

新型有机无机复合肥对冬小麦产量及关键期生长的影响*

周立峰^{1,3} 冯浩^{1,2**}

(1. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所 杨凌 712100; 3. 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 合理灌溉和施用肥料是实现冬小麦节水增产增效的关键,本研究选用“小偃22号”小麦品种,通过田间试验,于2009~2010年研究了不同施用量新型有机无机复合肥(SAF)对冬小麦农田关键期土壤剖面含水量以及作物生长与产量的影响。结果表明:1)各SAF处理较常规施肥(NF)增产在10%~30%之间;随着灌水量的增大,SAF最佳施肥量也随之增大,3种灌水处理中,理论最大产量出现在灌1水处理中,为8894.11 kg·hm⁻²,此时对应的SAF施肥水平为1350 kg·hm⁻²。2)小麦拔节初期,SAF处理土壤剖面含水量从表层到深层呈现缓慢减小再持续增大的“V”型分布,而常规施肥处理则呈现为减小-增大-再减小-再增大的“W”型分布;在小麦灌浆期,SAF处理土壤剖面含水率的峰、谷值的深度均深于常规施肥处理。3)小麦分蘖期,SAF处理使小麦植株相对低矮,根相对粗短,这种趋势随着肥料施量的增大越发明显。在灌浆期,中SAF处理植株最为低矮,而穗重及地上干物质量最大;小麦灌浆速率差异主要表现在中SAF处理的小麦灌浆速率明显高于其余处理。上述结果表明:SAF使土壤垂直剖面含水率峰、谷值出现的位置更深;SAF处理的灌浆速率高于常规施肥处理,相比常规施肥处理,SAF处理可使作物在低灌水条件下(拔节期灌水60 mm)更好地实现最优产量。

关键词 新型有机无机复合肥 冬小麦 土壤含水率 植株形态 灌浆速率 产量
中图分类号: S156.2 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2012)01-0013-06

Effects of soil fertilizer amendment on growth during critical growth stages and yield of winter wheat

ZHOU Li-Feng^{1,3}, FENG Hao^{1,2}

(1. Research Center for Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Reasonable irrigation and fertilization are key factors of winter wheat production. Field experiments were conducted in 2009~2010 with “Xiaoyan 22” as materials. The effects of soil fertilizer amendment (SFA) on water content along soil profile and growth at critical growth stages and yield of winter wheat were investigated. The results show that yield under SFA treatments was 10%~30% higher than that under normal fertilization (NF) treatment. Optimum SFA increased with increasing irrigation amount. Theoretical maximum yield was 8894.11 kg·hm⁻², which was under single irrigation with 1350 kg·hm⁻² SFA. At the start of jointing stage, soil water content under SFA treatments initially increased steadily and then slowly decreased in a V-shaped distribution curve from surface to deep layer along soil profile, quite different from the W-shaped distribution curve under NF treatment. At grain-filling stage, the depth of max and min soil moisture content under SFA occurred much deeper than that under NF treatment. At tillering stage, plants under SFA treatments were low with relatively thick and short roots. This trend was more obvious at higher fertilizer application rates. At grain-filling stage, however, plant height was lowest, spike dry-matter and dry-weight of aboveground part were highest under middle SAF treatment. In the middle of SFA treatment, wheat filling rate was significantly higher than that under all other treatments. Thus SFA deepened the position of max and min soil moisture content along soil profile. Wheat growth rate under SFA was higher than under NF treatment. SFA treatment facilitated optimal production in low water conditions (jointing stage irriga-

* “十二五”国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA100503)和中央高校基本科研业务费专项资金资助

** 通讯作者: 冯浩(1970—),男,研究员,主要研究方向为水土资源高效利用。E-mail: nercwsi@vip.sina.com

周立峰(1986—),男,硕士研究生,主要研究方向为水土资源高效利用。E-mail: lee86208@126.com

收稿日期: 2011-03-25 接受日期: 2011-07-29

tion of 60 mm) than NF treatment.

