hm² 条件下,配施氮量在 0~135 kg/hm² 时,农田耗水率(农田耗水量占总的供水量的比率,ET/SW)和蒸腾比率(蒸腾量占农田耗水量的比率,T/ET)随配施氮量的增加逐渐提高,考虑蒸腾消耗的作物水分利用率(籽粒产量与蒸腾量的比值,Y/T)和降水利用效率(Y/P)在施氮量为 180 kg/hm² 时达到最大。施氮量为 90 kg/hm² 条件下,配施磷量在 90~180 kg/hm² 时,各处理的农田水分消耗率、蒸腾比率几乎相同,但明显高于单施氮肥处理。只考虑蒸腾消耗的作物水分利用率随施磷量的增加逐渐提高,降水利用效率在施磷量为 90 kg/hm² 时达到最大值。与不施肥处理相比,施磷量为 90 kg/hm² 与施氮量为 180 kg/hm² 处理的麦田,冬小麦从拔节期至成熟期的农田耗水量增加 23.5%,蒸腾量增加 186.8%;农田水分消耗率提高 10.5%,作物蒸腾比率提高 200%,作物水分利用效率(Y/ET)达到 11.13 kg/(hm²·mm),降水利用效率达到 18.73 kg/(hm²·mm)。

关键词:黄土塬区;长期定位施肥;降水利用效率;水分利用效率;产量;冬小麦

中图分类号:S512.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)05-0133-06

Characteristics of Water Utilization Process and Efficiency under Different Fertilization Treatments in a Wheat Field

ZHANG Yan-qing¹, LIU Wen-zhao²

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Characteristics of water utilization process and efficiency under different fertilization treatments were studied through a field experiment conducted from 2010 to 2011. Results showed that under the condition of 90 kg/hm² P application, the ratio of cropland water consumption to total supplied water (ET/SW) and the ratio of total transpiration to cropland water consumption (T/ET) gradually increased with the increased rate of N application if the rate of N application was between 0 and 135 kg/hm², but crop water use efficiency with transpiration considered only (the ratio of grain yield to total transpiration, Y/T) and precipitation use efficiency (PUE) reached the highest value when the rate of N application was 180 kg/hm². Under the rate of 90 kg/hm² N application, the ET/SW was almost the same as the T/ET if the rate of P application was between 90 and 180 kg/hm², but significantly higher than single N application treatment. The Y/T was gradually increased with the increased P application under the same N application. However, PUE reached the highest value when P application was 90 kg/hm². In contrast to no fertilizer application, the combined application of 90 kg/hm² P and 180 kg/hm² N in the winter field, from jointing stage to maturity of winter wheat, increased the amount of cropland water consumption by 23.5%, the amount of transpiration by 186.8%, the ET/SW by 10.5%, the T/ET by 200%, the water use efficiency (Y/ET) up to 11.13 kg/(hm²·mm), and PUE up to 18.73 kg/(hm²·mm).

Key words: Loess Tableland; long-term fertilization experiment; precipitation use efficiency; water use efficiency; yield; winter wheat

收稿日期:2011-08-29

修回日期:2012-05-28

资助项目:国家自然科学基金项目(41171033)

