

不同灌水条件下分层施肥对冬小麦产量和水分利用效率的影响

李 奔, 王贵彦, 陈召月, 薛佳欣, 陈宗培, 宫 宇, 张江伟, 段巍巍

(河北农业大学农学院, 华北作物改良与调控国家重点实验室, 河北省作物生长调控实验室, 河北 保定 071001)

摘要: 为了明确分层施肥在不同灌水条件下对冬小麦产量、耗水特性和水分利用效率的影响, 为黄淮海地区小麦高产高效生产实践提供理论依据。结合当地冬小麦灌溉制度采用水肥 2 因素裂区试验, 水分为主区, 施肥方式为副区, 设置 3 个灌溉处理: 春季不灌水(W_0)、春季拔节期灌水(W_1)、春季拔节期灌水+开花期灌水(W_2), 灌水量 90 mm/次; 2 种施肥方式处理: 常规施肥处理(F_1)和分层施肥处理(F_2), 分析了不同灌水与施肥模式下冬小麦产量、耗水特性和水分利用效率的特点。结果表明: 与 F_1 相比, F_2 处理 40—120 cm 土层土壤贮水消耗量、冬小麦拔节期一开花期耗水强度和农田耗水量显著增加, 其中以 W_2F_2 处理农田耗水量最高。分层施肥处理冬小麦水分利用效率较常规施肥提升 14.2%~3.0%, 其中以 W_1F_2 处理水分利用效率最高。在 3 种灌水条件下, 分层施肥处理较常规施肥显著增加了冬小麦的单位面积穗数, 产量增加 19.8%~6.4%, 其中 W_2F_2 产量最高。因此, 建议在水分充足地区, 采取小麦春季灌溉拔节水 and 开花水结合底肥分层施用的管理方式; 在水资源短缺地区, 采取小麦春季灌溉拔节水结合底肥分层施用的管理方式。

关键词: 分层施肥; 灌溉; 冬小麦; 产量; 耗水特性; 水分利用效率

中图分类号: S365; S512.1⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)03-0326-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.045

Effects of Layered Fertilization on Yield and Water Use Efficiency of Winter Wheat Under Different Irrigation Conditions

LI Ben, WANG Guiyan, CHEN Zhaoyue, XUE Jiaxin, CHEN Zongpei,

GONG Yu, ZHANG Jiangwei, DUAN Weiwei

(College of Agronomy, Hebei Agricultural University, State Key Laboratory of North China Crop Improvement and Regulation, Hebei Key Laboratory of Crop Growth Regulation, Baoding, Hebei 071001)

Abstract: In order to clarify the effect of layered fertilization on winter wheat yield, water consumption characteristics and water use efficiency under different irrigation conditions, and provide a theoretical basis for high-yield and high efficiency of wheat production practices in Huanghuaihai region, the split plot experiment with two factors of water and fertilizer was adopted combined with the local winter wheat irrigation system. In the experiment, water was taken as the main area, and the fertilization method was taken as the sub-area. Three irrigation treatments were set up, including no irrigation in spring (W_0), irrigation in spring jointing period (W_1), and spring jointing period irrigation + flowering stage irrigation (W_2), the irrigation amount was 90mm/time. Two fertilization treatments were conventional fertilization treatment (F_1) and layered fertilization treatment (F_2). The characteristics of winter wheat yield, water consumption and the water use efficiency under different irrigation and fertilization modes were analyzed. The results showed that compared with F_1 treatment, soil water consumption, water consumption intensity of winter wheat jointing to anthesis stage and farmland water consumption of 40—120 cm soil layer in F_2 treatment increased significantly, and farmland water consumption in W_2F_2 treatment was the highest. Compared with conventional fertilization, the water use efficiency of winter wheat in layered fertilization treatment increased by 14.2% ~ 3.0%, the water use efficiency of W_1F_2 treatment was the highest. Under the three irrigation conditions, compared with conventional fertilization, the number of ears per unit area, of winter wheat was significantly increased in the

layered fertilization treatment, and the yield increased by 19.8% ~ 6.4%, of which W₂F₂ treatment had the highest yield. Therefore, it was recommended that in areas with sufficient water, the management method of irrigation at spring jointing period and flowering stage combined with layered application of base fertilizer should be adopt, while in water shortage areas, the management method of spring irrigation at jointing stage combined with layered application of base fertilizer should be adopt.

