第 40 卷 第 5 期
2003 年 9 月

土 壤 学 报
ACTA PEDOLOGICA SINICA

Vol. 40, No. 5
Sep., 2003

不同灌溉策略下冬小麦根系的分布与水分养分的空间有效性*

刘 坤 陈新平† 张福锁
(中国农业大学植物营养系, 北京 100094)

摘 要 通过田间试验研究了少量多次和少次多量的灌溉方式下冬小麦根系的分布与水分养分的空间有效性。结果表明: 少量多次的灌溉方式降低了冬小麦返青后表层根系的生长, 减少了拔节后该层根系的衰退。在少次多量的灌溉方式下返青期不灌水促进了表层根系的生长, 然而拔节后该层根系衰退较多, 但中层(30~ 60 cm) 根系生长高于少量多次的灌溉方式。不同灌溉策略下根系分布的差异并不影响冬小麦对土壤水分和养分的吸收, 由于播前土体内蓄水不足, 三种灌溉方式下 0~ 90 cm 土壤可用水在收获后均消耗殆尽。灌溉促进了表层硝态氮的吸收和向下迁移, 但两种灌溉方式下硝态氮在土体内的迁移均未超出 60 cm 土体, 仍在根层之内。而不同的灌溉方式对冬小麦全生育期内土体速效磷钾的分布没有影响。扬花前两种灌溉方式下冬小麦的生长发育和养分的吸收并无差异, 扬花后少次多量的灌溉方式由于水分供应不足, 影响了灌浆, 降低了千粒重, 进而影响了产量, 同时土壤水分缺乏也减少了该时期养分的吸收。而在少量多次的灌溉方式下, 扬花后灌水不仅可以促进冬小麦灌浆, 提高千粒重, 而且增加了对养分的吸收。

关键词 冬小麦, 根长密度, 土壤水分, 硝态氮
中图分类号 S27, S512 1

冬小麦的合理灌溉是我国农业生产中的一个重要问题。合理的灌溉策略不仅要求满足作物的水分需求, 还应协调作物根系生长与土壤水分、养分分布的时空关系, 以提高水分、养分利用效率。有关灌溉对作物根系分布及水分养分空间有效性的影响, 国际上已有一些报道[1, 2]。在国内, 以测定土壤水分含量来指导冬小麦水分需求的少量多次的优化灌溉方式—策略 I [3], 和从栽培学的角度出发, 促使根系下扎, 从而利用深层次中的水分和养分的少次多量的节水灌溉方式—策略 II[4], 均在生产中获得了高产。策略 I 能够促进冬小麦利用表层土壤中的养分, 但可能对中下层土壤中的水分和养分利用较少。虽然策略 II 能促进冬小麦利用土壤深层次中的水分和养分, 达到节约灌溉水的目的, 但深层中水分、养分的贡献却无定量化的描述; 而且表层土壤的干旱可能会抑制该层养分的吸收, 是否会对冬小麦养分的吸收造成影响, 仍是一个疑问。虽然也有报道: 作物能从深层土壤中吸收水分, 释放到表层来活化上层土壤中的养分[5, 6], 但在冬小麦田间是否有此补偿效应及对冬小麦养分吸收的贡献如何还未见报道。

本文旨在通过分析这两种灌溉模式—策略 I (少量多次) 和策略 II (少次多量) 对冬小麦根系生长和分布、土壤水分养分的变化以及地上部生长和养分吸收的影响, 来探讨北京地区合理的灌溉模式及与灌溉策略相对应的施肥技术和方法。

1 材料与方法

试验于 1999~ 2000 年在中国农业大学北京市海淀区东北旺试验基地进行。前茬作物为夏玉米。供试土壤为壤质潮土。表层 0~ 30 cm 土壤有机质含量为 2.66 g kg^{-1}, 全氮为 1.16 g kg^{-1}, Olsen-P 为 33.2 mg kg^{-1}, 交换性钾 143.1 mg kg^{-1}。冬小麦(品种为农大 3291) 于 1999 年 10 月 13 号 20 cm 等行距条

* 国家自然科学基金项目(300070451) 和北京市自然科学基金重大项目(6980001) 资助
† 通讯作者 E-mail: chenxp@mail.cau.edu.cn
收稿日期: 2001- 12- 19; 收到修改稿日期: 2002- 10- 22