作者简介:张燕青(1986—),男,在读硕士研究生,主要从事农业生态学方面研究。E-mail:zhangyanqing1986@126.com

通信作者:刘文兆(1960—),男,研究员,主要从事作物—水分关系及节水农业研究。E-mail:wzliu@ms.iswc.ac.cn

黄土塬区属半干旱半湿润气候类型区,年降水量少,且季节分配不均,主要以旱作农业为主,作物产量及其水分利用效率的提高是旱作农业及节水农业研究的主题。而黄土旱塬区在干旱少雨的同时,土壤养分亏缺,肥料是限制水分利用效率的又一个重要因素^[1],所以如何在有限降水情况下充分利用水资源和合理施肥是该地区农业发展的关键。各种研究表明合理施肥不但可以改善养分供应,协调水肥关系,而且能够促进作物生长发育和干物质积累过程^[2-3],进而提高旱地作物水分利用效率和产量^[4-6]。刘文兆^[7]在降水利用效率概念的基础上建立了作物降水利用效率的统一表达式,揭示了作物利用降水的过程中,从降水的入渗、贮存,到降水的消耗、转化诸环节间的内在联系。Hsiao 等^[8]把农田水分利用效率进行系统化和量化,认为总效率是由一个连乘式的系列步骤链构成,追求每一链节效率的最大化,进而最大限度的提高总的水分利用效率。本试验拟在旱作条件下,通过长期定位施肥试验,分析不同施肥处理的 0—600 cm 土层土壤水分动态变化和在冬小麦整个生育期及各主要生育期的农田水分蒸发蒸腾情况,进而研究旱作冬小麦产量和降水利用效率对不同施肥处理的响应特征,旨在为实现旱农高产提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验布设于中国科学院长武黄土高原农业生态试验站十里铺轮作与肥料长期定位试验场(107°44.703'E,35°12.787'N)。位于黄土高原中南部的长武塬区,属温带半湿润大陆型季风气候,农业生产全部依赖降水,属于典型的旱作农业区。该区海拔 1 214 m,年均降雨 578.5 mm,>10℃ 积温 3 029℃,年均气温 9.1℃,无霜期 171 d,塬面平坦宽阔,黄土堆积深厚,土壤为黄盖黏黑垆土,肥力中等,田间持水量为 22.4%,凋萎湿度为 9%。

1.2 试验设计

长期施肥定位试验于 1984 年开始进行,耕层土壤(1984 年秋季试验开始时的分析值)有机质 10.5 g/kg,全氮 0.77 g/kg,碱解氮 37.0 mg/kg,有效磷 2.2 mg/kg,速效钾 129.3 mg/kg。小区面积 22 m²,冬小麦常年连作,共设 11 个处理,3 次重复,随机排列:CK, N90, P90, N90P45, N90P90, N90P135, N90P180, N45P90, N135P90, N180P90, N90P90K90。小麦品种为长武 134 号。本次试验的播种期为 2010 年 9 月 22 日,收获期为 2011 年 6 月 28 日。

1.3 测定指标与方法

(1) 土壤贮水量与土壤累积贮水量的测定。记录 2010—2011 年度冬小麦全生育期的降水量,采用中子仪法测定土层 0—600 cm 的土壤含水量,0—100,100—600 cm 土层分别以 10,20 cm 间隔测定,进行测定。土壤贮水量的计算公式为:

$$SWS = \sum (\Delta \theta_i \cdot Z_i) \quad (1)$$

式中:SWS——土壤贮水量; $\Delta \theta_i$ ——土壤某一层体积分含水量; Z_i ——土壤层次厚度(mm); i ——土壤层次。

由于试验区无地表径流,在不考虑地下水补给和深层渗漏的情况下,分析时段内作物最大根系影响层内的土壤累积贮水量,也即总供水量的计算公式为:

$$SW = SWS_{\text{begi}} + P \quad (2)$$

式中:SW——土壤累积贮水量; SWS_{begi} ——分析时段之初土层的土壤贮水量; P ——作物生育期大气降水量。

(2) 农田蒸散量的测定。用水分平衡方程式计算,在试验条件下可简化为:

$$ET = P - \Delta W \quad (3)$$

式中:ET——作物生长时的蒸散量,包括植株蒸腾量与植株间地表蒸发量; ΔW ——作物收获时与播种时的土壤贮水量之差。

(3) 蒸腾量的测定。通过以下公式确定蒸腾量 T 占蒸散量 ET 的比例^[9]:

$$T/ET = 1 - e^{-K(1.0 + A |\sin(\frac{t-13}{12})\pi|) LAI} \quad (4)$$

式中:LAI——叶面积指数; t ——1 d 中的时间(h),从 0 开始排序; K, A ——经验系数。对于冬小麦, $K = 0.3973, A = 0.10364$ 。冠层叶面积指数用 LAI—2000 冠层分析仪测定。