Keywords: layered fertilization; irrigation; winter wheat; yield; water consumption characteristic; water use efficiency

黄淮海平原是我国重要的小麦产区,在保障国家粮食安全中起着举足轻重的作用^[1-2]。合理的水肥配置是提高作物产量的重要可控措施^[3-4]。近些年,为了追求高产,在农业生产过程中普遍存在过量施用肥料和施肥方式不合理的行为,造成资源浪费、环境污染等问题日益严重^[5]。同时,小麦生产主要依赖地下水资源,过量开采地下水导致大面积地下漏斗的出现,水资源的短缺成为该地区小麦生产发展的重要限制因子^[6]。如何利用有限的水分条件及不增加施肥量的前提下提高水肥利用效率,是摆在农业工作者面前严峻的问题。深层土壤剖面的养分缺乏,以及深层土壤水分的利用率低是影响小麦产量潜力发挥的重要原因^[7]。施肥位置对作物生长发育和产量有显著影响,与浅层施肥方式相比,肥料深施可以有效促进根系下扎,在一定程度上缓解养分水分的空间错位问题,有利于吸收和利用深层土壤养分和水分,从而提高产量及水分利用效率^[8-10]。但深层施肥可能由于在作物生长前期浅层土壤肥效不足而影响生长,导致出现苗弱的现象,进而影响作物后期生长及产量,为改善肥料在作物根部的空间分配更好的发挥肥效,提出分层施肥的方法^[11]。

前人^[12]研究表明,分层施肥的增产效果较单层浅层施肥与深层施肥效果更好,对盆栽玉米的研究^[13]表明,氮肥分层施用可以有效促进各土层脱氢酶活性、提高玉米干物质量与氮磷钾养分积累量,增产效果显著,也可以有效增加小麦籽粒产量与氮磷钾养分利用效率^[11]。在水浇地高产条件下,通过将底

肥按比例分层条施于土壤 8,16,24 cm 土层,可以有效优化养分在耕层中的分布,协调开花后干物质同化与营养器官临时储存干物质再分配,从而实现高产^[14]。另外,灌水对作物水分利用的影响也十分显著,并且与施肥方式之间存在显著的交互作用^[15],合理的灌溉有利于作物的生物量积累、产量、水分利用效率和旗叶净光合速率的提高^[16]。灌水可以补偿因施氮量不足导致的籽粒产量降低,而施氮过多对灌水的补偿效应较小^[17]。

目前关于分层施肥对冬小麦籽粒产量及水分利用的研究,大多集中于统一灌水条件下^[12-14],而在不同灌水条件下研究较少。本试验通过设置不同灌水条件,研究分层施肥方式对冬小麦产量和产量构成因素的影响,分析小麦生育期间耗水特性以及水分利用效率等的影响,为该地区农田冬小麦施肥方式及灌溉制度优化、提高作物水分利用效率提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验田基本情况

试验于 2018—2019 年和 2019—2020 年在河北省曲周县第四疃镇王庄村(115°13'E,36°57'N)进行,该地位于河北省南部太行山东麓海河平原的黑龙港流域,平均海拔 39.6 m,年均气温 13.6 ℃,年均降水量为 477.7 mm。试验田土壤为潮褐土,0—20 cm 土壤容重 1.42 g/cm³,有机质含量 10.5 g/kg,全 N 含量 1.15 g/kg,无机态氮含量 38.8 mg/kg,速效磷含量 53.7mg/kg,速效钾含量 180.7mg/kg,前茬均为夏玉米,收获后秸秆全部粉碎还田。2 年度冬小麦全生育期降雨量分布见图 1。