播，基本苗为 4.14× 10^6 hm^{-2}。播前施入N 92 kg hm^{-2}、P_2O_5 104 kg hm^{-2}和 K_2O 90 kg hm^{-2}，在拔节期追施N 86 kg hm^{-2}。试验设有3 个灌溉处理(表1)，其中策略Ⅰ为少量多次的灌溉模式，策略Ⅱ为少次多量的灌溉模式，限水灌溉为对照处理，每个处理重复 4 次，小区面积为 $48m^2$。在试验期间降水稀少，冬小麦全生育期内降水量仅为 69.2 mm，而且降水强度小，最大的一次降水为 17.1 mm。

表 1 灌溉水平

Table 1 Irrigation levels(mm)

	灌水时间 Date	限水灌溉 Sub-optimal	策略Ⅰ Strategy Ⅰ	策略Ⅱ Strategy Ⅱ
冬前	1999-11-20	90	90	90
返青	2000-03-19		63	
拔节	2000-04-17	75	50	80
孕穗	2000-05-05		50	70
扬花后一周	2000-05-24		50	
全生育期		165	303	240

在返青、拔节、扬花期及收获后分别进行土壤、植株的取样测定。土壤取样用土钻每 30 cm 为一层取至 90 cm，土壤新鲜样用 $CaCl_2$ 浸提后，用流动分析仪测定 NO_3^--N 含量，风干样用于速效磷钾的测定。收获时取 5.4 m^2 样方测产，其它生育期植物样方为 1 m^2。植株 105 ℃杀青 30 min 后，65 ℃恒温下烘干，用于生物量和养分含量的测定。根系用直径为8 cm 的根钻在小麦行间分层取根样，取样深度与根深保持一致，每个小区取 5 钻混合样(收获期未取根样)。根样用水冲洗过 0.05 mm 网筛，挑出杂质，称重法测定根重，交叉网格法测定根长密度[7]。植株氮磷钾的全量及土壤速效养分的测定均采用常规方法。试验数据均采用 SAS 中的 ANOVA 程序进行显著性比较。

2 结果与分析

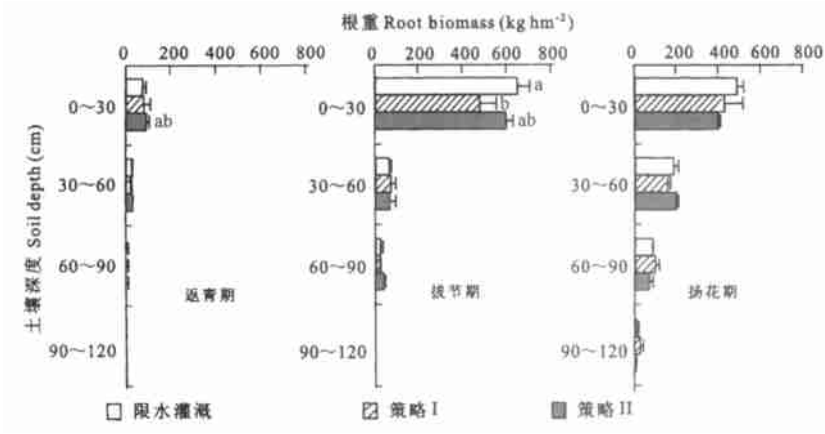
2.1 不同灌溉策略下根系的生长与分布

在返青期各灌溉策略 0~60 cm 土层根系的生物量无差异(图 1)。拔节期少量多次处理(策略Ⅰ)表层0~30 cm 根系生物量低于少次多量处理(策略Ⅱ)和限水灌溉处理，并和限水灌溉处理之间差异达显著性水平；而 3 个处理中下层(30~90 cm)根系的生长并无差异，这表明返青期灌水降低了表层土壤中根系的生长。在扬花期少量多次处理表层土壤中根系生物量比拔节期降低了 10%左右，而限水灌溉和少次多量处理则各降低了 24%和 33%，其中少量多次处理在此期间表层根系的衰退显著低于少次多量处理，这说明少量多次的灌水方式有助于降低拔节~扬花期间表层根系的衰退。在扬花期表层土壤中少次多量处理的生物量最低；中层土壤中少次多量处理根系的生长量略高于限水灌溉，大大高于少量多次处理，虽未达到显著性差异，但少次多量处理该层根系生物量占 0~120 cm 土层总量的比例却显著高于少量多次处理；而在扬花期各处理 60 cm 以下根系的生长无差异。这表明少次多量的灌溉方式促进了中层(30~60 cm)根系的生长。

