

# 根区水肥空间耦合对冬小麦生长及产量的影响<sup>\*</sup>

李开峰<sup>1,2</sup> 张富仓<sup>1\*\*</sup> 祁有玲<sup>1</sup> 邢英英<sup>1</sup> 李志军<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup> 水利部淮河水利委员会, 安徽蚌埠 223001)

**摘 要** 利用管栽试验研究了根区不同湿润方式(整体湿润、上湿下干、上干下湿)、施肥方式(整体施肥、上层施肥、下层施肥)及其耦合对冬小麦不同生育期生长及产量的影响。结果表明:下层施肥方式显著降低了分蘖期冬小麦的株高和叶面积,而不同湿润方式对分蘖期株高和叶面积的影响不显著,拔节期水肥同区方式的株高大于水肥异区方式,表现出协同耦合效应。上干下湿方式和下层施肥方式显著降低了根系干物质质量、地上部干物质质量和总干物质质量,上层施肥方式有利于增加冬小麦生物量,而上湿下干方式与施肥处理对地上部干物质质量和总干物质质量的耦合效应明显。水肥同区处理的根冠比高于水肥异区处理;上干下湿方式的水分利用效率显著高于整体湿润和上湿下干方式,水肥同区处理的水分利用效率高于水肥异区处理,但下层施肥方式的水分利用效率较低。与上干下湿方式相比,上湿下干和整体湿润方式的冬小麦单穗粒数分别增加了 41.7% 和 61.9%,上层施肥和整体施肥方式的单穗粒数高于下层施肥方式,上湿下干方式与施肥处理对小麦产量及产量构成因素(除千粒重外)的水肥耦合效应明显。不同水肥处理主要通过影响单穗粒数来影响冬小麦产量。

**关键词** 水肥空间耦合 生物量 产量 收获指数 水分利用效率

**文章编号** 1001-9332(2010)12-3154-07 **中图分类号** S27, S512 **文献标识码** A

**Effects of water-fertilizer spatial coupling in root zone on winter wheat growth and yield.** LI Kai-feng<sup>1,2</sup>, ZHANG Fu-cang<sup>1</sup>, QI You-ling<sup>1</sup>, XING Ying-ying<sup>1</sup>, LI Zhi-jun<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Ministry of Education Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>2</sup>The Huaihe River Commission of the Ministry of Water Resources, Bengbu 223001, Anhui, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2010, 21(12): 3154-3160.

**Abstract:** A soil column experiment was conducted to study the winter wheat growth and yield under effects of different soil wetting (overall wetting, upper part wetting, and lower part wetting) and fertilization (overall fertilization, upper part fertilization, and lower part fertilization). The plant height and leaf area at tillering stage decreased significantly under lower part fertilization, compared with those under upper part and overall soil fertilization, but had no significant differences under different soil wetting. At jointing stage, the plant height was higher when the soil wetting and fertilization were at same location than at different location, manifesting a synergistic coupling effect of water and fertilizer. Lower part soil wetting and lower part fertilization decreased the root-, shoot-, and total dry biomass significantly, upper part fertilization benefited the biomass accumulation of winter wheat, and upper part soil wetting combined with upper part fertilization had an obvious coupling effect on the shoot- and total dry biomass. Soil wetting and fertilization at same location induced a higher ratio of root to shoot, compared with soil wetting and fertilization at different location, and lower part soil wetting resulted in the maximum water use efficiency (WUE), compared with upper part and overall soil wetting. A higher WUE was observed in the soil wetting and fertilization at same location than at different location, but a lower WUE was induced by lower part fertilization. The grain number per spike under upper part and overall soil wetting was increased by 41.7% and 61.9%, respectively, compared with that under lower part soil wetting, and this yield component under upper part and overall soil fertilization was also higher, compared with that under

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(50879073)和高等学校创新引智计划项目(111-2-16)资助。

<sup>\*\*</sup> 通讯作者。E-mail: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

2010-03-26 收稿, 2010-08-05 接受。

lower part fertilization. Upper part soil wetting and fertilization had an obvious coupling effect of water-fertilizer on the yield and yield components (except for 1000-grain mass). Different soil wetting and fertilization affected the yield mainly through affecting the grain number per spike.