Key words Soil fertilizer amendment, Winter wheat, Soil water content, Plant morphology, Grain-filling rate, Yield
(Received Mar. 25, 2011; accepted Jul. 29, 2011)

我国中低产田土壤面积约占耕地面积的 2/3, 化肥、农药、种子、除草剂、农机等的应用消除了很多作物生长障碍因子, 农作物产量大幅度提高, 但土壤地力的改善和提高进展缓慢。一些地区随着农业集约化程度提高, 有机肥施用减少, 土壤结构恶化加剧, 动摇了农业可持续发展的基础。土壤是接受、蓄存、转移水分和养分的载体, 调节和改善土壤综合性状^[1-3], 实现土壤水库扩蓄增容以及养分平衡是提高农田水肥利用效率的重要途径, 对解决我国粮食安全, 完成 2020 年新增粮食 500 亿公斤意义重大。姜灿烂等^[4]指出长期施用有机肥有利于改善旱地红壤团聚体结构与稳定性。刘睿等^[5]指出, 有机肥料是改善土壤理化性质的重要物质, 对提高土壤肥力、作物产量和品质及增强作物抗逆性具有相当重要的作用。秦嘉海等^[6]研究表明, 与不施肥处理相比, 有机无机垃圾复混肥处理小麦穗数、穗粒数、千粒重、产量分别增加 17 万穗·hm⁻²、8.73 粒、7.24 g、1.53 t·hm⁻², 增产率达 31.23%。张辉等^[7-9]研究表明, 施用生物有机无机复合肥可提高冬小麦产量, 比化肥处理高 11.73%~105.80%, 差异极显著。此外, 施用生物有机无机复合肥可以促进植株生长发育, 提高产量, 改善作物品质^[10]。马俊永等^[11]研究表明单施秸秆肥和单施化肥均有显著的增产效应, 而化肥的增产幅度远远大于秸秆肥, 有机-无机结合的增产幅度在同等施肥量下较单独施用秸秆或化肥的产量都要高。张兰松等^[12]研究结果表明, 与施用等养分的有机肥或等养分的化肥相比, 有机肥与化肥配合施用均可明显增加小麦产量, 且有机与无机肥料养分量(主要养分)相等时, 可实现产量的最大值。单独施用有机肥土壤有机质含量最高, 但有机无机复合度最低, 小麦产量也最低; 当与化肥配合施用, 有机无机复合度和产量明显提高。可见, 在评价土壤肥力的高低时, 必须同时考虑土壤有机质含量和土壤有机无机复合度。刘广军等^[13]研究表明, 在小麦上用 750 kg·hm⁻² 有机肥作基肥 1 次施入, 拔节期配施 150 kg·hm⁻² 尿素, 可较常规施肥增加产量 648.0 kg·hm⁻², 增加效益 630.96 元·hm⁻²。王珍等^[14-17]从发展现代节水农业角度, 将改良土壤结构与平衡土壤养分结构统筹考虑, 用自主研发的“土壤水库扩蓄增容制剂”与单质化学肥料复混, 制粒加工成新型有机无机复合肥。研究表明该肥具有改良土壤结构, 抑制棵间无效蒸发, 提高作物产量与水分利用效率的作用。本研究利用该新型有机无机复合肥, 在前期研究的基础上, 利用两年田间试验, 进一步研究了新型有机无机复合肥不同配方和施用量对冬小麦产量及关键期生长的影响, 为新型有机无机复合肥配方的进一步优化提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地基本情况及试验设计

试验于 2009 年 10 月至 2010 年 7 月在陕西省杨凌西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室灌溉试验站进行。该试验站位于东径 108°24', 北纬 34°20', 海拔 521 m, 属暖湿带季风半湿润气候区。站内地形平整, 土层深厚, 土壤质地为中壤土, 1 m 土层的平均田间持水量为 23%~25%, 凋萎含水量为 8.5%(以上均为重量含水量), 平均干容重为 1.44 g·cm⁻³。该站属渭河三道台塬地区, 全年无霜期 221 d, 降水量多集中在 7—10 月, 地下水埋深大于 5 m, 其向上补给量可以忽略不计。