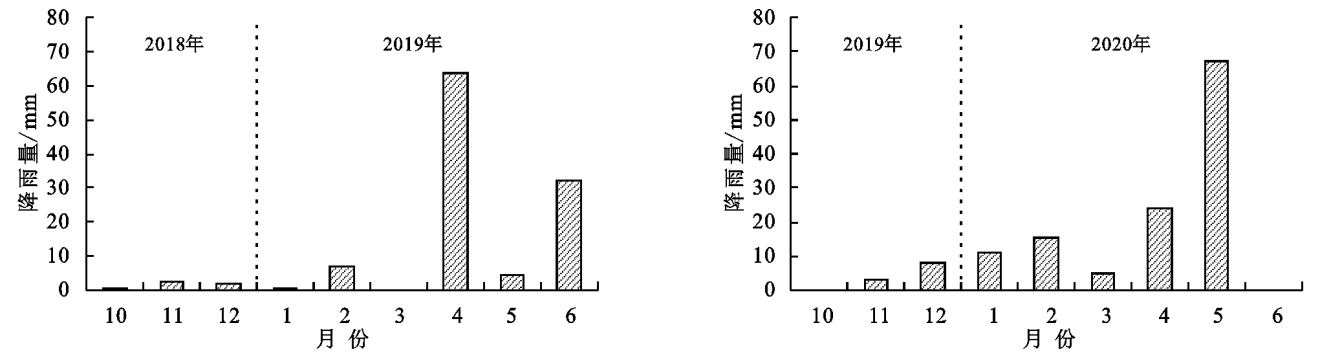


图 1 冬小麦生育期降雨分布

1.2 试验设计

试验品种为“济麦 22”，采用双因素裂区试验设计，主区为灌水(W)处理，副区为施肥(F)处理，设置 3 个灌水水平：春季不灌水(W₀)，春季拔节期灌水(W₁)、春季拔节期灌水+开花期灌水(W₂)；每次灌水 90 mm，3 个施肥方式处理：常规施肥处理(F₁)，底肥为复合肥，采用当地惯用施肥方式，撒施于土壤表面后，进行旋耕入土；分层施肥处理(F₂)，底肥中磷钾肥全部深施于土壤 30 cm 处，氮肥按照 5:5 的比例分别条施于 10 cm 与 30 cm 土层土壤，采用两肥异位分层施肥机施肥。F₁ 和 F₂ 施肥量均为推荐施肥量，为 N 210 kg/hm²，P₂O₅ 150 kg/hm²，K₂O 90 kg/hm²，其中氮肥为缓释尿素，磷肥为磷酸二铵，钾肥为氯化钾，氮肥基追比 7:3，追肥拔节期灌溉时施用。小区面积 60 m² (5 m×12 m)，3 个重复，不同处理间设置 1 m 隔离带。2018—2019 年试验于 10 月 16 日播种，2019 年 6 月 13 日收获，2019—2020 年试验于 2019 年 10 月 19 日播种，2020 年 6 月 9 日收获，基本苗为 520 万株/hm²。其他管理措施同常规农田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤水分测定 分别于冬小麦播前、拔节、开花与收获期用土钻取 0—200 cm 的土样，0—20 cm 土层每层 10 cm，20—200 cm 土层每层 20 cm，采用烘干法测定土壤质量含水量。

1.3.2 农田耗水量、土壤贮水消耗量和水分利用效率的计算 采用水分平衡法，农田耗水量计算公式^[17]为：

$$ET_a = I + P - R - F + \Delta W \quad (1)$$

式中：ET_a 为农田耗水量(mm)；I 为时段内灌水量(mm)；P 为时段内降水量(mm)；R 为地表径流量(mm)；F 为补给地下水量(mm)；ΔW 为生育阶段土壤贮水变化量(mm)。本试验地地势平坦，可视地表径流为零；地下水埋深 4 m 以下，可视为地下水补给量为零；R、F 值可以忽略不计。

土壤贮水消耗量(ΔW)计算公式^[17]为：

$$\Delta W = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i (\theta_{i1} - \theta_{i2}) \quad (2)$$

式中：i 为土层编号；n 为总土层数；γ_i 为第 i 层土层容重(g/cm⁻³)；H_i 为第 i 层土层厚度(cm)。θ_{i1} 和 θ_{i2} 分别为第 i 层土壤时段初和时段末的土壤质量含水量(%)。本试验中，土壤贮水消耗量的测定深度是 200 cm。

耗水模系数(%) = 某一生育阶段农田耗水量(mm)/生育期农田总耗水量×100%

水分利用效率(WUE)计算公式^[17]为：

$$WUE = GY / ET_a \quad (3)$$

式中：WUE 为籽粒水分利用效率(kg/(hm²·mm))；GY

为籽粒产量(kg/hm²)；ET_a 为农田耗水量(mm)。

灌水效益(IE)计算公式^[17]为：

$$IE = (GY_I - GY_N) / I \quad (4)$$

式中：IE 为灌水效益(kg/hm²/mm)；GY_I 为灌水处理产量(kg/hm²)；GY_N 为不灌水处理产量(kg/hm²)；I 为灌水量(mm)。

1.3.3 籽粒产量 冬小麦成熟后，每小区收获 1 m² 植株，折合成 12.5% 的水分计算产量，随机取 20 穗进行考种测定产量构成要素。

1.4 数据处理

运用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 22.0 软件对数据进行处理分析，差异显著性检验采用独立样本 T 检验法。

2 结果与分析

2.1 冬小麦产量及其构成

小麦的单产主要决定于单位面积穗数、穗粒数和千粒重 3 个方面。从表 1 可以看出，冬小麦产量在 2 年度处理之间有所差异，整体趋势保持不变，F₂ 在 2018—2019 年和 2019—2020 年 3 种灌水条件下冬小麦产量均高于 F₁，2 种施肥方式下均表现为 W₂ > W₁ > W₀ (p < 0.05)，2 年中籽粒产量最高的处理组合均为 W₂F₂ 处理，分别为 8 134.4, 9 210.1 kg/hm²。与 F₁ 相比，第 1 年 F₂ 处理的籽粒产量在 W₀、W₁、W₂ 处理下分别高出 850.4, 593.9, 487.9 kg/hm²，第 2 年分别为 1 045.3, 674.7, 727.3 kg/hm²。第 1 年增产率分别为 15.4%，8.4%，6.4%，均达到显著差异(p < 0.05)，平均增产 9.6%，随着灌水量的增加，增产幅度逐渐减小。第 2 年增产率分别为 19.8%，8.8%，8.6%，平均增产 12.4%，其中 W₁ 和 W₂ 情况下的增产率和增产量显著低于 W₀ 条件。从产量构成因素来看，穗数方面，F₂ 在不同灌水条件下的单位面积穗数都显著高于 F₁，2018—2019 年 W₀、W₁ 和 W₂ 条件下分别提高了 13.1%，5.9%，5.4%，平均提高了 7.7%，2019—2020 年在 W₀、W₁ 和 W₂ 条件下分别提高了 26.3%，12.9%，14.2%，趋势与产量类似。在第 1 年，F₂ 处理的穗粒数在 W₀、W₁ 和 W₂ 条件下较 F₁ 略微提升，但均未达到显著效果，在第 2 年，W₀ 条件下 F₂ 略低于 F₁，随着灌水增加，二者的穗粒数均有所提升，F₂ 的上升速率更高，在 W₂ 条件下二者无显著差异。F₁ 和 F₂ 处理的千粒重在 3 种灌水条件下无显著差异，2 年表现一致。