**Key words:** water-fertilizer spatial coupling; biomass; yield; harvest index; water use efficiency.

水分和养分是限制作物生长发育的两大重要因子. 作物与水分养分相互激励和颀抗的动态平衡关系以及这些相互作用的影响称为作物的水肥耦合效应<sup>[1]</sup>. 关于作物的水肥耦合效应研究取得了一些重要进展<sup>[2-3]</sup>. 研究表明, 适量的氮磷供应有利于作物根、茎、叶等营养器官的发育和植株群体的协调发展, 同时能够补偿水分胁迫所导致的叶面积减小、叶片伸展缓慢等不良效应, 有利于干物质的生产, 减少产量损失<sup>[4-7]</sup>. 祁有玲等<sup>[8]</sup>研究了水分亏缺和施氮对冬小麦生长及氮素吸收的影响, 结果表明, 任何生育期水分亏缺都会影响冬小麦的株高、叶面积、干物质累积及对氮素的吸收. 近年来, 关于作物水肥空间耦合(组合)的研究已受到许多学者的关注. Benjamin 等<sup>[9]</sup>研究了隔沟灌溉带状施肥对玉米生长和氮肥吸收的影响, 结果表明, 在干旱年份, 当氮肥施在不灌溉水沟时氮肥吸收降低 50%; 在相对湿润年份, 灌溉水沟和不灌溉水沟的肥料吸收无差异. 李志军等<sup>[10]</sup>利用盆栽试验研究了不同灌水方式对冬小麦水分和养分吸收的影响, 结果表明, 控制性交替灌溉对养分离子的吸收优于常规灌溉和固定灌溉. 邢维芹等<sup>[11]</sup>研究了半干旱地区玉米的水肥空间耦合效应, 结果表明, 在相同灌水量下, 水肥异区交替灌水和同区交替灌水的根系活力、光合速率、产量和灌溉水利用效率较高. 胡田田等<sup>[12]</sup>对局部灌水方式的玉米不同根区氮素吸收和利用进行了研究, 结果表明, 交替灌水的不同根区对作物吸收氮素有同等贡献. 沈玉芳等<sup>[13-14]</sup>研究了水肥空间耦合对冬小麦光合特性、氮磷养分有效性及产量的影响, 结果表明, 在不同湿润方式下, 上层充足的氮磷供应有利于提高冬小麦光合速率、产量和氮磷养分有效性. 刘作新等<sup>[15]</sup>提出了玉米在不同条件下合理的水肥空间耦合方案及高效耦合模式.

已有的水肥空间耦合研究多集中在对作物的生理、氮磷养分有效性及产量的影响方面. 关于水肥空间耦合条件下作物在不同生育期的生长性状、产量和水分利用方面的研究报道较少. 本文利用管栽试验, 研究了不同湿润方式及施肥方式组成的水肥空间耦合对冬小麦各生育期株高、叶面积、生物量、产量、收获指数及水分利用效率的影响, 以期对冬小麦

不同水肥空间耦合方式下的水肥高效利用提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室的遮雨棚中进行. 供试土壤为西北农林科技大学灌溉试验站耕作层的壤土, 土壤经自然风干, 磨细, 过 2 mm 筛. 土壤质地为重壤土, 田间持水量 ( $\theta_f$ ) 为 24%. 土壤基本理化性质为: pH 8.14, 有机质 5.02 g · kg<sup>-1</sup>, 全氮 0.77 g · kg<sup>-1</sup>, 全磷 0.35 g · kg<sup>-1</sup>, 全钾 (K<sub>2</sub>O) 23.8 g · kg<sup>-1</sup>, 碱解氮 8.32 mg · kg<sup>-1</sup>, 速效磷 3.5 mg · kg<sup>-1</sup>, 速效钾 102.3 mg · kg<sup>-1</sup>. 试验在自制的植物生长装置中进行, 由内径 10.5 cm 的 PVC 管纵向锯开加工而成, 长 70 cm, 平均分为二段, 中间以 2 cm 沙石层隔开以阻断上下土层间的水肥交换(不影响根系的正常穿过). 为使灌水均匀, 在装置侧部上下层各留有一对孔径 1.2 cm 的口孔以供灌水, 纵向锯开的 PVC 管中间留下的缝隙用防水胶带纸密封, 以便土壤含水量的测定. 以冬小麦小偃 22 为供试材料.

