

分层施肥及供水对冬小麦生理特性、根系分布和产量的影响

王振华^{1,2,3}, 张喜英¹, 陈素英¹, 孙宏勇¹, 朱波²

(1. 中国科学院 遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 河北 石家庄 050021;

2. 中国科学院 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:以太行山山前平原冬小麦为研究对象,在中国科学院栾城农业生态试验站,用筒栽模拟试验,研究了土壤表层和深层不同施肥供水组合对冬小麦根系分布、地上部生理特性及产量的影响。结果表明:与传统表层施肥+表层供水(CK)相比,整层施肥+整层供水组合处理(T3)和整层施肥+表层供水组合处理(T1)的土壤上层(0~90 cm)根系生物量都没有显著变化,深层(90~150 cm)根系生物量分别增加了97.3%,57.0%,产量分别增加了46.0%,27.0%,生长后期,冬小麦旗叶净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和水分利用效率(WUE)显著提高;表层施肥+整层供水组合处理(T2)的土壤上层(0~90 cm)根系生物量减少了18.8%,深层(90~150 cm)没有显著变化,旗叶 P_n 、 T_r 、WUE及产量没有显著差异。

关键词:分层施肥与供水;生理特性;根系分布;产量;冬小麦

中图分类号:S512.01 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-7091(2008)06-0176-05

Effects of Localized Irrigation and Fertilizing on Physiological Traits, Root Distribution and Yield of Winter Wheat

WANG Zhen-hua^{1,2,3}, ZHANG Xi-ying¹, CHEN Su-ying¹, SUN Hong-yong¹, ZHU Bo²

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetic and Developmental Biology, the Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China; 2. The Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Pot experiment was conducted at Luancheng Agro - Eco - Experimental station, Chinese Academy of Sciences (CAS), to study the effects of fertilization and water supply to different layers of soil on physiological traits, root distribution and yield of winter wheat in the piedmont of Taihang Mountain. The results showed that, compared with traditional fertilization applied to top soil layer and irrigation in surface soil (CK), the treatments with fertilization and water applied to the whole soil profile (T3) and fertilizing to the whole soil profile and water applied to the top soil layer (T1), root biomass of winter wheat in top soil layers (0 - 90 cm) had no significant difference, but root biomass in deep soil layers (90 - 150 cm) significantly increased by 97.3% and 57.0%, respectively. For treatment with fertilization applied to top soil layer and water applied to the whole soil profile (T2), compared with CK, root biomass in top soil layers (0 - 90 cm) decreased by 18.8%, whereas root biomass in deep soil layers (90 - 150 cm) was similar. Photosynthesis (P_n), transpiration (T_r) and water use efficiency (WUE) of flag leaf and grain yield of winter wheat for T2 had no significant difference with CK. But P_n , T_r , WUE of flag leaf of winter wheat for T3 and T1, at the later growing stage, were improved significantly. Grain yield of T3 and T1 substantially increased by 46.0% and 27.0% compared with CK, respectively.

Key words: Localized fertilization and irrigation; Physiological traits; Root distribution; Grain yield; Winter wheat

根系是作物吸收水分和养分的主要器官,在作物吸收水分和养分过程中起重要作用^[1,2]。根系在

收稿日期:2008-09-20

基金项目:国家自然科学基金(30771268);中国科学院创新方向性项目(KSCX2-YW-N-004)

作者简介:王振华(1980-),男,河北魏县人,博士,主要从事土壤环境及农田水肥耦合研究。

通讯作者:张喜英(1965-),女,博士生导师,研究员,主要从事农田节水机理与技术研究。

土壤剖面的生长和形态分布状况关系到作物对水肥的利用及其地上部植株生长和产量^[3,4]。在华北平原,由于水资源短缺、灌溉定额偏大、降水在时间上分布不均以及传统的土壤表层施肥,造成水分与养分在土壤剖面上分布错位,表现为“上干下湿,上肥下瘦”,影响了作物对水分和养分的有效利用。研究表明,即使在水分胁迫条件下,受旱冬小麦成熟时,80~200 cm 土层仍有大量水分未被充分利用^[5,6],这并非是因为根系下扎深度不够、吸水持续时间太短或根系吸水功能较弱^[7],而主要是由于冬小麦根系在土壤下层分布少,根长密度小,限制了冬小麦对深层水分的利用^[8,9]。因此,在华北平原的有限灌溉区,应重视促进冬小麦根系在土壤深层的发育,以便吸收利用深层土壤储水^[10]。