2.2 冬小麦 0—200 cm 土壤贮水消耗量

由表 2 可知，不同处理冬小麦土壤贮水消耗量在各个土层存在差异。0—40 cm 土层 2 种施肥处理的土壤贮水消耗在 2 年度 3 种灌水条件下均无显著差异。40—120 cm 土层中，F₂ 处理的土壤贮水消耗量

在 W_0 、 W_1 和 W_2 条件下均显著高于 F_1 , 2018—2019 年度分别高出 15.4%, 35.0%, 31.5%, 在 2019—2020 年度分别高出 25.4%, 63.4%, 50.0%。在 120—140 cm 土层中, 2018—2019 年度 W_0 条件下 F_1 和 F_2 处理间无显著差异, 在 2019—2020 年度 F_2 处理显著高于 F_1 处理, W_1 和 W_2 条件下二者无显著差异。在 140—200 cm 土层中, 2 年度 2 种施肥处理在 3 种灌水条件下均无显著差异。

表 1 不同处理冬小麦产量及其构成要素

年份	灌水	施肥	穗数/ ($10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数/ 粒	千粒重/ g	籽粒产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
2018—2019	W_0	F_1	474.0b	35.2a	38.9a	5520.1b
		F_2	536.0a	35.3a	39.7a	6370.5a
	W_1	F_1	577.0b	36.1a	39.7a	7029.7b
		F_2	611.0a	36.7a	40.0a	7623.6a
	W_2	F_1	643.7b	35.8a	39.0a	7646.5b
		F_2	678.7a	36.2a	39.0a	8134.4a
2019—2020	W_0	F_1	436.3b	35.5a	40.3a	5290.1b
		F_2	551.0a	33.2b	40.9a	6335.4a
	W_1	F_1	555.0b	38.0a	42.2a	7670.6b
		F_2	615.0a	36.4a	43.1a	8345.3a
	W_2	F_1	585.3b	38.0a	44.0a	8482.3b
		F_2	668.7a	37.9a	43.0a	9210.1a

注: W 为水分管理; F 为施肥方式。每个数据区内, 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

表 2 不同处理小麦 0—200 cm 各土层土壤贮水消耗量

年份	灌水	施肥	0—20 cm	20—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
2018—2019	W_0	F_1	16.9a	25.3a	24.4b	24.4b	23.8b	6.0b	3.8a	4.1a	2.0a	2.6a
		F_2	17.4a	26.0a	27.5a	26.6a	26.8a	9.7a	3.6a	4.2a	2.0a	0.4a
	W_1	F_1	15.8a	21.7a	13.7b	9.8b	12.6b	5.2b	3.4a	1.0a	2.0a	2.9a
		F_2	16.7a	21.7a	18.0a	12.6a	17.9a	7.3a	3.3a	1.0a	1.3a	2.6a
	W_2	F_1	15.8a	21.6a	13.6b	10.5b	11.9b	5.8b	2.0a	-0.8a	-0.7a	-2.3a
		F_2	15.8a	20.6a	17.2a	12.7a	16.2a	9.1a	1.5a	0.7a	-0.3a	-2.1a
2019—2020	W_0	F_1	23.4a	18.6a	16.1b	12.5b	12.3b	6.0b	4.7b	4.0a	2.2a	0.0a
		F_2	24.2a	18.6a	19.1a	15.1a	17.8a	6.7a	7.0a	3.8a	1.8a	1.9a
	W_1	F_1	17.0a	20.7a	5.9b	6.3b	8.0b	4.5b	7.1a	0.2a	-1.7a	-4.2a
		F_2	17.5a	19.9a	7.0a	13.7a	13.3a	6.3a	7.0a	0.0a	-2.0a	-3.9a
	W_2	F_1	5.6a	12.3a	3.7b	8.5b	7.5b	4.9b	3.4a	-1.3a	-4.9a	-4.2a
		F_2	6.0a	12.3a	4.7a	15.8a	10.0a	6.0a	3.1a	-1.0a	-3.4a	-3.6a