### 1.2 试验设计

为控制土壤粘度, 便于灌水均匀, 试验土样由过筛土壤和蛭石均匀混合后分为 2 个层次装入, 中间以 2 cm 沙石层隔开. 2 个层次的装土容重均控制为 1.3 g · cm<sup>-3</sup>, 其中每管装土 5.8 kg、蛭石 0.3 kg. 底部铺一层细沙, 以便取样和防止水分渗出及根系盘绕管底. 为保证冬小麦的正常萌发, 播种前各处理均灌水至田间持水量的 80%. 水分处理设: 全土柱整体湿润水分处理(控制 0 ~ 70 cm 土层含水量为田间持水量的 60% ~ 65%, 以 W 表示), 上层干旱、下层湿润水分处理(控制 0 ~ 35 cm 土层含水量为田间持水量的 45% ~ 50%, 35 ~ 70 cm 土层含水量为田间持水量的 75% ~ 80%, 以 A 表示), 上层湿润、下层干旱水分处理(控制 0 ~ 35 cm 土层含水量为田间持水量的 75% ~ 80%, 35 ~ 70 cm 土层含水量为田间持水量的 45% ~ 50%, 以 B 表示) 3 种方式, 文中分别简称为整体湿润、上干下湿和上湿下干.

施肥处理设整体施肥(Z)、上层施肥(S)和下层

施肥(X)3种方式.装土氮素施用量为0.2 g N·kg<sup>-1</sup>,磷素施用量为0.2 g P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·kg<sup>-1</sup>.试验共9个处理组合,每处理11次重复,共计99个管柱,完全随机排列.肥料选用尿素(含N 46%)和过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 16%),装土前将氮肥和磷肥与所施层次土壤均匀混合.各土层每次加水前先用土壤三参数仪准确测定含水量,根据含水量和设计水分要求,通过点灌加入所需水分.待幼苗长至三叶期,开始进行不同水分处理.

冬小麦于2007年10月24日播种,三叶期后定苗,每管留苗7株.2008年5月30日—6月4日收获(各处理在相同成熟条件下收获).

1.3 分析方法

于分蘖期、拔节期、扬花-灌浆期、成熟期每处理随机测定5株冬小麦的株高,用平均值表示该处理的株高.抽穗前测定土面至每株最高叶尖的高度,抽穗后测定土面至最高穗顶的高度.于分蘖期、拔节期、扬花-灌浆期每处理随机测定5株冬小麦全部功能叶的叶面积,用平均值表示.叶面积测定采用长宽法,校正系数为0.75.于成熟期每处理随机测定5株冬小麦地上部和根系生物量,取平均值.

冬小麦收获时,每处理随机采样5株,连根取出,小麦穗单独采下,考查单穗质量和每穗粒数,籽粒晒干称量,用于产量、收获指数及千粒重的计算.作物水分利用效率=处理产量/该处理灌水量之和.

1.4 数据处理

所得试验数据用Excel和SPSS 14.0统计分析软件处理,首先对不同处理间指标进行方差分析,若

差异显著,再进行Duncan多重比较, $P<0.05$ 显著水平, $P<0.01$ 极显著水平.

2 结果与分析

2.1 不同水肥耦合方式对冬小麦株高的影响

由表1可以看出,不同湿润方式、施肥方式对冬小麦分蘖期的株高均有明显影响.从不同湿润方式来看,上干下湿方式的株高较整体湿润和上湿下干方式分别降低了3.7%和2.8%,但差异不显著;从不同施肥方式来看,下层施肥方式的株高较上层施肥和整体施肥方式分别降低了13.4%和15.6%,差异显著;整体湿润和上湿下干方式下,水肥同区处理的株高显著高于水肥异区,而在上干下湿方式下则相反.可见,施肥方式是影响分蘖期冬小麦株高的首要因素.