目前,国内外学者对调控根系生长和分布进行了很多研究,如采用深耕提高深层根系的根长密度^[5]、利用上下茬作物搭配促进根系深扎^[2]、通过灌溉措施(灌溉的量、时间、深度等)控制土壤剖面水分分布调节根系时空分布^[11-14]等,都取得了较好的效果。有关深层施肥对小麦根系生长和产量的影响,国内外学者也进行了大量研究^[15-23]。Sharma 等^[17]指出,在土壤上干下湿条件下,深施氮肥有利于小麦根系生长发育和提高作物产量。Wastermann 和 Edlund^[18]研究发现,在水分条件较好的土壤深层施肥可以提高冬小麦产量和氮肥利用。石岩等^[19-21]在山东莱阳的研究结果表明,20~40 cm 施肥处理的土壤中、下层的根量和小麦产量分别显著高于 0~20 cm 和 60~80 cm 施肥处理。沈玉芳等^[22]的研究结果显示,在黄土半干旱区,0~90 cm 土层施氮冬小麦旗叶叶绿素相对含量、净光合速率及籽粒产量显著高于 0~30,30~60,60~90 cm 土层施氮。而张永清等^[23]在黄土半干旱区发现,较深层次(50~100 cm)施肥有利于冬小麦根长增加和下层土壤中根重及根系活性的提高,同时可增加旗叶叶面积和净光合速率,延缓根系及旗叶衰老,明显提高产量。这些研究结果为当地农业生产和农田养分管理提供了一定的理论和实践依据。本研究针对有限或亏缺灌溉条件下,太行山前平原冬小麦生产中存在的水肥空间错位问题开展的,旨在探索是否能够通过调控水肥在土壤剖面的分配,影响冬小麦根系在土壤中的分布,并最终提高冬小麦产量。

1 材料和方法

1.1 试验材料与设计

本研究于 2005 年 10 月至 2006 年 7 月在中科院

栾城农业生态试验站(E 114°40', N 37°50', 海拔 50.1 m)完成。该站是华北太行山山前平原高产农区的典型代表性区域,主要种植制度为冬小麦与夏玉米轮作;多年平均降水量 480.7 mm,冬小麦生长期(10月~翌年6月份)的降雨量为 130.0 mm;地下水位在 30 m 以下。供试土壤为壤质褐土,2 m 土体的平均田间持水量为 0.36 cm³/cm³,平均容重 1.47 g/cm³,有机质含量 15.73 mg/kg,全氮 840 mg/kg,碱解氮 64.4 mg/kg,速效磷 15.46 mg/kg,速效钾 151.2 mg/kg。

供试冬小麦品种为石 7221。试验在高 150 cm,内径 15.4 cm 的 PVC 筒内进行。装土时在筒的一侧插入一根 90 cm 长的硬质塑料细管(直径 1.8 cm),以便在土壤剖面深层灌水和施肥。每筒装干土 35.1 kg,控制土壤容重 1.35 g/cm³,起始重量含水量 0.20 g/g。用塑料布和胶带将筒底封住,以防土壤外漏。为减少外界环境影响,将装土后的筒埋入地下,筒顶部刚好与地面平齐,降雨时用可移动式遮雨棚挡雨。试验共设 4 个处理。T1 处理为整层施肥+表层供水组合,即全部供水于土壤表层,施肥量的一半施入表层,一半施入深层;T2 处理为表层施肥+整层供水组合,即供水量的一半灌入表层,一半灌入深层,全部施肥于表层;T3 为整层施肥+整层供水组合,总供水量和施肥量的一半供于表层,一半供于深层;设 1 个对照,CK 为表层施肥+表层供水,即传统灌水和施肥方式。设计深层供水和深层施肥深度为 90 cm(该地区田间冬小麦根系生长深度 200 cm),目的是为了模拟深层水肥对根系的调控作用,以及影响土壤剖面水肥位置。每个处理供水总量相同,相当于当地实施亏缺灌溉的灌溉量。供水时间和供水量分别为:拔节期,1 L(相当于 50 mm);孕穗期,1.2 L(相当于 60 mm);灌浆期:1.2 L。每个处理施肥总量相同,分基肥(装土时)和追肥(拔节期),基肥施二铵 0.25 g/kg,尿素 0.17 g/kg,KCl 0.17 g/kg;拔节期追施尿素 0.14 g/kg。2005 年 10 月 9 日播种,每筒播种 16 粒种子,10 月 15 日出苗。11 月初进行间苗,每筒留基本苗 10 株。2006 年 6 月 4 日收获。