2.4 冬小麦生育期间耗水总量及其构成

由表 4 可知, 在 W_0 、 W_1 和 W_2 条件下, 2 年度的农田总耗水量与土壤水消耗量均表现为 $F_2 > F_1$, 在 F_1 与 F_2 施肥模式下均表现为 $W_2 > W_1 > W_0$ ($p < 0.05$), 其中耗水量最高的处理组合均为 $W_2 F_2$, 2 年度总耗水量分别为 474.0, 453.6 mm。与 F_1 相比, 2018—2019 年 F_2 在 W_0 、 W_1 和 W_2 条件下耗水量分别增加了 3.5%, 3.8%, 3.3%, 平均增加 3.5%, 2019—2020 年分别增加了 5.0%, 4.0%, 3.3%, 平均增加 4.1%, 仅在 2019—2020 年 W_0 条件下达到显著

2.3 冬小麦不同生育阶段耗水量、耗水模系数及日耗水量

由表 3 可知, 播种—拔节期, 在相同灌水条件下, 2 年度的 F_1 和 F_2 处理的阶段耗水量与日耗水量均无显著差异, 耗水模系数的表现年际间存在一定的差异, 2018—2019 年施肥处理之间差异不显著, 2019—2020 年表现为 W_0 条件下 F_1 显著高于 F_2 ($p < 0.05$), W_1 和 W_2 灌水条件下差异不显著; 相同施肥模式下, 3 种灌水条件下耗水模系数均表现为 $W_0 > W_1 > W_2$ ($p < 0.05$)。在拔节—开花期, 2 年度冬小麦的阶段耗水量、耗水模系数与日耗水量在 W_0 、 W_1 和 W_2 条件下均表现为 $F_2 > F_1$, 施肥方式对阶段耗水量影响显著, 耗水模系数与日耗水量在不同施肥方式之间无显著差异; 2018—2019 年, 与 F_1 相比, F_2 的阶段耗水量在 W_0 、 W_1 和 W_2 条件下分别提高 6.7%, 6.6% 和 6.6%, 平均高出 6.6%, 2019—2020 年, 分别增加 18.1%, 8.4% 和 11.2%, 平均高出 12.6%。在开花—成熟期, 2 年度试验 F_2 处理的阶段耗水量和耗水模系数在不同灌水条件下均高于 F_1 处理, 但未达到显著差异; 不同灌水条件下施肥方式对日耗水量的影响与阶段耗水量相似, 春季不灌水条件下, 日耗水量表现为 $F_2 > F_1$, 相同灌水条件下施肥处理之间无显著差异; 2 个试验年度表现一致。

水平。土壤水消耗量分别在第 1 年增加 12.5, 14.3, 15.1 mm, 平均增加 14.0 mm, 第 2 年分别增加 16.3, 15.2, 14.6 mm, 平均增加 15.4 mm, 均达到显著差异。随着灌水量增加, 灌水量占总耗水量的比例逐渐增高, 降雨与土壤贮水消耗量比例逐渐降低。在灌水和降水占总耗水比例方面, 2018—2019 年在 W_0 、 W_1 和 W_2 条件下施肥处理之间均表现为 $F_1 > F_2$, 差异未达显著水平, 2019—2020 年 W_0 条件下 F_2 显著低于 F_1 , 其他 2 种灌水条件下施肥处理之间无显著差异。2 年试验的土壤水消耗量占总耗水量的比值在不同灌水条件下均表现为 F_1 显著高于 F_2 。

表 3 不同处理冬小麦生育期间阶段耗水量、耗水模系数及日耗水量

年份	灌水	施肥	播种—拔节			拔节—开花			开花—成熟		
			CA/mm	CP/%	CD/mm	CA/mm	CP/%	CD/mm	CA/mm	CP/%	CD/mm
2018—2019	W ₀	F ₁	105.5a	31.5a	0.6a	125.5a	37.7a	5.0a	102.5a	30.8a	2.8a
		F ₂	104.7a	30.2a	0.6a	133.9a	38.7a	5.4a	107.4a	31.1a	2.9a
	W ₁	F ₁	111.9a	28.8a	0.6a	128.4b	33.9a	5.1a	140.3a	37.2a	3.8a
		F ₂	111.0a	27.7a	0.6a	136.9a	34.7a	5.5a	147.1a	37.3a	4.0a
	W ₂	F ₁	111.9a	24.1a	0.6a	128.4b	28.1a	5.1a	218.6a	47.9a	5.9a
		F ₂	111.0a	23.4a	0.6a	136.9a	28.9a	5.5a	226.2a	47.7a	6.1a
2019—2020	W ₀	F ₁	151.9a	47.0a	0.9a	78.8b	24.4b	2.6b	92.7a	28.6a	3.7a
		F ₂	152.3a	44.8b	0.8a	93.1a	27.4a	3.1a	94.3a	27.8a	3.8a
	W ₁	F ₁	139.2a	36.7a	0.8a	138.4b	36.8b	4.6b	99.7a	26.5a	4.0a
		F ₂	143.6a	36.5a	0.8a	150.1a	38.3a	5.0a	98.9a	25.3a	4.0a
	W ₂	F ₁	145.2a	33.1a	0.8a	135.9b	30.9b	4.5b	157.9a	36.0a	6.3a
		F ₂	141.9a	31.3a	0.8a	151.0a	33.3a	5.0a	160.6a	35.4a	6.4a