选定小麦品种为“小偃 22 号”, 供试新型有机无机复合肥(SAF)由页岩、油渣、沸石粉、尿素、磷酸二氢钾和磷酸二铵复合造粒制成, 其养分含量分析结果表明, 有机质为 258.8 g·kg⁻¹, 全氮 145.3 g·kg⁻¹, 全磷(P₂O₅) 124.3 g·kg⁻¹, 全钾(K₂O) 50.2 g·kg⁻¹。

2009—2010 年进行裂区试验: 主区为灌水处理, 设 3 个水平(不灌水、灌 1 水和灌 2 水, 每次灌水量相同, 均为 60 mm); 裂区为施肥处理, 设常规化肥处理(NF, 尿素 450 kg·hm⁻² 与磷酸氢二铵 450 kg·hm⁻²)与不同 SAF 施用量(450 kg·hm⁻²、900 kg·hm⁻²、1 350 kg·hm⁻²、1 800 kg·hm⁻² 和 2 250 kg·hm⁻²)共 6 个水平, 施肥各处理的 N、P、K 施用量见表 1。施肥方式均为基肥一次施入。每处理设 3 个重复, 每小区面积 12 m²。

1.2 取样及测定方法

灌水量及土壤水分的测定: 根据水泵出水流量及灌水时间控制每次灌水量, 水管直接通至各小区。用德国产 TRIME 水分测定仪分层测定每个生育期表层至 1.8 m 的土壤含水率, 表层 0~30 cm 的土壤含水率用烘干法校正。

产量测量与计算: 小麦成熟后各小区单收称重, 每小区随机割取 1 m² 进行考种, 调查有效穗数、每穗麦粒数、结实率和千粒重。

灌浆速率测量: 在小麦扬花期选取开花时间一致、长相基本相同的主茎挂牌定穗。花后 1 周开始取样, 每 4 d 观察 1 次, 每处理每次取样 10 穗带回室内。每穗取中部 5 小穗第 1、2 位小花的籽粒 10 粒即 100 粒作为强势粒; 中部 5 小穗其余小花的籽粒作为弱势粒, 并计数以便折合千粒重。105 °C 杀青 15 min, 75 °C 烘干至衡重, 称重^[18]。

降水等气象资料: 由西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室灌溉试验站提供。

2009 年 10 月至 2010 年 7 月小麦生长季总降雨量 247.5 mm, 总积温 2 209 °C。由图 1 可以看出, 该年气候雨热同期明显, 降雨明显分布在小麦生长后期。

采用 Excel 及 SPSS 统计分析软件对试验数据进行处理和分析。

2 结果与分析

2.1 新型有机无机复合肥对冬小麦拔节、灌浆期耗水及生长的影响

2.1.1 对冬小麦拔节期及灌浆期土壤含水率的影响
为便于分析, 将 SAF450 与 SAF900 处理合并后求平均值, 作为低 SAF 处理; 将 SAF1350 和 SAF1800 处理合并后求平均值, 记为中 SAF 处理; SAF2250 处理则为高 SAF 处理; 常规施肥不变。

小麦拔节初期(图 2a), NF 处理与高 SAF 处理 0~20 cm 土壤含水率为 16% 左右, 明显高于中 SAF 和低 SAF 处理的 13% 左右; 20~60 cm 土层, NF 与高 SAF 处理土壤含水率急剧下降, 由 16% 下降至 12% 左右, 而低 SAF 和中 SAF 处理则略有下降, 基本维持在 12%~13%, 至 60 cm 处, NF 与高 SAF 处理土壤含水率已低于中 SAF 和低 SAF 处理; 60~100 cm, 各 SAF 处理土壤含水率以大致相同的幅度上升, 而 NF 处理土壤含水率上升幅度大于各 SAF 处理; 100 cm 以下土层各 SAF 处理土壤含水率继续上升, 而 NF 处理土壤含水率则先降后升, 且总低于各 SAF 处理。由试验结果可知在小麦拔节初期, SAF 处理土壤剖面含水率从表面到深处呈现缓慢减小再持续增大的“V”型分布, 而 NF 则呈减小-增大-再减小-再增大的“W”型分布。