1.2 测定项目与方法

冬小麦返青后,每个处理分别固定 10 株,在主要生育时期测定株高。同时,测定所有植株叶子的长和宽,计算叶面积 LA = (叶长 × 叶宽)/1.2,然后求得叶面积指数 LAI = LA/S(S 为试验筒底面积)。在主要生育时期选择晴朗天气,10:00 - 11:30 点,用 LI-6400 便携式光合仪测定各处理冬小麦旗

叶净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r),计算叶片水分利用效率 $WUE = P_n / T_r$ 。测定时采用人工光源,控制光合有效辐射(PAR)恒定,减少因光强变化造成的误差。在小麦成熟后,收获、晒干,称取地上部生物量。测定穗数、穗粒数和千粒重。计算收获指数 = 产量/生物量。最后将试验筒劈开,每30 cm为一个土壤层次,分别将带有根系的土样装入土袋,清水冲洗,去除杂物,倒入网格单位为2.54 cm的根样盘,用交叉截获法测定根长^[24],并根据根长 = 交叉点数 $\times 11/14 \times 2.54 \text{ cm}$ ^[25]计算根长密度。然后将鲜根样置于烘箱中,在保持恒温80~85条件下烘干至恒重,用电子天平测定根干质量,计算根系生物量。每个处理3次重复。试验数据使用Excel和SPSS12.0软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 分层施肥供水对根系生物量及其分布的影响

从表1可知,与CK相比,其他处理对冬小麦根

表1 不同处理冬小麦的根系生物量在不同土层的分布

Tab.1 The distribution of root biomass of winter wheat in different soil layers for the different treatments

处理 Treatment	根系生物量/(g/m ²) Root biomass				
	0~30 cm	30~60 cm	60~90 cm	90~120 cm	120~150 cm
CK	243.5 ±24.8a	191.6 ±20.4a	107.3 ±10.2b	91.2 ±9.1c	76.9 ±5.6c
T1	180.1 ±15.4b	208.1 ±20.1a	150.2 ±12.8a	151.8 ±13.2b	112.1 ±10.5b
T2	188.3 ±16.7b	136.5 ±15.4b	121.9 ±11.7b	92.5 ±10.4c	71.8 ±4.1c
T3	174.9 ±14.3b	195.1 ±18.5a	169.4 ±13.7a	183.7 ±15.9a	147.9 ±11.9a

注:同列不同字母表示差异显著 $p < 0.05$ 。

Note: Different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level of probability.

2.2 分层施肥供水对根长密度的影响

根长密度是衡量作物根系分布的重要指标,通常以每 cm^3 土壤内根长的厘米数表示^[13]。从图1可以看出,根长密度在各土层分布规律与根系生物量在各土层分布规律较一致。CK在0~30 cm的根长密度最大,达 4.41 cm/cm^3 ,随土层深度增加,根长密度减小。T2在0~30 cm和30~60 cm的根长密度显著小于CK($p < 0.05$),60 cm以下与CK差异不显著,表明减少表层灌水量对土壤0~60 cm的根长密度影响显著,而深层灌水对土壤60~150 cm的根长密度影响不显著。T1, T3在0~30 cm的根长密度较CK分别减少了23.6%,23.8%,而在其他土层都显著大于CK($p < 0.05$),其中,30~90 cm分别提高了34.2%,34.5%,90~150 cm分别提高了51.1%,96.3%。从整个土壤剖面(0~150 cm)来看,T1, T3的平均根长密度较CK分别增加了17.9%,29.0%。表明将传统表层施肥量减少一半,会显著减小土壤表层根长密度,而深层施肥,则显著增大土壤中、下层的根长密度。