(4) 籽粒产量的测定。小麦收获后,产量由每个小区中间八行进行折算而来。

(5) 一般意义上考虑蒸散消耗的作物水分利用效率 WUE 的表达式:

$$WUE = Y/ET \quad (5)$$

(6) 农田降水利用效率 PUE^[7]的表达式:

$$PUE = SW/P \times ET/SW \times T/ET \times Y/T \quad (6)$$

式中:SW/ P ——雨水收存率; ET/SW ——农田水分消耗率; T/ET ——蒸腾比率; Y/T ——只考虑蒸腾消耗的水分利用效率。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理下土壤水分分布特征

与不施肥相比,氮磷肥配施对土壤水分分布的影响最显著(图 1),土壤含水量在 0—450 cm 均最低,而氮磷钾肥配施与氮磷肥配施相比,土壤含水量的变

化不明显。在相同施磷量(90 kg/hm²)条件下,各处理之间相差较大,随着施氮量的增加,土壤含水量不断降低,当施氮量达到 135 kg/hm² 时,继续增加施氮量,土壤含水量反而有所回升。在相同施氮量(90 kg/hm²)条件下,单施氮肥在 0—200 cm 与其它各处

理差异显著,施磷量在 45~180 kg/hm² 的土壤含水量没有明显变化,200 cm 以下的土壤含水量随施磷量的增加,各处理间的土壤含水量差异显著,但施磷量达到 90 kg/hm² 时,继续增施磷肥,土壤含水量变化不明显。

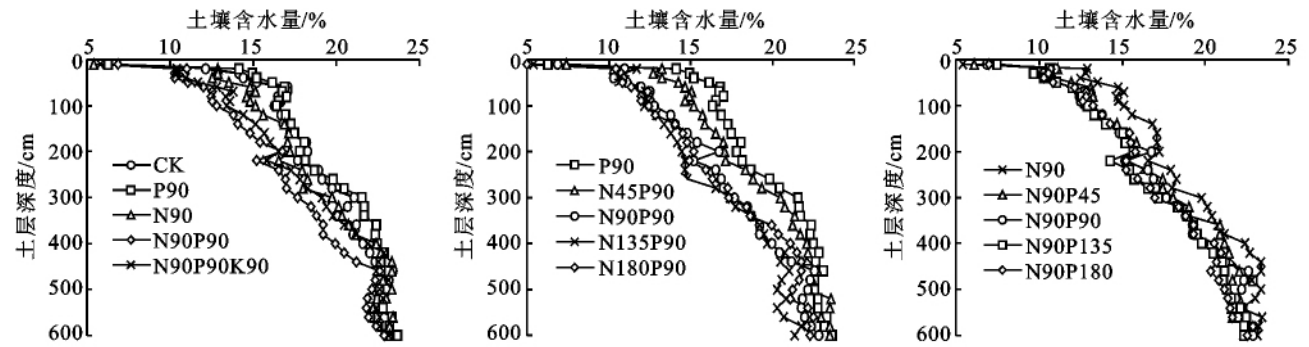


图 1 施肥水平对冬小麦收获期土壤水分分布的影响

2.2 施肥处理对冬小麦主要生育期叶面积指数和蒸腾比率的影响

冠层叶面积指数的大小在一定程度上反映了小麦冠层对光的截获以及对光能的转化能力,蒸腾比率是表示植株蒸腾耗水量占农田蒸散量的比值,与叶面积指数有密不可分的关系。表 1 显示了冬小麦生长发育过程中叶面积指数和作物蒸腾比率的动态变化。在冬小麦的整个生育期,作物蒸腾比率与叶面积指数的变化趋势一致,且在冬小麦各生育期,氮磷肥配施处理的叶面积指数和蒸腾比率均明显高于不施肥处理。但两种处理的冬小麦进入拔节期以后,植株生长旺盛,叶面积指数和蒸腾比率均迅速增加,在拔节—抽穗期均达到最大,并且氮磷肥配施处理的叶面积指数和蒸腾比率值较不施肥处理分别提高 200% 和 119.2%。随着生育进程的推进,进入灌浆期以后,冬小麦营养生长减弱,枝叶缓慢枯萎,植株蒸腾耗水量减少,蒸腾比率随叶面积指数的减小逐渐降低。