小麦灌浆期土壤各层含水率变化较简单(图 2b), 由于此时降雨较多, 故各施肥处理表土含水率均很高, 均在 20%~23% 之间, 但从表土到 20 cm 土层,

土壤含水率急速下降, 高 SAF 处理该层土壤含水率下降 2.5% 左右, 其余处理下降 4% 左右。20 cm 以下土层, SAF 处理各土层含水率均大于 NF 处理: 20~80 cm 土层, 各 SAF 处理平均土壤含水率比 NF 处理高 1.81%, 80~160 cm 土层则高 2.43%。各施肥处理垂直土层含水率变化趋势一致, 均呈增大、减小交互出现的规律: 20 cm 以下, NF 处理与 SAF 处理第 1 个土壤含水率最高点分别出现在 50 cm 和 30 cm 处, 第 2 个土壤含水率最高点分别出现在 100 cm 和 140 cm 处; 各处理第 1 个土壤含水率最低点均出现在 80 cm 处, NF 处理第 2 个土壤含水率最低点出现在 120 cm 处, 而各 SAF 处理直到 160 cm 也未出现土壤含水率最低点。

2.1.2 对冬小麦苗期及灌浆期生长的影响

为探究 SAF 对小麦分蘖及灌浆这两个关键生长期生长的影响, 结合以往研究^[13-16], 在小麦分蘖期通过研究植株的株高与茎粗之比、地上部分与主根长度之比(L_{UD})、地上部分鲜重与高度之比(P_{WL})以及根物质鲜重与主根长度之比(R_{WL}), 在灌浆期通过研究株高与茎粗之比、穗重以及地上部分干物质重, 分别对这两个时期小麦的形态及生长进行研究。

由表 2 可以看出: 在分蘖期, 各施肥处理株高与茎粗之比差异明显, NF 与低 SAF 处理植株株高/茎粗值较大, 植株呈细高形态, 而高 SAF 处理则相对低矮; 各施肥处理的 P_{WL} 差异不大, 但 R_{WL} 差异较明显, 表现为中 SAF 处理 R_{WL} 值最大, 其次为高、低 SAF 处理, 常规施肥的 R_{WL} 值最小, 这是因为 NF 处理的 L_{UD} 值明显小于各 SAF 处理, NF 处理植株的

表1 试验各施肥处理的施肥量和N、P、K养分含量

Table 1 Fertilization rates and contents of nutrients N, P, and K of different fertilizer treatments

SAF水平 SAF level	施肥处理 Fertilizer treatment	肥料种类 Fertilizer type	施肥量 Fertilization rate (g·hm ⁻²)	养分含量 Nutrient content (g·kg ⁻¹)		
				N	P	K
	常规施肥 (NF)	尿素 Urea	450			
	Normal fertilizer treatment	磷酸二氢铵 Ammonium dihydrogen phosphate	450	32.00	10.57	0
低 Low	SAF450	新型有机无机复合肥 Soil fertilizer amendment	450	6.54	3.15	1.87
	SAF900	新型有机无机复合肥 Soil fertilizer amendment	900	13.08	6.30	3.74
中 Middle	SAF1350	新型有机无机复合肥 Soil fertilizer amendment	1 350	19.62	9.45	5.61
	SAF1800	新型有机无机复合肥 Soil fertilizer amendment	1 800	26.16	12.60	7.48
高 High	SAF2250	新型有机无机复合肥 Soil fertilizer amendment	2 250	32.70	15.75	9.35