系生物量有明显的影响。0~30 cm土层,CK的平均根系生物量达到 243.5 g/m^2 ,T1, T2, T3的根系生物量比CK分别减少了26.0%,22.7%和28.2%,表明将传统表层供水量或施肥量减少一半,会显著减少土壤表层根量。0~90 cm土层,CK, T1, T2和T3的平均根系生物量分别为542.5,538.4,446.7和539.4 g/m^2 。T1和T3较CK没有明显差异,T2较CK减少了18.8%。90~150 cm土层,T1和T3的平均根系生物量较CK分别增加了57.0%,97.3%,T2,CK没有明显差别,说明整层施肥(如T1和T3)促进了深层根系的生长,如果没有深层施肥(T2),即使深层水分充足,也不会增加深层根系生物量。从0~150 cm来看,T1, T3的根系生物量较CK分别增加了13.0%,22.6%,而T2较CK减少了14.0%。可以看出,T1, T3的根系在土壤剖面增加,主要是因为土壤深层90~150 cm根系增多;而T2的根系在土壤剖面减少,与其在0~90 cm减少密切相关。

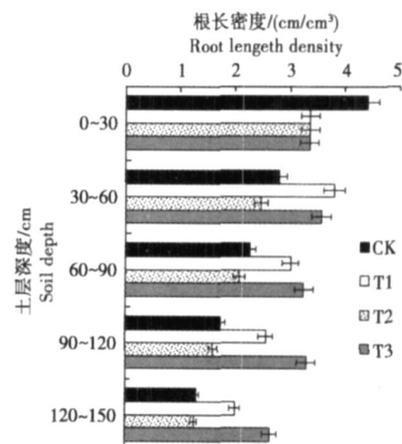


图1 成熟期不同处理冬小麦的根长密度在不同土层的分布

Fig.1 The distribution of root length density at maturity of winter wheat in different soil layers for the different treatments

2.3 分层施肥供水对地上部生理生态的影响

图2是不同水肥处理对冬小麦株高和叶面积指数的影响。T1, T3的株高与CK相比没有明显差异,但T2的株高受到抑制(图2-A)。5月25日,T2的株高比CK矮4.2 cm。4月15日前,各处理LAI差异

不明显。但 4 月 15 日后,各处理 LAI 呈明显差异 ($p < 0.05$)。以 5 月 15 日为例,T1,T3 的 LAI 较 CK 增加了 5.4%,18.9%,T2 的 LAI 较 CK 减小了 19.0%

(图 2 - B)。说明整层施肥(T3,T1)显著提高了 LAI,并使冬小麦在灌浆期间保持较高的 LAI,而表层施肥 + 整层供水(T2)抑制了冬小麦株高和 LAI。

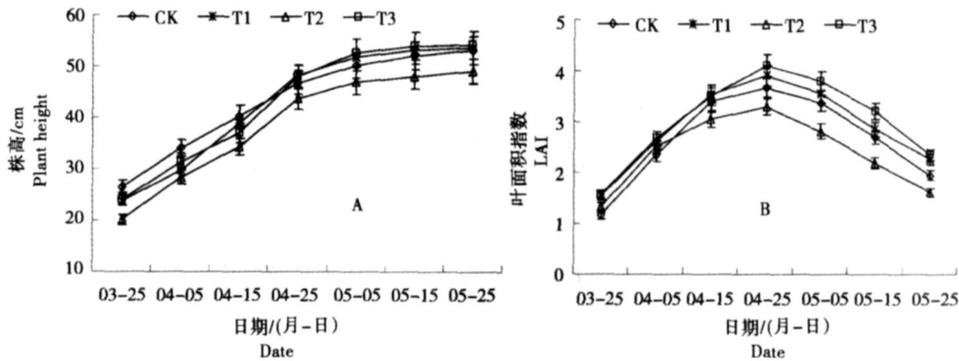


图 2 不同处理冬小麦的株高和叶面积指数的变化

Fig. 2 Changes of plant height and LAI of winter wheat in the different treatments