表 1 冬小麦主要生育期的叶面积指数和蒸腾比率变化比较

生育阶段	不施肥处理		氮磷肥配施处理	
	叶面积指数	蒸腾比率	叶面积指数	蒸腾比率
播种—拔节	0.40a	0.17a	1.75a	0.52a
拔节—抽穗	0.89c	0.31c	2.67c	0.68b
抽穗—灌浆	0.80bc	0.29bc	2.40b	0.63b
灌浆—成熟	0.71b	0.25b	1.84a	0.55a

注:同一列内数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著(P<0.05)。

2.3 不同施肥处理下冬小麦主要生育期农田蒸散量的动态变化

冬小麦在各生育时期的阶段蒸散量以及日蒸散量(表 2、图 2)表明,在播种—拔节期,生育期时间较

长,但小麦生长缓慢,农田耗水主要以地表蒸发为主,P90 处理的蒸散量和日蒸散量均明显高于 CK 处理,而 N90 和 N90P90 处理均明显低于 CK 处理,增施钾肥有利于减小冬小麦在此生育时期的地表蒸发量,使 N90P90K90 处理的农田蒸散量较 CK 处理降低 18.1%。进入拔节期,温度逐渐升高,冬小麦开始迅速进行营养生长,需水量大,施肥处理能够有效促进根系深层吸水,充分满足作物正常生长的水分需求,而长期单施磷肥使根系吸水能力减弱,所以 P90 处理蒸散量和日蒸散量反而会减小,N90P90 的蒸散量和日蒸散量最大,较 CK 处理提高 30.5%,增施钾肥无明显变化。在抽穗—灌浆期,是作物进行生殖生长的关键时期,营养生长逐渐减弱,作物需水量也不断的减少,N90P90 处理的蒸散量与日蒸散量最大,较 CK 处理提高 23.4%。进入成熟期以后,各施肥处理冬小麦的枝叶开始枯萎,阶段蒸散量和日蒸散量逐渐减少。在相同施磷量条件下,在播种—拔节期,随施氮量的增加,蒸散量和日蒸散量不断降低,当施氮量达到 135 kg/hm² 时,增加施氮量,不再有明显变化。在拔节—抽穗期和抽穗—灌浆期,农田耗水量大,增施氮肥能够加大作物根系的吸水能力,且随施氮量的增加不断加强,当施氮量为 135 kg/hm² 时,吸水强度最大。进入成熟期以后,增施氮肥处理能够继续促使小麦根系吸水,阶段蒸散量和日蒸散量较 P90 处理提高 78.7%。在相同施氮条件下,在播种—拔节期,各处理间的农田蒸散量变化不明显。在拔节—抽穗期,施磷量为 90 kg/hm² 时,阶段蒸散量和日蒸散量均达到最大,继续增加施磷量,蒸散量和日蒸散量反而会明显减少。进入灌浆期之后,不同施磷量处理之间无显著性差异。

表 2 冬小麦主要生育期的蒸散量 mm

处理	播种— 拔节	拔节— 抽穗	抽穗— 灌浆	灌浆— 成熟	总蒸散量
CK	177.64	97.59	59.54	29.46	364.23b
P90	200.99	83.17	62.84	22.19	369.19b
N90	154.94	97.40	63.12	32.58	348.04a
N90P90	155.88	128.62	73.46	30.71	388.66c
N90P90K90	145.44	127.40	73.41	23.31	369.57b
P90	200.99	83.17	62.84	22.19	369.19a
N45P90	182.70	107.23	61.67	25.98	377.57ab
N90P90	155.88	128.62	73.46	30.71	388.66b
N135P90	138.61	131.75	76.69	39.64	386.69b
N180P90	137.07	117.34	82.35	30.71	367.46a
N90	154.94	97.40	63.12	32.58	348.04a
N90P45	150.36	109.15	75.75	27.76	363.01b
N90P90	155.88	128.62	73.46	30.71	388.66c
N90P135	147.78	116.64	77.53	28.08	370.03d
N90P180	148.95	117.20	78.56	26.12	370.83d