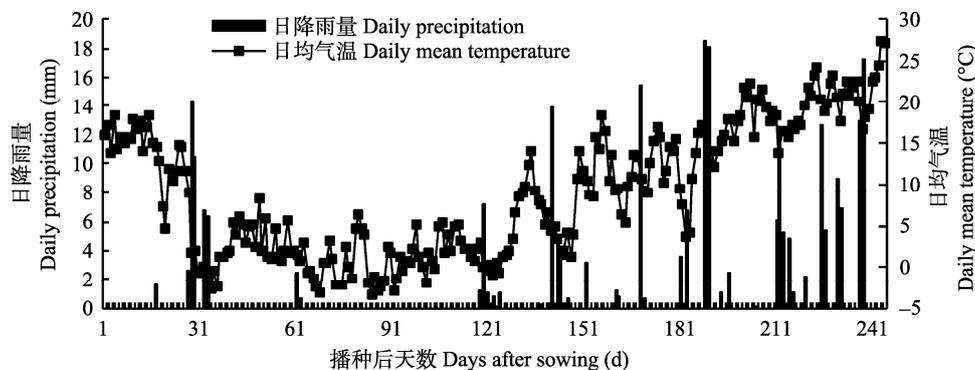


图1 2009—2010年冬小麦全生育期气温与降雨分布

Fig. 1 Temperature and rainfall distribution during the whole growth stage of winter wheat from 2009 to 2010

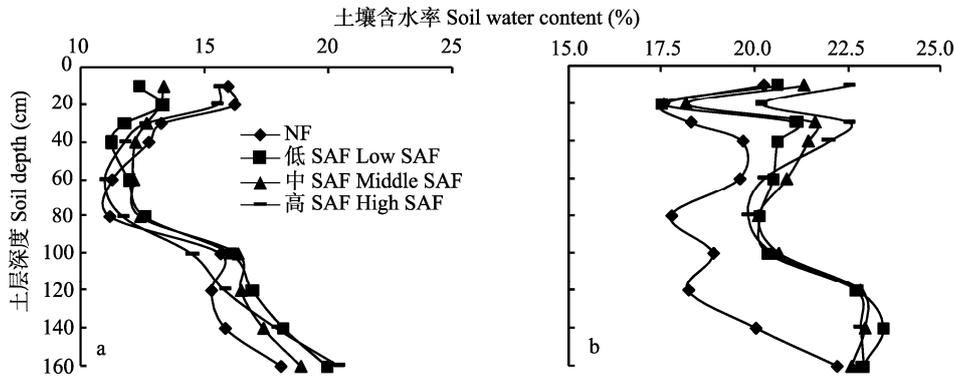


图 2 不同施肥处理冬小麦拔节初期(a)和灌浆期(b)土壤含水率的变化

Fig. 2 Soil water contents at beginning of jointing stage (a) and filling stage (b) of winter wheat under different fertilizer treatments

表 2 不同施肥处理分蘖期及灌浆期冬小麦形态及生长情况

Table 2 Morphology and growth of winter wheat at tillering and filling stages under different fertilizer treatments

SAF水平 SAF level	施肥处理 Fertilizer treatment	分蘖期 Tillering stage				灌浆期 Filling stage		
		株高/茎粗 P.H/S.D	P_{WL} ($g \cdot m^{-1}$)	R_{WL} ($g \cdot m^{-1}$)	L_{UD}	株高/茎粗 P.H/S.D	穗重 Spike weight (g)	地上干物质重 Above-ground dry mass (g)
低 Low	NF	104.74b	3.39a	0.61e	2.71d	188.18a	5.54c	9.29d
	SAF450	111.69a	2.70b	1.03d	4.75c	180.86b	6.87b	10.80c
	SAF900	109.44ab	2.68b	1.21c	4.25c	184.71ab	7.75ab	13.34ab
中 Middle	SAF1350	87.53c	3.03ab	2.43a	6.01b	171.89c	8.31a	13.76a
	SAF1800	75.38d	3.56a	2.21b	6.78a	170.43c	7.18b	11.97c
高 High	SAF2250	78.37d	3.59a	2.19b	6.76a	190.01a	5.66c	10.24cd

P.H/S.D: Plant height/stem diameter; P_{WL} : 地上部分鲜重与长度之比 Weight of aboveground/length of aboveground; R_{WL} : 根物质鲜重与主根长度之比 Weight of root/length of root; L_{UD} : 地上部分与主根长度之比 Length of aboveground/length of underground.