拔节期,不同湿润方式和施肥方式对冬小麦株高的影响与分蘖期一致,但在相同湿润方式下,水肥同区处理的株高均高于水肥异区处理.尤其在上湿下干方式下,水肥同区与水肥异区处理的株高差异最大.此阶段水肥同区表现出协同耦合效应.统计分析表明,湿润方式和施肥方式对拔节期株高均有极显著影响.扬花-灌浆期,不同湿润方式、施肥方式及水肥空间耦合处理的株高没有显著差异.但与拔节期相比,下层施肥处理的株高增长较快,平均增长了90.9%,尤其以上干下湿和上湿下干方式最为明显.究其原因,可能是因为根系的纵向伸长,使下层土壤中的养分被充分利用,前期所受的养分胁迫得以解除,促进了地上部生长,株高增加.成熟期,各处

表1 不同水肥耦合方式对冬小麦株高的影响  
Tab.1 Effects of different water and fertilizer coupling modes on plant height of winter wheat (cm)

湿润方式 Wetting mode	施肥方式 Fertilization mode	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Jointing stage	扬花-灌浆期 Flowering- filling stage	成熟期 Maturing stage
W	S	25.83a	35.14ab	54.14a	53.81a
	X	20.02b	31.64ab	47.87a	55.03a
	Z	27.88a	33.27ab	54.88a	54.47a
A	S	26.22a	26.90bed	52.04a	53.35a
	X	18.92b	22.95d	50.23a	51.91a
	Z	25.88a	31.14abc	50.44a	50.86a
B	S	25.63a	32.07ab	55.53a	54.13a
	X	21.40b	23.41cd	47.44a	55.72a
	Z	26.02a	38.57a	56.03a	55.84a
F 值	湿润方式 Wetting mode	1.42	9.75**	0.45	5.38*
F value	施肥方式 Fertilization mode	81.14**	13.98**	3.79*	1.15
	湿润方式×施肥方式 Wetting×fertilization	2.37	2.38	0.71	2.07

W:整体湿润 Overall soil wetting; A:上干下湿 Lower soil wetting; B:上湿下干 Upper soil wetting; Z:整体施肥 Overall soil fertilization; S:上层施肥 Upper soil fertilization; X:下层施肥 Lower soil fertilization. 同列不同字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ ) Different letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.05 level. \*  $P<0.05$ ; \*\*  $P<0.01$ . 下同 The same below.



理的株高差异不显著,与扬花-灌浆期的差异也不明显.可见,扬花-灌浆期是株高主要生长时期,这与生产实践相一致.

从整个生育期来看,在分蘖期,养分是影响株高的首要因子,上层充足的养分供应有利于植株高度的增加;在拔节期,水分的作用逐渐显现出来,该阶段养分和水分均具有重要作用,水肥同区处理的株高要显著高于水肥异区处理,表现出一定的水肥协同耦合效应;扬花-灌浆期,下层施肥处理冬小麦得到补偿性生长,株高显著增加.

2.2 不同水肥耦合方式对冬小麦叶面积的影响

叶片是冬小麦进行光合作用合成碳水化合物的场所,叶面积是同化量的一个指标,要获得高产就必须使叶面积保持在适宜的范围.由表2可以看出,冬小麦功能叶面积在分蘖期较小,随着生育进程的推进而逐渐增大,在扬花-灌浆期到达最大值.

不同水肥耦合方式的叶面积在分蘖期差异较大.从不同施肥方式来看,下层施肥处理的叶面积较上层施肥和整体施肥处理平均减小了21.4%和25.2%,差异显著;整体湿润和上湿下干方式下,水肥同区处理的叶面积显著高于水肥异区,而上干下湿方式下则相反.这与同时期株高的测定结果一致.拔节期,各处理叶面积没有显著差异,可能是经过前期的生长冬小麦功能叶的数量及面积趋于稳定.与同时期株高相比,不同水肥耦合方式对叶面积的影响存在滞后性.

各处理的叶面积均在扬花-灌浆期达到最大值,与拔节期相比处理间的差异均有所增加.从不同湿润方式看,上干下湿方式的叶面积较整体湿润和上湿下干方式平均分别降低了4.9%和1.7%;整体

湿润和上湿下干方式下,水肥同区处理的叶面积较水肥异区处理平均增加了8.5%,但差异不显著.统计分析结果表明,湿润、施肥方式及水肥空间耦合方式对扬花-灌浆期的叶面积均没有显著影响.