注:同一列内每 5 个数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著($P < 0.05$),下表同。

2.4 不同施肥处理下冬小麦主要生育期作物蒸腾量的动态变化

冬小麦主要生育期的阶段蒸腾量以及日蒸腾量的动态变化(表 3、图 3)显示,在小麦的播种—拔节期,作物耗水主要以裸露地表的蒸发为主,蒸腾量小,P90 处理的蒸腾量、日蒸腾量与 CK 处理差异很小,而增施氮肥能够加强冬小麦对土壤水分的利用,

N90、N90P90 和 N90P90K90 处理的蒸腾量较 CK 处理分别提高 45.5%,200.4%,163.5%。在拔节—抽穗期,温度回升,植株生长加快,需要大量的蒸腾耗水,才能维持作物的正常生长,为小麦高产奠定基础,N90 与 N90P90 处理的蒸腾量较 CK 处理分别提高 48.5%和 169.5%,增施钾肥也加强了作物根系对土壤水分的吸收强度,其蒸腾量和日蒸腾量较 CK 处理提高了 185.7%。进入灌浆期以后仍然是氮磷肥配施的蒸腾耗水量最多。

在相同施磷条件下,在播种—拔节期,随施氮量的增加,小麦的阶段蒸腾量和日蒸腾量逐渐增加,当施氮量为 180 kg/hm^2 时,其蒸腾量较 CK 处理增加 258.2%。各施肥处理在拔节—抽穗期的蒸腾量达到最高,且各处理之间差异较大。随施氮量的增加,蒸腾量和日蒸腾量迅速升高,且当施氮量为 135 kg/hm^2 时,阶段蒸腾量和日蒸腾量最大,较 P90 处理提高 413.5%。在抽穗—灌浆期,随施氮量的增加,蒸腾量也逐渐增多。进入灌浆期之后,作物的蒸腾强度减小,蒸腾量也迅速降低。

相同施氮条件下,增施磷肥能够有效增强植株的蒸腾耗水,但施磷量过高反而会减小作物的有效蒸腾耗水量,当施磷量达到 90 kg/hm^2 时,小麦在各生育阶段的蒸腾量和日蒸腾量均达到最大,继续增加施磷量,效果不明显。