根细长, 而 SAF 则可使作物的根发育得短而粗。灌浆期, 各处理株高与茎粗之比不同于分蘖期, 这一时期中 SAF 处理植株株高/茎粗较小, 该时期各施肥处理株高差异不大, 茎粗是决定株高/茎粗的主要因素, 此时期中 SAF 处理的茎粗较其余处理大 0.20~0.35 mm。该时期 SAF 处理的穗重显著大于 NF 处理, 穗重值在 SAF1350 处理达到最大, 并随着 SAF 施用量的逐渐增大或减小而显著变小; 地上干物质质量的变化趋势同穗重。

2.1.3 对冬小麦灌浆速率的影响

从图 3 可以看出, 5 月 18 日之前, 高 SAF 处理的小麦灌浆速率小于其余各处理, 而各处理小麦灌浆速率差异主要出现在 5 月 18 日以后: 此时进入快速灌浆期, 中 SAF 处理小麦灌浆速率明显高于其余处理, 至 6 月 4 日其籽粒千粒重较其余处理高 2.7~4.4 g。

2.2 新型有机无机复合肥对冬小麦产量的影响

试验结果表明: 3 种灌水条件下, SAF 处理小麦产量均显著大于常规施肥处理^[19-22](表 3); 小麦产量随 SAF 施用量的增大呈先增加后减少的二次线性关系(表 4), 这可能是因为 SAF1800 处理对应的无机组分化肥含量已达到 NF 的水平, 施肥量太大导致其对作物生长产生负作用所致^[23-24]。对 3 个灌水条件下冬小麦产量与施肥量的回归方程进行求解得出, 在不灌水、灌 1 水和灌 2 水条件下的产量最佳施肥水平分别为 1 267.11 $kg \cdot hm^{-2}$ 、1 263.88 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 1 330.71 $kg \cdot hm^{-2}$, 其对应的理论最大产量分别为 8 662.62 $kg \cdot hm^{-2}$ 、8 894.11 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 8 565.94

$kg \cdot hm^{-2}$ 。

3 讨论与结论

小麦拔节初期, 新型有机无机复合肥处理土壤剖面含水率从表层到深层呈缓慢减小再持续增大的“V”型分布, 而常规施肥处理则呈减小-增大-再减小-再增大的“W”型分布; 在小麦灌浆期, 新型有机无机复合肥相比于常规施肥处理使农田土壤对外界水的响应速度变慢, 土壤垂直含水率的峰值与谷值均推迟。一般情况下, 土壤结构改良剂会使土壤的吸水能力增强、饱和含水率增大、释水能力减小^[25]。

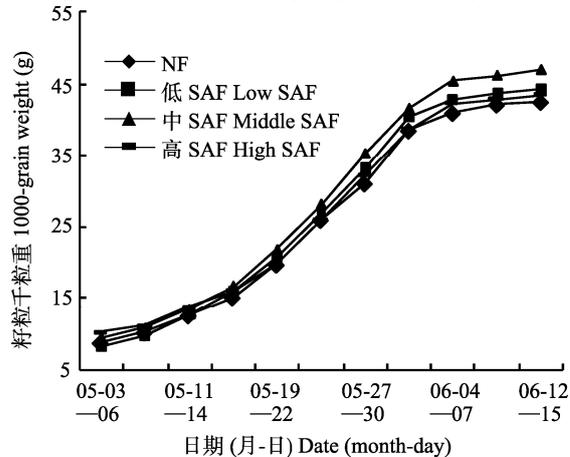


图 3 不同施肥处理冬小麦籽粒千粒重增长曲线

Fig. 3 Increasing curve of 1000-grain weight of winter wheat under different fertilizer treatments

表 3 2009—2010 年不同灌水及施肥处理下的冬小麦产量
Table 3 Yields of winter wheat from 2009 to 2010 under different irrigation and fertilizer treatments