2.3 不同水肥耦合方式对冬小麦干物质累积和水分利用效率的影响

由表3可以看出,不同湿润方式和施肥方式对冬小麦根系干物质量有显著影响,上干下湿方式的根系干物质量低于整体湿润和上湿下干方式,均降低了31.1%,差异达到极显著水平;下层施肥方式的根系干物质量低于整体施肥和上层施肥方式,均降低了25%,差异达到极显著水平;在上湿下干方式下,水肥同区处理的根系干物质量大于水肥异区处理,而在上干下湿方式下则相反;不同水肥耦合处理的根系干物质量差异不显著.不同湿润方式、施肥方式及水肥空间耦合处理对地上部干物质量和总干物质量的影响与根系干物质量一致.这表明无论在何种湿润方式下,上层土壤(0~35 cm)较充分的氮磷配合供应,有利于提高冬小麦的生物量.

不同湿润方式和施肥方式的根冠比差异不显著,但水肥同区处理的根冠比高于水肥异区处理.上干下湿方式的水分利用效率显著高于整体湿润和上湿下干方式,分别增加了49.4%和55.3%;与整体施肥和下层施肥方式相比,上层施肥方式的水分利用效率分别降低了11.9%和11.7%;水肥同区处理的水分利用效率高于水肥异区处理,平均增加了6.5%.

上层土壤含水量越高,水分利用效率越低,上层土壤含水量越低,水分利用效率越高.上湿下干处理产量最高,但其水分利用不经济,即上层土壤(0~

表2 不同水肥耦合方式对冬小麦叶面积的影响  
Tab.2 Effects of different water and fertilizer coupling modes on leaf area of winter wheat (cm<sup>2</sup>)

湿润方式 Wetting mode	施肥方式 Fertilization mode	分蘖期 Tillering stage	拔节期 Jointing stage	扬花-灌浆期 Flowering-filling stage
W	S	26.64b	36.23a	43.08a
	X	20.63bc	36.80a	41.40ab
	Z	26.24b	37.73a	40.42abc
A	S	36.55a	39.90a	40.53abc
	X	17.49c	33.80a	42.85a
	Z	36.31a	33.02a	35.39bc
B	S	35.83a	40.64a	42.10a
	X	20.69bc	39.93a	36.38bc
	Z	41.60a	39.77a	42.37a
F 值	湿润方式 Wetting mode	7.67 **	0.86	4.77
F value	施肥方式 Fertilization mode	28.95 **	0.14	3.29
	湿润方式×施肥方式 Wetting×fertilization	3.81 *	0.18	1.17

35 cm)充分灌水有利于产量的提高,但是水分利用效率较低,上干下湿处理产量有不同程度降低,但水分利用效率较高. 上层土壤充分的养分供应有利于提高冬小麦水分利用效率和产量.

2.4 不同水肥耦合方式对冬小麦产量和收获指数的影响

由表 4 可以看出,水肥条件对产量构成要素的影响不同. 比较各水肥空间耦合处理的差异发现,不同处理的千粒重没有显著差异,而不同处理的单穗粒数差异明显,与上干下湿方式相比,上湿下干和整体湿润方式的冬小麦单穗粒数分别平均增加了 41.7% 和 61.9%. 上层施肥和整体施肥方式的单穗粒数高于下层施肥方式. 穗粒重与单穗粒数的变化趋势一致,不同水肥耦合处理单穗粒数的差异与产量的差异一致,穗粒重和单穗粒数(自变量)与产量

(因变量)的线性相关分别达到显著水平,说明在本试验条件下,不同水肥耦合处理主要通过影响单穗粒数而影响产量.

不同湿润、施肥方式及水肥空间耦合处理对冬小麦产量产生显著影响. 从不同湿润方式来看,上干下湿方式的籽粒产量低于整体湿润和上湿下干方式,分别平均降低了 24.8% 和 31.7%. 上层湿润方式对产量贡献最大,与整体施肥方式耦合产量最高. 从不同施肥方式来看,下层施肥方式的籽粒产量低于整体施肥和上层施肥方式,分别降低了 13.3% 和 8.7%,其中下层施肥、上干下湿耦合处理(AX)的产量最小. 从不同水肥空间耦合方式看,在上干下湿方式下,水肥同区处理的籽粒产量低于水肥异区处理,而在上湿下干方式下则相反,这与根系干物质量、地上部干物质量和总干物质量的变化趋势一致.