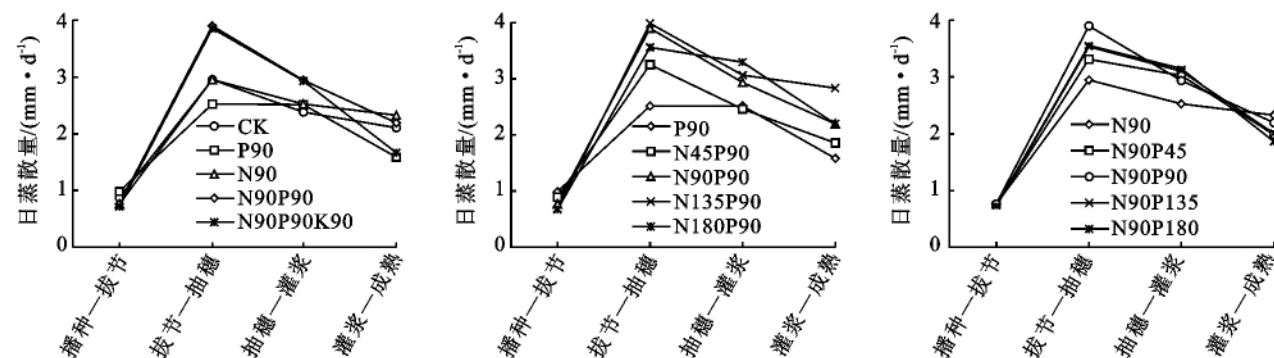


图 2 冬小麦主要生育期的日蒸散量

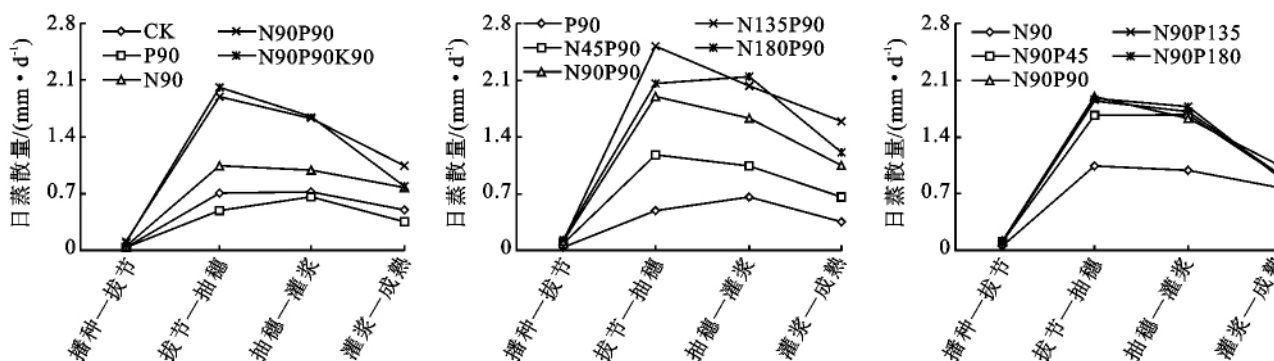


图 3 冬小麦主要生育期的日蒸散量

表 3 冬小麦主要生育期的蒸腾量 mm

处理	播种— 拔节	拔节— 抽穗	抽穗— 灌浆	灌浆— 成熟	总蒸腾量
CK	7.80	23.20	18.12	6.95	56.08b
P90	7.64	16.16	16.43	4.95	45.19a
N90	11.35	34.46	24.73	10.81	81.36c
N90P90	23.45	62.54	40.67	14.62	147.89d
N90P90K90	20.57	66.30	41.22	11.02	139.11d
P90	7.64	16.16	16.43	4.95	45.19a
N45P90	16.82	38.80	25.94	9.18	90.74b
N90P90	23.45	62.54	40.67	14.62	147.89c
N135P90	23.09	82.99	50.69	22.31	179.09e
N180P90	27.38	68.00	53.52	16.93	165.83d
N90	11.35	34.46	24.73	10.81	81.36a
N90P45	22.21	54.86	41.91	12.82	131.81b
N90P90	23.45	62.54	40.67	14.62	147.89c
N90P135	21.27	60.86	42.87	13.08	138.08c
N90P180	20.77	61.81	44.27	12.49	139.35c

2.5 不同施肥处理对冬小麦降水利用效率及各分项的影响

由不同施肥处理对冬小麦降水利用效率及各分

项的影响(表 4)可知,由于长期施肥处理使土壤水分条件不断变化,播种期的土壤有效贮水量也有差异,N90P90 处理的农田水分消耗率高于无施肥处理。蒸腾比率与冬小麦的蒸腾量有关,因为氮磷肥配施能够促进作物生育期的生长,使植株生长旺盛,蒸腾耗水量增加,所以 N90P90 处理的蒸腾比率较 CK 处理提高 153%。考虑蒸散消耗的水分利用效率(Y/ET)是表示农田蒸散量对产量的贡献率,与不施肥相比,P90 处理的水分利用效率降低,但变化不明显,N90P90 处理最高,增施钾肥反而降低冬小麦的水分利用效率,Y/ET 大小顺序依次是:N90P90>N90P90K90>N90>CK>P90。而只考虑蒸腾消耗的作物水分利用效率(Y/T)是表示作物蒸腾量对产量的贡献率,不同施肥处理的作物水分利用效率表现为:N90P90>N90>P90>N90P90K90>CK,在冬小麦整个生育期,P90 的降水利用效率与 CK 处理无明显差异,N90P90 的降水利用效率高达 16.2 kg/(hm²·mm),较 CK 处理提高了 163%,增施钾肥反而会降低作物降水利用效率。