表 2 是不同处理冬小麦旗叶净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、水分利用效率(WUE)。从表 2 可以看出,T2 的旗叶 P_n 、 T_r 和 WUE 在整个生长期都与 CK 差异不显著。5 月 1 日以前,T1,T3 的旗叶 P_n 、 T_r 和 WUE 较 CK 没有显著差异。冬小麦生育后期,T1,T3 的旗叶 P_n 、 T_r 和 WUE 逐渐表现出高于 CK。5 月 10 日,T1 和 T3 的旗叶 P_n 较 CK 分别提高了 25.2%,32.5% ($p < 0.05$),但 T_r 、WUE 没有显著差

异。5 月 20 日,与 CK 相比,T1,T3 的 P_n 、 T_r 和 WUE 显著高于 CK ($p < 0.05$),其中 P_n 分别提高了 49.5%,72.3%, T_r 分别增加了 26.6%,38.9%,WUE 分别提高了 18.1%,24.0%。从以上分析可知,表层施肥 + 整层供水(T2)对冬小麦旗叶 P_n 、 T_r 和 WUE 没有明显影响;整层施肥(T3,T1)则显著提高了冬小麦生育后期,尤其是灌浆期间(5 月 10 日至 20 日)叶片 P_n 、 T_r 和 WUE。

表 2 不同处理冬小麦的旗叶 P_n 、 T_r 和 WUE 的变化

Tab. 2 Changes of flag leaf P_n , T_r and WUE of winter wheat in the different treatments

生理指标 Physiological trait	处理 Treatment	日期/(月 - 日) Date					
		03 - 23	04 - 08	04 - 22	05 - 01	05 - 10	05 - 20
P_n / ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)	CK	17.60 ± 2.54	18.40 ± 2.44	20.56 ± 2.64	17.96 ± 2.42	13.20 ± 1.98b	7.02 ± 1.33b
	T1	16.80 ± 2.41	17.79 ± 2.24	19.69 ± 2.63	18.77 ± 2.85	16.52 ± 2.03a	10.50 ± 1.80a
	T2	16.40 ± 2.63	17.61 ± 2.70	19.86 ± 2.82	16.61 ± 2.37	12.10 ± 1.78b	6.28 ± 1.52b
	T3	15.40 ± 2.28	17.45 ± 2.36	21.53 ± 3.16	20.19 ± 2.91	17.49 ± 2.11a	12.10 ± 1.91a
T_r / ($\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)	CK	6.97 ± 1.20	7.21 ± 1.11	7.85 ± 1.64	7.08 ± 1.36	5.67 ± 0.94	3.85 ± 0.44b
	T1	6.74 ± 1.31	7.03 ± 1.23	7.59 ± 1.35	7.32 ± 1.45	6.65 ± 1.10	4.88 ± 0.37a
	T2	6.62 ± 1.05	6.98 ± 1.07	7.64 ± 1.27	6.68 ± 1.81	5.35 ± 1.25	3.63 ± 0.36b
	T3	6.32 ± 1.17	6.93 ± 1.19	8.13 ± 1.84	7.74 ± 1.64	6.94 ± 1.14	5.35 ± 0.61a
WUE / (mmol/mol)	CK	2.52 ± 0.24	2.55 ± 0.38	2.62 ± 0.37	2.54 ± 0.26	2.33 ± 0.24	1.82 ± 0.15b
	T1	2.49 ± 0.29	2.53 ± 0.30	2.59 ± 0.36	2.57 ± 0.29	2.48 ± 0.19	2.15 ± 0.16a
	T2	2.48 ± 0.23	2.52 ± 0.29	2.60 ± 0.39	2.49 ± 0.28	2.26 ± 0.21	1.73 ± 0.12b
	T3	2.44 ± 0.22	2.52 ± 0.35	2.65 ± 0.37	2.61 ± 0.31	2.52 ± 0.26	2.26 ± 0.23a

注:对于相同生理指标,同列标注不同字母表示差异显著, $p < 0.05$,未标注字母表示差异不显著。

Note: For the same physiological trait, different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level of probability; whereas without noted letters, it meant no significant difference.