表 3 不同水肥耦合方式对冬小麦干物质累积和水分利用效率的影响  
Tab.3 Effects of different water and fertilizer coupling modes on biomass accumulation and water use efficiency of winter wheat

湿润方式 Wetting mode	施肥方式 Fertilization mode	根系干物质量 Root dry mass (g)	地上部 干物质量 Shoot dry mass (g)	总干物质量 Total dry biomass (g)	根冠比 Ratio of root to shoot	水分利用效率 Water use efficiency
W	S	0.16ab	1.14bc	1.30bc	0.14a	1.65b
	X	0.14ab	1.17bc	1.31bc	0.12ab	1.42b
	Z	0.15ab	1.49a	1.64a	0.10b	1.63b
A	S	0.13ab	1.29ab	1.42ab	0.11b	2.43a
	X	0.06c	0.53d	0.59d	0.12ab	2.12a
	Z	0.12ab	0.99c	1.11c	0.12ab	2.47a
B	S	0.15ab	1.35ab	1.50ab	0.11b	1.55b
	X	0.13ab	1.31ab	1.44ab	0.10b	1.43b
	Z	0.17a	1.43ab	1.60ab	0.12ab	1.54b
F 值	湿润方式 Wetting mode	16.72 **	34.21 **	42.75 **	1.79	53.15 **
F value	施肥方式 Fertilization mode	10.54 **	17.98 **	23.03 **	0.18	37.62 **
	湿润方式×施肥方式 Wetting× fertilization	2.67	12.38 **	13.78 **	5.63	33.0 **

表 4 不同水肥耦合方式对冬小麦产量和收获指数的影响  
Tab.4 Effects of different water and fertilizer coupling modes on yield and harvest index of winter wheat

湿润方式 Wetting mode	施肥方式 Fertilization mode	千粒重 1000-grain mass (g)	穗粒重 Panicle mass (g)	穗粒数 Grain number per spike	每管产量 Yield per column (g)	收获指数 Harvest index
W	S	36.26a	1.13bc	27.45b	10.66b	0.40a
	X	35.37a	0.93d	22.45d	8.85d	0.36ab
	Z	37.16a	1.09bc	25.67c	10.27c	0.35abc
A	S	34.12ab	0.73f	17.33f	7.96e	0.26d
	X	34.19ab	0.73f	15.33g	6.41f	0.40a
	Z	34.31ab	0.84e	20.67e	8.01e	0.30cd
B	S	35.82a	1.07c	26.23c	10.02c	0.32bc
	X	36.11a	1.16b	28.34ab	10.87b	0.35abc
	Z	36.18a	1.28a	31.78a	11.87a	0.35abc
F 值	湿润方式 Wetting mode	9.76	519.32 **	1808.96 **	2108.50 **	14.65 **
F value	施肥方式 Fertilization mode	3.39	56.43 **	195.32 **	147.80 **	13.88 **
	湿润方式×施肥方式 Wetting× fertilization	4.53	27.09 **	108.59 **	198.49 **	16.26 **

收获指数(HI)指收获的穗部籽粒产量与地上部干物质质量之比,它与作物物质生产、分配及器官的发育建成有关。本试验各处理 HI 变化在 0.26 ~ 0.40,差异显著,说明供试品种 HI 稳定性不高,易受水肥条件的影响。统计分析表明(表 4),上干下湿方式的 HI 显著小于整体湿润和上湿下干方式,平均降低了 14.0% 和 5.9%,这与生物量和籽粒产量的结果一致;上层施肥和整体施肥方式的 HI 差异不显著,但二者均显著低于下层施肥方式。这主要与供试土壤养分严重缺乏,上层土壤(0 ~ 35 cm)充足的养分供应显著促进了作物地上部生长,特别是茎叶的生长,从而使 HI 下降,但籽粒产量仍以上层施肥和整体施肥方式最高;不同耦合处理的 HI 以上干下湿、上层施肥耦合处理最小,但水肥同区处理的 HI 均较高。