表 4 不同施肥水平对冬小麦降水利用效率及各分项的影响

处理	农田水分 消耗率	作物蒸腾 比率	考虑蒸腾消耗的水分利用 效率/(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	考虑蒸散消耗的水分利用 效率/(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	降水利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
CK	0.19	0.15	20.81	3.16	5.27a
P90	0.19	0.12	23.59	2.89	4.88a
N90	0.19	0.23	24.10	5.63	8.98b
N90P90	0.22	0.38	24.22	9.10	16.20d
N90P90K90	0.20	0.38	21.75	8.19	13.85c
P90	0.19	0.12	23.59	2.89	4.88a
N45P90	0.20	0.24	22.39	5.38	9.30b
N90P90	0.22	0.38	24.22	9.10	16.20c
N135P90	0.23	0.46	19.94	9.22	16.33c
N180P90	0.21	0.45	24.67	11.13	18.73d
N90	0.21	0.23	24.10	5.63	8.98a
N90P45	0.24	0.36	23.71	8.61	14.31b
N90P90	0.25	0.38	24.22	9.10	16.20c
N90P135	0.25	0.37	25.10	9.37	15.87c
N90P180	0.25	0.38	26.09	9.81	16.65c

在相同施磷条件下,农田水分消耗率表现为当施氮量为 135 kg/hm² 时最高,继续增加施氮量农田水分消耗率反而会急剧减小;随施氮量的增加,蒸腾比率也迅速增大,当施氮量达到 135 kg/hm² 时,其蒸腾比率较 P90 处理提高了 275%,继续增加施氮量,无明显变化。随施氮量的增加,考虑蒸散消耗的农田水分利用效率逐渐升高。而只考虑蒸腾消耗的作物水分利用率的变化趋势表现为:N180P90>N90P90>P90>N45P90>N135P90,这主要是因为在小麦生长发育期间,N135P90 处理作为蒸腾消耗的水分大量用

于植株的营养生长,而满足用于生殖生长的蒸腾消耗较少,所以导致其作物水分利用率较 P90 降低 15%;随施氮量的增加,降水利用效率不断提高,当施氮量为 180 kg/hm² 时,降水利用效率较 CK 处理提高 284%。

在相同施氮情况下,施磷量在 90~180 kg/hm² 时,各处理的农田水分消耗率、蒸腾比率几乎相同,且明显高于 N90 处理;随施磷量的增加,考虑蒸散消耗的水分利用效率不断升高,但施磷量为 90~180 kg/hm² 时,各处理之间变化不明显。只考虑蒸腾消耗的

作物水分利用率随施磷量的增加逐渐提高,而降水利用效率在施磷量为 90 kg/hm^2 时就达到最大,继续增加施磷量,降水利用效率不再有显著性差异。

3 结论

长期定位施肥试验 2010—2011 年的测定结果表明,单施氮肥能够加强植株根系水分吸收的能力,且氮磷肥配施的效果更佳,使冬小麦根系吸收土壤深层水分的潜力达到最大,土壤各层次的土壤含水量最低;且当施磷量为 90 kg/hm^2 、施氮量为 135 kg/hm^2 时,冬小麦在拔节期至成熟期农田耗水量较不施肥处理增加 32.8%,蒸腾量增加 223.2%。

在小麦整个生育期,施肥处理对降水利用效率及各分项的影响较大。在相同施磷条件下,考虑蒸散消耗的作物水分利用效率随施氮量的增加逐渐提高,而考虑蒸腾消耗的作物水分利用率的较单施磷肥处理降低 15%;当施氮量为 180 kg/hm^2 时,作物降水利用效率高达 $18.73 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ 。在相同施氮情况下,随施磷量的增加,考虑蒸散消耗的水分利用效率不断升高,但施磷量为 $90 \sim 180 \text{ kg/hm}^2$ 时各处理之间变化不明显;只考虑蒸腾消耗的作物水分利用效率随施磷量的增加逐渐提高。降水利用效率在施磷量为 90 kg/hm^2 时达到最大,为 $16.25 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$,继续增加施磷量,不再有显著性变化。