SAF水平 SAF level	施肥处理 Fertilizer treatment	不灌水 No irrigation		灌 1 水 Irrigation once		灌 2 水 Irrigation twice	
		产量	增产	产量	增产	产量	增产
		Yield (kg·hm ⁻²)	Yield increase (%)	Yield (kg·hm ⁻²)	Yield increase (%)	Yield (kg·hm ⁻²)	Yield increase (%)
低 Low	NF	6 834.51d	—	6 935.44e	—	6 725.27d	—
	SAF450	8 088.60c	18.35	7 855.66d	13.27	7 698.26c	14.47
	SAF900	8 450.90b	23.65	8 628.95b	24.42	8 212.37b	22.11
中 Middle	SAF1350	8 827.85a	29.17	9 149.57a	31.93	8 526.60a	26.78
	SAF1800	8 341.93b	22.06	8 410.30c	21.27	8 421.15ab	25.22
高 High	SAF2250	7 875.87c	15.24	7 606.61d	9.68	7 430.26c	10.48

表 4 不同灌水条件下各施肥量与产量的函数关系
Table 4 Functional relationships between yields and fertilizer application rates under different irrigation amount

灌水处理次数 Irrigation treatment	回归方程 Regression equation	R ²	最佳施肥量 Optimum fertilizer rate (kg·hm ⁻²)	最大理论产量 Theoretical maximum yield (kg·hm ⁻²)
不灌水 No irrigation	$y = -0.000 9x^2 + 2.280 8x + 7 217.6$	0.915 9	1 267.11	8 662.62
灌 1 水 Irrigation once	$y = -0.001 6x^2 + 4.044 4x + 6 338.3$	0.951 9	1 263.88	8 894.11
灌 2 水 Irrigation twice	$y = -0.001 2x^2 + 3.193 7x + 6 441.0$	0.946 7	1 330.71	8 565.94

小麦拔节期是高耗水期, 根际土壤含水率对此时期小麦生长至关重要^[26-27], 而中 SAF 和低 SAF 处理下的土壤剖面水分布有利于该层土壤水分的保持与供给, 这对提高冬小麦水分利用效率有重要意义。

在灌浆期, 中 SAF 处理植株最为低矮, 高、低 SAF 处理相对较为细高, 常规施肥处理最为细高; 此时期新型有机无机复合肥处理的穗重显著大于常规施肥处理, 其中 SAF1350 处理穗重为最大, 并随着新型有机无机复合肥施用量的逐渐增大或减小而显著变小, 地上干物质量的变化趋势同穗重; 小麦灌浆速率差异主要表现在中 SAF 处理的小麦灌浆速率明显高于其余处理, 这可能是由于此处理在灌浆期植株茎较粗所致^[28-29]。

SAF 处理小麦产量均显著高于常规施肥处理^[16-19], 谷洁等^[19]对有机无机复合肥进行冬小麦田间试验, 结果表明, 有机无机复合肥可以促进冬小麦分蘖, 改善冬小麦产量结构, 提高冬小麦产量 756.0~901.5 kg·hm⁻², 本研究结论与其大致相同。此外, 本研究还表明: 随着灌水量的增大, 取得最大产量的施肥水平有增大趋势, 这与曹永强等^[30]的试验结论一致。不灌水与灌 1 水取得最大产量的施肥水平差异不大, 可能是由于该年小麦生长季降水较多, 弱化了不同灌水之间的差异所致。SAF1350 处理含氮量仅为常规施肥的 1/2, 但其小麦产量较常规施肥处理高 30%左右, 氮素利用效率极显著高于常规施肥。