注:CA、CP 和 CD 分别为耗水量、耗水模系数和日耗水量;CA 为各生育阶段耗水量;CP=各生育阶段耗水量/总耗水量;CD=各生育阶段耗水量/生育阶段天数。

表 4 冬小麦耗水总量及其构成

年份	灌水	施肥	总耗	降水		灌水		土壤水	
			水量/mm	总量/mm	百分比/%	总量/mm	百分比/%	总量/mm	百分比/%
2018—2019	W ₀	F ₁	333.4a	112.6	33.8a	90	27.0a	130.8b	39.2b
		F ₂	346.0a	112.6	32.5a	90	25.7a	143.4a	42.2a
	W ₁	F ₁	380.7a	112.6	29.6a	180	47.2a	89.1b	23.3b
		F ₂	395.0a	112.6	28.5a	180	45.6a	102.4a	25.9a
	W ₂	F ₁	459.0a	112.6	24.5a	270	58.8a	76.4b	16.6b
		F ₂	474.0a	112.6	23.8a	270	57.0a	91.4a	19.2a
2019—2020	W ₀	F ₁	323.4b	133.7	41.3a	90	27.8a	99.7b	30.8b
		F ₂	339.7a	133.7	39.4b	90	26.5b	116.0a	34.2a
	W ₁	F ₁	377.3a	133.7	35.6a	180	47.9a	63.6b	16.9b
		F ₂	392.5a	133.7	34.1a	180	45.9a	78.8a	20.1a
	W ₂	F ₁	439.0a	133.7	30.5a	270	61.6a	35.3b	8.0b
		F ₂	453.6a	133.7	29.5a	270	59.5a	49.9a	11.0a

2.5 冬小麦水分利用效率

水分利用效率主要指作物消耗单位水量所产生的同化物的量,反映了作物生产过程中得到能量的转化效率。由表 5 可知,F₂ 处理在 3 种灌水条件下水分利用效率均高于 F₁,2 年度内 W₀、W₁ 和 W₂3 种条件下的水分利用效率均呈现先上升后下降的趋势,其中最高组合均为 W₁F₂,分别为 19.3,21.3 kg/(hm²·mm)。3 种灌水条件下,2018—2019 年 F₂ 处理的水分利用

效率在 W₀、W₁ 和 W₂ 条件下较 F₁ 分别高出 11.2%,4.5%,3.0%,平均高出 6.2%,在 W₀ 和 W₁ 情况下差异达到显著水平,2019—2020 年分别高出 14.2%,4.6%,5.0%,平均高出 7.9%,在 W₀ 条件下达到显著效果。2 年度内,F₂ 在 W₁ 和 W₂ 条件下的灌水效益均显著低于 F₁ 处理,2018—2019 年度在 2 种灌水条件下分别低 17.0%和 17.0%,2019—2020 年度分别低 15.6%和 20.6%,均达到显著水平。

表 5 不同处理下冬小麦水分利用效率

灌水	施肥	2018—2019 年		2019—2020 年	
		水分利用效率/	灌水效益/	水分利用效率/	灌水效益/
		(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
W ₀	F ₁	16.6b		16.4b	
	F ₂	18.4a		18.7a	
W ₁	F ₁	18.5b	16.8a	20.3a	26.5a
	F ₂	19.3a	13.9b	21.3a	22.3b
W ₂	F ₁	16.7a	11.8a	19.3a	17.7a
	F ₂	17.2a	9.8b	20.3a	16.0b

3 讨论

土壤深层贮水具有较高的生物有效性,增加深层土壤贮水的利用程度是提高作物生产潜力的重要途径^[18],深层施肥能够促进作物吸收深层水分和养分,提高水分利用效率^[9],王永华等^[19]研究表明,40—120 cm 土层是小麦深层根系的主要分布土层,是土壤水分消耗的蓄积的源和库。本研究表明, F_2 较 F_1 在 W_0 、 W_1 和 W_2 条件下在 40—120 cm 土壤贮水消耗均显著增加,并且随着灌水增加,提升幅度呈先上升后下降的趋势,说明相同灌水和施肥量条件下,分层施肥较常规施肥可以提高冬小麦对深层贮水的利用能力,可能的原因是分层施肥增加了土壤深层的养分分布,诱导了根系向土壤深层生长,缓解了水分和养分在空间上的错位问题^[9]。在一定范围内,冬小麦生育期间总耗水量越多,籽粒产量越高^[20],农田耗水量由降雨量、灌水量和土壤贮水消耗量组成,其中土壤水属于高效水,充分利用土壤水,减少灌溉水是节水生产、提高水分利用效率的核心^[21]。本研究表明,2 年度 F_2 的土壤贮水消耗量在不同灌水条件下均高于 F_1 ,说明分层施肥可以提高土壤贮水的利用能力,降低对灌水和降雨的依赖。冬小麦生育中后期阶段耗水量和日耗水量在 W_0 、 W_1 和 W_2 条件下均表现为 $F_2 > F_1$ ($p < 0.05$),说明分层施肥较常规施肥可以显著提高冬小麦拔节期至开花期的耗水强度,这可能是分层施肥影响了根系的建成造成的^[20-21]。另外,土壤贮水量受灌水和降雨的影响较大,2019—2020 年度小麦开花到成熟期间降雨较多,导致了成熟期各处理土壤贮水量仍保持较高的水平,土壤贮水量消耗较 2018—2019 年各处理显著降低。