表 3 不同处理冬小麦产量和产量构成

Tab. 3 Yield and yield components of winter wheat in the different treatments

处理 Treatment	每筒生物量/g Biomass per pot	每筒产量/g Yield per pot	穗数/(穗/筒) Spikes per pot	穗粒数/(粒/穗) Kernels per spike	千粒重/g 1 000-kernel weight	收获指数 Harvest index
CK	44.8 ± 2.2 b	19.2 ± 1.5b	16 ± 2a	33 ± 1b	37.8 ± 2.3a	0.43b
T1	50.9 ± 2.4a	24.4 ± 2.6a	17 ± 3a	38 ± 2a	38.4 ± 1.5a	0.48a
T2	42.2 ± 3.9b	17.8 ± 2.1b	15 ± 3a	32 ± 2b	37.1 ± 2.7a	0.42b
T3	56.9 ± 4.3a	28.0 ± 3.8a	18 ± 2a	39 ± 2a	40.2 ± 3.2a	0.49a

注:同列不同字母表示差异显著, $p < 0.05$ 。

Note: Different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level of probability.

2.4 分层施肥供水对冬小麦产量及产量构成的影响
从表 3 可知,T2 的产量及产量构成较 CK 没有

显著差异。T1,T3 生物量和产量显著高于 CK,其中产量分别增加了 27.0%,46.0%。在产量构成中,

T₁, T₃ 的穗粒数显著多于 CK, 而穗数和千粒重差异不显著。T₁, T₃ 的收获指数较 CK 分别提高了 11.6%, 14.0%。以上研究结果表明, 表层施肥 + 整层供水 (T₂) 对冬小麦产量和产量构成没有显著影响; 整层施肥 (T₁, T₃) 则显著提高冬小麦产量、穗粒数和收获指数。

3 结论与讨论

在表层施肥 + 整层供水条件下, 0~150 cm 土层的根系生物量较表层施肥 + 表层供水减少了 14.0%, 这主要因为 90~150 cm 土层的根系生物量较表层施肥 + 表层供水没有明显变化, 而 0~90 cm 土层的根系减少了 18.8%。根长密度与根系生物量的土壤剖面分布规律基本一致, 这表明土壤深层供水对深层根系生物量和根长密度没有明显作用, 减少表层供水则显著减少土壤上层根系生物量和根长密度。有研究表明, 土壤上层根系生物量和根长密度减少, 对生长前期的作物吸水不利, 影响地上部生理特性和产量^[14, 21]。本研究发现, 除株高和 LAI 受到明显抑制外, 冬小麦旗叶 P_n、T_r、WUE 和产量较 CK 差异不显著。

在整层施肥 + 表层供水条件下, 0~150 cm 土层的根系生物量较表层施肥 + 表层供水增加了 13.0%, 这是由于 90~150 cm 土层的根系生物量较表层施肥 + 表层供水提高了 57.0%。根长密度与根系生物量在土壤剖面的分布规律基本一致, 这说明深层施肥可显著增加土壤深层根系生物量和根长密度。已有研究结果证实, 增加土壤深层根系生物量和根长密度, 将有利于作物吸收利用土壤深层储水^[5, 10], 进而影响到地上部生理特性和产量^[18, 21]。本研究表明, 生长后期, 冬小麦 LAI 和旗叶 P_n、T_r、WUE 较 CK 都有显著增加, 产量和收获指数较 CK 分别提高了 27.0%, 11.6%。

整层施肥 + 整层供水对冬小麦地下、地上部生长和产量产生了显著影响: 0~150 cm 土层根系生物量和根长密度较表层施肥 + 表层供水分别增加了 22.6%, 29.0%, 其中 90~150 cm 土层根系分别增加 97.3%, 96.3%; 生长后期, 冬小麦保持较高的 LAI, 旗叶 P_n、T_r、WUE 显著高于 CK; 产量和收获指数较表层施肥 + 表层供水分别提高了 46.0%, 14.0%。本研究结果与已有报道结论基本一致^[22]。