参考文献

- [1] Haynes R J, Naidu R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: A review[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 51(2): 123-127
- [2] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in ultisols from subtropical China[J]. *Geoderma*, 2001, 99(1/2): 123-145
- [3] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. *Geoderma*, 2005, 124(1/2): 3-22
- [4] 姜灿烂, 何园球, 刘晓利, 等. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响[J]. *土壤学报*, 2010, 47(4): 715-722
- [5] 刘睿, 王正银, 朱洪霞. 中国有机肥料研究进展[J]. *土壤中国肥料科学*, 2007, 23(1): 310-313
- [6] 秦嘉海, 刘金荣, 谢晓蓉, 等. 有机无机垃圾复混肥对土壤理化性质与小麦产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(3): 40-42
- [7] 张辉, 李维炯, 倪永珍. 生物有机无机复合肥对土壤性质的影响[J]. *土壤通报*, 2006, 37(2): 273-277
- [8] 张辉, 李维炯, 倪永珍. 生物有机无机复合肥对土壤微生物活性的影响[J]. *农村生态环境*, 2004, 20(1): 37-40
- [9] 张辉, 李维炯, 倪永珍, 等. 生物有机无机复合肥效应的初步研究[J]. *农业环境保护*, 2002, 21(4): 352-356
- [10] 韩树民, 王久亮. 利用葡萄酒糟生产有机复混肥研究[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(2): 81-83
- [11] 马俊永, 李科江, 曹彩云, 等. 有机-无机肥长期配施对潮土土壤肥力和作物产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(2): 236-241
- [12] 张兰松, 马永安, 李保军, 等. 有机无机肥配合施用对小麦的增产作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(4): 503-505
- [13] 刘广军, 张振华, 翟金中, 等. 有机无机复混肥在小麦上的应用效果[J]. *安徽农业科学*, 2002, 30(6): 944-954
- [14] 王珍, 冯浩, 吴普特, 等. 土壤扩蓄增容肥对春玉米产量及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11): 114-119
- [15] 吴普特. 雨水资源化与现代节水农业[J]. *中国农业科技导报*, 2007, 9(1): 15-20

- [16] 王翠翠, 冯浩, 杜建. 土壤扩蓄增容肥对冬小麦棵间蒸发和水分利用效率的影响[J]. 水土保持通报, 2010, 30(2): 129-132
- [17] 陈连海, 冯浩, 杜建. 土壤扩蓄增容新型有机无机复合肥对土壤养分含量及小麦产量影响的试验研究[J]. 生态经济: 学术版, 2009(2): 6-10
- [18] 张凯, 任健, 仝胜利, 等. 土壤水分调控对冬小麦籽粒灌浆特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(5): 122-125
- [19] 谷洁, 高华, 李鸣雷, 等. 有机无机复混肥对冬小麦产量及其水分利用效率的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2004, 32(2): 65-68
- [20] 潘振玉, 蔡孝载. 新型肥料技术进展[J]. 化工进展, 2003, 22(8): 781-789
- [21] 周丽华, 李维炯, 倪永珍. 长期施用 EM 生物有机肥对冬小麦生产的影响[J]. 农业工程学报, 2005, 21(增刊): 221-224
- [22] 张睿, 刘党校. 氮磷与有机肥配施对小麦光合作用及产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 543-547
- [23] 沈建辉, 姜东, 戴廷波, 等. 施肥量对专用小麦旗叶光合特性及籽粒产量和蛋白质含量的影响[J]. 南京农业大学学报, 2003, 26(1): 1-5
- [24] 张凤翔, 周明耀, 郭文善. 不同氮素水平下孕穗开花期土壤水分对冬小麦产量效应的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 52-55
- [25] 潘英华, 雷廷武, 张晴雯, 等. 土壤结构改良剂影响下的土壤水分有效性研究[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(5): 64-67
- [26] 杨洪宾, 徐成忠, 鹿长金, 等. 垄作栽培对小麦植株形态和产量性状的影响[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(4): 119-122
- [27] Li F M, Liu X L, Liu S Q. Effects of early soil water distribution on the dry matter partition between roots and shoots of winter wheat[J]. Agricultural Water Management, 2001, 49(3): 163-171
- [28] 王红光, 于振文, 张永丽, 等. 推迟拔节水及其灌水量对小麦耗水量和耗水来源及农田蒸散量的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(7): 1183-1191
- [29] Cruz-Aguado J A, Rodés R, Pérez I P, et al. Morphological characteristics and yield components associated with accumulation and loss of dry mass in the internodes of wheat[J]. Field Crops Research, 2000, 66(2): 129-139
- [30] 曹永强, 刘琳, 姜莉, 等. 冬小麦水肥生产函数最小二乘法回归建模及分析[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(2): 45-48