水分利用效率是评价冬小麦栽培效益的重要指标,提高水分利用效率是实现作物高产高效的基础。已有研究^[22-23]表明,肥料分层深施可以影响作物不同器官生长发育与干物质的积累与形成,从而影响作物的水肥利用效率。本研究表明,在 W_0 、 W_1 和 W_2 条件下, F_2 的水分利用效率较 F_1 均高出 3.0%~11.2%,增幅最高为 W_0 条件,说明干旱条件下,分层施肥较常规施肥更利于提升水分利用的有效性。原因是干旱条件下,土壤表层水分较少深层水分含量较高,根系向水性和向肥性的相互促进,土壤贮水消耗量增加,水分利用效率增加^[24];随着灌水增加,土壤表层水分增加,促进作用减小,提升幅度逐渐减小, W_2 条件下差异不再显著。随着灌水增加,3 种施肥处理的冬小麦水分利用效率均表现为先升高后下降的趋势,与张素瑜等^[25]的研究结果相似,其中 2 年度最高均为 W_1F_2 处理,分别

为 19.3,21.3 kg/hm²/mm。可能的原因是 W_0 条件下,作物土壤耗水量较高,但是土壤贮水量在无补充的情况下,总耗水量较小,无法满足冬小麦整个生育期的水分需求,产量偏低,在 W_1 条件下,水分与肥料表现出明显的耦合效应,提高了作物产量,水分利用效率升高;在 W_2 条件下,土壤贮水消耗量减少,无效耗水增加,并且产量增加的幅度不能抵消耗水量的增加,降低了水分利用效率^[26-27]。

闫恒辉等^[12]研究了将底肥按照 1:2:3 的比例分别施入耕层 8,16,24 cm 深处,不仅促进了冬小麦分蘖成穗,获得较高的穗数,还显著提高了穗粒数和千粒重,达到了增产效果。本研究表明,在施肥量不变的情况下,分层施肥较常规施肥的小麦单位面积穗数,穗粒数和产量都不同程度变化,穗数的差异达到显著效果,与前人^[28]的研究结果相似。原因是分层施肥增加了小麦中后期的耗水强度、耗水量,利于保持生育中后期较高的光合能力和光合效率,增加地上部生殖器官和营养器官干物质的积累和形成^[11,14]。

本研究表明,随着灌水次数增加,常规施肥和分层施肥的冬小麦产量均表现逐渐升高趋势,但随着灌水量增加增产率逐渐降低。可能的原因:随着灌水量增加,土壤贮水消耗量逐渐下降,土壤表层的水分逐渐增加,而冬小麦根系在土壤深层的分布逐渐减少,对深层水分的利用逐渐降低,当土壤表层水分足够时,根系的向水性与向肥性从相互叠加逐渐转为相互冲突,增产率下降^[28]。因此,分层施肥相较传统施肥,在节水栽培条件下作用更显著。

4 结论

冬小麦底肥采用分层施用的方式可以有效增加冬小麦在 40—120 cm 土层的贮水消耗量,以及冬小麦拔节—开花期的阶段耗水量,增加冬小麦生育期的农田耗水量,其中以 W_2F_2 处理农田耗水量最高,2 试验年度分别为 474.0,453.6 mm。分层施肥冬小麦水分利用效率较常规施肥增加 11.2%~3.0%,其中均以 W_1F_2 处理最高,2 年分别为 19.3,21.3 kg/hm²/mm。在 3 种灌水情况下,分层施肥处理较常规施肥显著增加了冬小麦单位面积穗数,产量增加 19.8%~6.4%,其中 W_2F_2 产量最高,2 年度分别为 8 134.4,9 210.1 kg/hm²。因此,建议在水分充足地区,采取小麦春季灌溉拔节水和开花水结合底肥分层施用的管理方式;在水资源短缺地区,采取小麦春季灌溉拔节水结合底肥分层施用的方式。

参考文献:

[1] 陈印军,易小燕,方琳娜,等.中国耕地资源与粮食增产

- 潜力分析[J].中国农业科学,2016,49(6):1117-1131.
- [2] 李明辉,周玉玺,周林,等.中国小麦生产区域优势度演变及驱动因素分析[J].中国农业资源与区划,2015,36(5):7-15.
- [3] Wang Y, Chi S Y, Ning T Y, et al. Coupling effects of irrigation and phosphorus fertilizer applications on phosphorus uptake and use efficiency of winter wheat [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(2): 263-272.
- [4] 黄东风,李卫华,王利民,等.水肥管理措施对水稻产量、养分吸收及稻田氮磷流失的影响[J].水土保持学报, 2013, 27(2): 62-66.
- [5] 谭德水,刘兆辉,江丽华.中国冬小麦施肥历史演变及阶段特征研究进展[J].中国农学通报,2016,32(12):13-19.
- [6] 吴炳方,闫娜娜,曾红伟,等.节水灌溉农业的空间认知与建议[J].中国科学院院刊,2017,32(1):70-77.
- [7] 马爱平,亢秀丽,靖华,等.旱地冬小麦茬口、种植模式对土壤贮水、耗水及水分利用效率的影响[J].水土保持学报, 2015, 29(2): 168-171.
- [8] 杨云马,孙彦铭,贾良良,等.磷肥施用深度对夏玉米产量及根系分布的影响[J].中国农业科学,2018,51(8): 1518-1526.
- [9] 刘威,周剑雄,谢媛圆,等.控释尿素不同条施深度下鲜食玉米产量和氮素利用效应[J].水土保持学报,2018,32(1):246-251,258.
- [10] 段文学,于振文,石玉,等.施氮深度对旱地小麦耗水特性和干物质积累与分配的影响[J].作物学报,2013,39(4):657-664.
- [11] 梁海,陈宝成,韩慧芳,等.普通肥、控释掺混肥分层施肥对小麦生长的影响[J].水土保持学报,2018,32(4): 240-245.
- [12] 闫恒辉,温樱,王东.底肥分层条施对冬小麦旗叶衰老和光合特性、籽粒产量和肥料利用率的影响[J].中国农业科学,2019,52(5):813-821.
- [13] 马阳,吴敏,刘晓明,等.夏玉米根系活性、养分吸收和产量对不同施肥方式的响应[J].中国土壤与肥料,2020(5):95-100.
- [14] 温樱,王东.底肥分层条施提高冬小麦干物质积累及产量[J].植物营养与肥料学报,2017,23(5):1387-1393.
- [15] 王鹏勃,李建明,丁娟娟,等.水肥耦合对温室袋培番茄品质、产量及水分利用效率的影响[J].中国农业科学, 2015, 48(2): 314-323.
- [16] 马富举,杨程,张德奇,等.灌水模式对冬小麦光合特性、水分利用效率和产量的影响[J].应用生态学报, 2018, 29(4): 1233-1239.
- [17] 黄玲,杨文平,胡喜巧,等.水氮互作对冬小麦耗水特性和氮素利用的影响[J].水土保持学报, 2016, 30(2): 168-174.
- [18] 王远远,乔露,陈宗奎,等.土壤深层水和施肥深度对棉花生长发育及水分利用效率的影响[J].西北农业学报, 2018, 27(6): 812-818.
- [19] 王永华,王玉杰,冯伟,等.两种气候年型下不同栽培模式对冬小麦根系时空分布及产量的影响[J].中国农业科学,2012,45(14):2826-2837.
- [20] 苏志峰,宗毓铮,杨珍平,等.当年肥料深施对生土棉花根—冠—土系统建成的影响[J].水土保持学报,2016, 30(1):218-224.
- [21] 于晓芳,高聚林,叶君,等.深松及氮肥深施对超高产春玉米根系生长、产量及氮肥利用效率的影响[J].玉米科学,2013,21(1):114-119.
- [22] 宫宇,段巍巍,王贵彦,等.缓释肥分层底施对夏玉米生长、干物质积累和产量的影响[J].河南农业科学,2019, 48(10):41-46.
- [23] 马阳,吴敏,郭献彬,等.新型耕作施肥方式下夏玉米田土壤水分分布和磷素利用研究[J].水土保持学报, 2019, 33(2): 98-102.
- [24] 康利允,李世清.分层供水施肥对冬小麦生长及水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2012,45(1):85-92.
- [25] 张素瑜,王和洲,杨明达,等.水分与玉米秸秆还田对小麦根系生长和水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2016,49(13):2484-2496.
- [26] 康利允,沈玉芳,岳善超,等.不同水分条件下分层施磷对冬小麦根系分布及产量的影响[J].农业工程学报, 2014, 30(15): 140-147.
- [27] 沈玉芳,李世清.施肥深度对不同水分条件下冬小麦根系特征及提水作用的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(4):65-73.
- [28] 夏光利,毕军,史桂芳,等.分层施肥对冬小麦产量及氮素效应的影响研究[J].山东农业科学,2016,48(1):72-74,78.
- [29] 彭玉,孙永健,蒋明金,等.不同水分条件下缓/控释氮肥对水稻干物质质量和氮素吸收、运转及分配的影响[J].作物学报,2014,40(5):859-870.