### 3 讨 论

叶片是小麦进行光合作用的主要场所,对产量和穗粒重有重要影响,尤其是旗叶不仅处于接受光照的有利地位,又是光合作用最活跃的中心,对穗部光合产物积累的贡献最大。王竹林等<sup>[16]</sup>、史志诚<sup>[17]</sup>的研究表明,小麦叶面积与干物质累积存在密切关系,且旗叶宽度比长度对产量的影响更大。可见,小麦总叶面积、抽穗后旗叶面积等是小麦生长过程中的重要形态指标。一般认为,氮、磷营养显著影响小麦叶面积、株高及产量等。本试验表明,不同水肥空间耦合方式对冬小麦株高、叶面积、产量等有显著影响。上干下湿的湿润方式和下层施肥方式不同程度地降低了冬小麦的株高、叶面积及产量等形态指标,这与王同朝等<sup>[18]</sup>的研究结果类似。

根冠比是指作物地下部分与地上部分的鲜质量或干质量的比值,反映干物质在地上和地下的分配情况。过小的根冠比因得不到足够的水分和养分而限制作物生长,但过大的根冠比也会因根部消耗过多的同化物而限制产量。本研究发现,不同的湿润方式、施肥方式及其空间耦合方式对根冠比的影响不同。不同湿润方式和施肥方式的根冠比没有显著差异,但下层施肥方式的地上部干物质质量和根系干物质质量均小于整体施肥和上层施肥方式。因此,下层施肥方式较高的根冠比是建立在地上部生物量和根系生物量均较小的基础上。水肥同区处理的根冠比高于水肥异区处理。

收获指数是籽粒产量与同化物总量之比,反映着同化物向籽粒的分配效率。Sinclair<sup>[19]</sup>研究指出,小麦育种已从长期以来单纯重视籽粒产量及其构成因素,发展到关注收获指数和生物产量。本试验发现,上干下湿方式在降低小麦生物量和产量的同时,也降低了收获指数;下层施肥方式的收获指数虽然最大,但产量仍以上层施肥和整体施肥方式最高;对不同水肥方式空间耦合而言,水肥同区的收获指数大于水肥异区。

水分利用效率是指植物消耗单位水量所产生的同化物的量,反映了植物生产过程中的能量转化效率。本研究发现,上干下湿方式降低了产量,但水分利用效率大幅度提高;上层施肥和整体施肥方式的产量和水分利用效率均高于下层施肥方式,这与邢维芹等<sup>[11]</sup>的研究结果一致。从生产实践角度考虑,由于氮肥最终产物是以硝态氮为主,而硝态氮容易因淋洗而向下移动(本试验设置了 2 cm 沙石层,阻断了硝态氮的迁移),而磷不易在土壤中移动。因此,无论何种湿润方式,氮磷施肥时,仍需施入土壤上层(0 ~ 35 cm),这与沈玉芳等<sup>[13]</sup>的结论类似。因为根系主要分布在该土层,通过根系的提水和吐水作用,可促进作物对相对干旱土层养分和水分的吸收、利用<sup>[20-21]</sup>。

### 参考文献

- [1] Wang D-S (汪德水). The Relationship Principle and Regulation Techniques of Fertilizer and Water in Non-Irrigated Farmland. Beijing: China Agriculture Press, 1995 (in Chinese)
- [2] Guo A-H (郭安红), Li F-M (李凤民), Li Z-X (李召祥), et al. Effect of top soil drought and root signals on yield formation of spring wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1999, **10**(6): 689-695 (in Chinese)
- [3] Ma Q (马 强), Yu W-T (宇万太), Shen S-M (沈善敏), et al. Research advances in water-fertilizer effect on dry land farmland. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(3): 665-673 (in Chinese)
- [4] Longnecker N, Kirby EJM, Robson A. Leaf emergence, tiller growth and apical development of nitrogen deficient spring wheat. *Crop Science*, 1993, **33**: 154-160
- [5] Zhang F-X (张凤翔), Zhou M-Y (周明耀), Xu H-P (徐华平), et al. Effects of water and fertilizer coupling on growing and yield of winter wheat. *Journal of Water*