因此,在旱作农业生产中,要综合考虑降水利用

效率各分项对不同施肥处理的响应以及各利用率及效率之间的联动机制,实现水分利用效率、降水利用效率与产量提高的目的。

参考文献:

- [1] 李玉山,张孝中.黄土高原南部作物水肥产量效应的田间研究[J].土壤学报,1990,27(1):1-7.
 - [2] 岳维云,宋建荣,张耀辉,等.天水旱作农业区膜侧小麦不同施肥水分增产效应分析[J].干旱地区农业研究,2006,24(3):15-18.
 - [3] 韩磊,王永华,冯伟,等.两种气候年型下不同施肥处理对小麦群体质量及产量的影响[J].西北农业学报,2011,20(12):40-45.
 - [4] 周涛,惠开基.施肥提高旱地作物水分利用效率的机理和效果[J].土壤通报,2000,31(2):85-87.
 - [5] 王学春,李军,郝明德.施肥水平对长武旱塬地冬小麦产量影响的模拟[J].农业工程学报,2008,24(8):45-50.
 - [6] 王怡,高华.冬小麦陕 229 在旱地不同施肥水平的水分效率研究[J].干旱地区农业研究,1999,17(3):35-38.
 - [7] 刘文兆.旱地作物雨水利用效率统一性表达式的构造及其意义[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(2):62-66.
 - [8] Hsiao T C, Pasquale S, Elias F. A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture[J]. Irrig Sci, 2007,25(3):209-231.
 - [9] 康绍忠,张富仓.作物叶面蒸腾与棵间蒸发分摊系数的计算方法[J].水科学进展,1995,6(4):285-289.
- ~~~~~
- (上接第 132 页)
- [3] Matthew A L, Jendrdtte G D, Wu J G, et al. The urban funnel model and the spatially heterogeneous ecological footprint[J]. Ecosystems, 2001,4(8):782-796.
 - [4] Weng Qihao. Modeling urban growth effects on surface runoff with the integration of Remote Sensing and GIS [J]. Environmental Management, 2001,28(6):737-748.
 - [5] Gokhale A A. Environmental initiative prioritization with a delphi approach: a case study[J]. Environmental Management, 2001,28(2):187-193.
 - [6] 申文明,张建辉,王文杰,等.基于 RS 和 GIS 的三峡库区生态环境综合评价[J].长江流域资源与环境,2004,13(2):159-162.
 - [7] 李洪义,史舟,郭亚东,等.基于遥感与 GIS 技术的福建省生态环境质量评价[J].遥感技术与应用,2006,21(1):49-54.
 - [8] 孟庆香.基于遥感 GIS 和模型的黄土高原生态环境质量综合评价[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2006.
 - [9] 杜自强,王建,陈正华,等.基于 RS 和 GIS 的区域土地利用动态变化及演变趋势分析[J].干旱区资源与环境,2007,21(1):115-119.
 - [10] 龚建周,夏北成.基于大气辐射校正的广州市植被覆盖度遥感估算[J].应用生态学报,2007,18(3):575-580.
 - [11] 刘建,刘小琴,何政伟.基于 TM 影像的城市热岛效应研究[J].水土保持研究,2010,17(5):172-175.
 - [12] 彭补拙.用动态的观点进行环境综合质量评价[J].中国环境科学,1996,16(1):16-19.
 - [13] 谷雨,刘昕,邓红兵.基于层次分析法的重庆市城乡结合部生态系统健康评价[J].中国环境科学,2010,30(11):1573-1578.
 - [14] 王默玉,魏佳,申晓留.基于 AHP 的北京市能源安全研究与分析[J].应用能源技术,2010(9):7-11.
 - [15] 张东辉,赵英俊,薛东剑,等.3S 技术在单体滑坡风险评估中的应用[J].地球与环境,2011,39(1):69-75.