本模拟试验设计的深层施肥在生产实践中还难以实现, 但初步从理论上证明了土壤整层施肥供水可以促进冬小麦根系深层分布和提高产量。

参考文献:

- [1] Kuchenbuch R O, Barber S A. Yearly variation of root distribution with depth in relation to nutrient uptake and corn yield [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1987, 18:255 - 263.
- [2] Rasse D P, Smucker A J M. Root recolonization of previous root channels in corn and alfalfa rotations [J]. *Plant and Soil*, 1998, 204:203 - 212.
- [3] Taylor H M, Jordan W R, Sinclair T R, et al. Limitations to efficient water use in crop production [J]. *American Society of Agronomy*, 1983:45 - 64.
- [4] Clothier B E, Green S R. Rootzone processes and the efficient use of irrigation water [J]. *Agricultural Water Management*, 1994, 25:1 - 12.
- [5] Zhang X Y, Pei D, Chen S Y. Root growth and soil water utilization of winter wheat in the North China Plain [J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18:2275 - 2287.
- [6] Hamblin A P. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake [J]. *Advances in Agronomy*, 1985, 38:95 - 158.
- [8] 冯广龙, 刘昌明. 冬小麦根系生长与土壤水分利用方式相互关系分析 [J]. *自然资源学报*, 1998, 13(3):234 - 241.
- [9] Barraclough P B, Weir A H. Effects of a compacted subsoil layer on root and shoot growth, water use and nutrient uptake of winter wheat [J]. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*, 1988, 110:207 - 216.
- [10] Entz M H, Gross K G, Fowler D B. Root growth and soil-water extraction by winter and spring wheat [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1992, 72:1109 - 1120.
- [11] 张喜英. 作物根系与土壤水利用 [M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [12] 冯广龙, 刘昌明. 人工控制土壤水分剖面调控根系分布的研究 [J]. *地理学报*, 1997, 52(5):461 - 469.
- [13] 马瑞昆, 蹇家利, 贾秀领, 等. 供水深度与冬小麦根系发育的关系 [J]. *干旱地区农业研究*, 1991(3):1 - 9.
- [14] 王淑芬, 张喜英, 裴冬, 等. 不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(2):27 - 32.
- [15] 李运生, 王菱, 刘士平, 等. 土壤-根系界面水分调控措施对冬小麦根系和产量的影响 [J]. *生态学报*, 2002, 22(10):1680 - 1687.
- [16] Alston A M. Effects of depth of fertilizer placement on wheat grown under three water regimes [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1976, 27:1 - 10.
- [17] Sharma B R, Chaudhary T N. Wheat root growth, grain yield and water uptake as influenced by soil water regime and depth of nitrogen placement in a loamy sand soil [J]. *Agricultural Water Management*, 1983, 6(4):365 - 373.
- [18] Westerman R L, Edlund M G. Deep placement effect of nitrogen and phosphorus on grain yield, nutrient uptake and forage quality of winter wheat [J]. *Agronomy Journal*, 1985, 77:803 - 809.
- [19] 石岩, 于振文, 位东斌, 等. 施肥深度对旱地小麦花后根系干质量及产量的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2000, 18(1):38 - 42.
- [20] 石岩, 位东斌, 于振文, 等. 施肥深度对旱地小麦氮素利用及产量的影响 [J]. *核农学报*, 2001, 15(3):180 - 183.
- [21] 石岩, 位东斌, 于振文, 等. 施肥深度对旱地小麦花后根系衰老的影响 [J]. *应用生态学报*, 2001, 12(4):573 - 575.
- [22] 沈玉芳, 李世清, 邵明安. 水肥空间组合对冬小麦光合特性及产量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18(10):2256 - 2262.
- [23] 张永清, 苗果园. 冬小麦根系对施肥深度的生物学影响研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(4):72 - 75.
- [24] Newman E I. A method of estimating the total length of root in a sample [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1966, 3:139 - 145.
- [25] Marsh B a B. Measurement of length in random arrangements of lines [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1971, 8:265 - 267.