- Resources and Architectural Engineering* (水利与建筑工程学报), 2005, **3**(2): 22–24 (in Chinese)
- [6] Rodriguez D, Goudriaan J. Effects of phosphorus and drought stresses on dry matter and phosphorus allocation in wheat. *Journal of Plant Nutrition*, 1995, **18**: 2501–2517
- [7] Zhang L (张璐), Shen S-M (沈善敏), Yu W-T (宇万太). Response of crop yields to fertilization in different precipitation years and estimates of water and nutrient interaction. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(12): 2205–2207 (in Chinese)
- [8] Qi Y-L (祁有玲), Zhang F-C (张富仓), Li K-F (李开峰). Effects of water deficit and nitrogen fertilization on winter wheat growth and nitrogen uptake. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(10): 2399–2405 (in Chinese)
- [9] Benjamin JG, Porter IK, Duke HR, *et al.* Corn growth and nitrogen uptake with furrow irrigation and fertilizer bands. *Agronomy Journal*, 1997, **89**: 609–612
- [10] Li Z-J (李志军), Zhang F-C (张富仓), Kang S-Z (康绍忠). Impacts of the controlled roots-divided alternative irrigation on water and nutrient use of winter wheat. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2005, **21**(8): 17–21 (in Chinese)
- [11] Xing W-Q (邢维芹), Wang L-Q (王林权), Luo Y-M (骆永明), *et al.* Effect of spatial coupling between irrigation water and fertilizer on corn in semiarid area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2002, **18**(6): 46–49 (in Chinese)
- [12] Hu T-T (胡田田), Kang S-Z (康绍忠), Zhang F-C (张富仓). Effects of local irrigation on absorption and use of nitrogen from different root zones of maize. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2005, **38**(11): 2290–2295 (in Chinese)
- [13] Shen Y-F (沈玉芳), Li S-Q (李世清), Shao M-A (邵明安). Effects of spatial coupling of watering and fertilization on winter wheat photosynthetic characteristics and grain yield. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(10): 2256–2262 (in Chinese)
- [14] Shen Y-F (沈玉芳), Li S-Q (李世清), Shao M-A (邵明安). Effects of water and fertilizer spatial coupling on nitrogen and phosphorus validity and yield effect of winter wheat. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(6): 2698–2706 (in Chinese)
- [15] Liu Z-X (刘作新), Zheng Z-P (郑昭佩), Wang J (王建). Effect of interaction between water and fertilizer on wheat and maize semiarid region of western Liaoning. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2000, **11**(4): 540–544 (in Chinese)
- [16] Wang Z-L (王竹林), Liu S-D (刘曙东), He P-R (何培茹). Studies on the traits of grain filling in hybrid wheat with *Ae. kotschy* cytoplasm. *Journal of Northwestern Agricultural University* (西北农业大学学报), 1997, **25**(3): 36–40 (in Chinese)
- [17] Shi Z-C (史志诚). An application and extension of corn and wheat mulch technology in Shaanxi Province. *Journal of Northwestern Agricultural University* (西北农业大学学报), 1998, **26**(6): 75–79 (in Chinese)
- [18] Wang T-C (王同朝), Li F-M (李凤民), Wang J (王俊), *et al.* Influence of water supply and phosphorus application in different depth on photosynthetic efficiency, dry matter partitioning and water use efficiency of spring wheat. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 1999, **23**(2): 177–185 (in Chinese)
- [19] Sinclair TR. Historical changes in harvest index and crop nitrogen accumulation. *Crop Science*, 1998, **38**: 634–638
- [20] Itoh S. In situ measurement of rooting density by micro-rhizotron. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1985, **31**: 653–656
- [21] Caldwell MM, Richards JH. Hydraulic lift: Water efflux from upper roots improves effectiveness of water up-take by deep roots. *Oecologia*, 1989, **79**: 1–5

---

**作者简介** 李开峰,男,1981年生,硕士.主要从事节水灌溉理论与技术研究. E-mail: likf2006@163.com

**责任编辑** 张凤丽

---