2.2 不同灌溉策略下土壤各层含水量的变化

由于返青期灌水，拔节期少量多次处理(策略Ⅰ) 0~60 cm 土层的水分含量显著高于少次多量处理(策略Ⅱ)和限水灌溉处理(图 2)，在 60~90 cm 土层少量多次处理的水分含量仍为最高，但只与少次多量处理之间差异达显著性水平。同返青期相比，拔节期各处理 0~60 cm 土壤水分含量均有降低，而在 60~90 cm 土层少次多量处理和限水灌溉处理的水分含量变化很小，由此可以推断，返青到拔节期间 0~60 cm 土层是主要的供水层，这与根系的分布较为一致。

在扬花期少次多量处理(策略Ⅱ) 0~60 cm 土壤水分含量显著高于少量多次处理(策略Ⅰ)，少量多次处理又显著高于限水灌溉处理；在 60~90 cm 土层少量多次处理和少次多量处理之间土壤水分含量差异变小，但均显著高于限水灌溉，可见孕穗期灌水 50~80 mm 增加了 0~90 cm 土壤水分含量。孕穗



注: 不同小写字母表示 LSD 检验 5% 差异显著, 下同

图 1　不同灌溉策略对冬小麦各生育期剖面中根系生长的影响

Fig. 1　Effect of different irrigation strategies on root growth of winter wheat

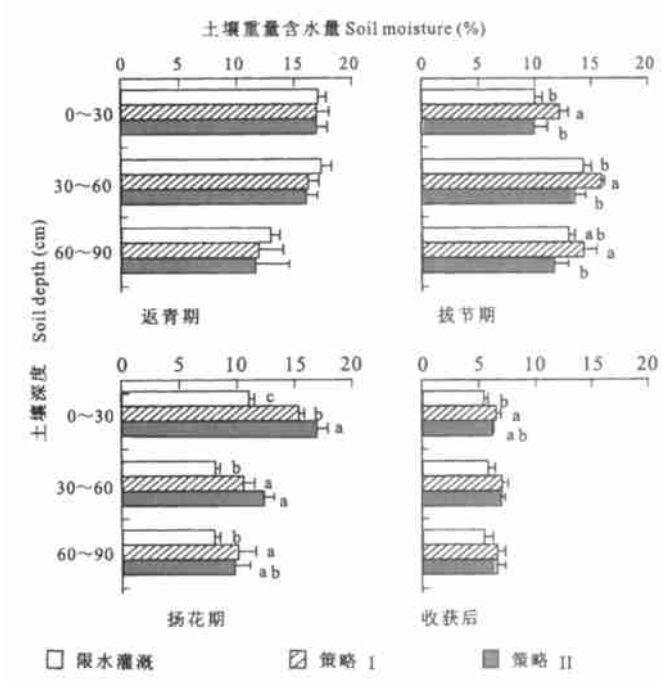


图 2　不同灌溉策略下冬小麦各生育期土壤水分含量的变化

Fig. 2　Soil moisture dynamic state of winter wheat of different irrigation strategies

期灌水使得少量多次处理和少次多量处理表层含水量均高于拔节期, 但中下层土壤水分含量仍有较大幅度的降低, 这说明拔节至扬花期间中下层的水分大量为冬小麦所利用, 0~ 90 cm 土层是拔节至扬花期间主要的供水层; 而限水灌溉处理各层土壤已接近田间萎蔫系数(由于取样前大气降水, 故表层水分含量高于中下层), 这说明拔节期灌水 75mm 不能持续满足冬小麦在扬花期之后的水分需求。

收获后各层水分含量均以少量多次处理(策略Ⅰ) 最高, 少次多量处理(策略 Ⅱ) 居中, 限水灌溉处理最低, 除了在表层少量多次处理和限水灌溉处理之间差异显著, 其它均未达显著性水平。而且 3 个

处理各层水分含量均降到田间萎蔫系数以下，这说明扬花后各处理麦田的水分供给均小于冬小麦的需水量。

2.3 不同灌溉策略下土壤中速效养分的分布

2.3.1 不同灌溉策略下冬小麦土体内硝态氮的动态变化 如图3所示，返青期土壤各层硝态氮差异不大；在拔节期土体中硝态氮含量明显降低，尤其是0~60 cm土层；少量多次处理(策略Ⅰ)在0~30 cm土层硝态氮含量低于限水灌溉和少次多量处理(策略Ⅱ)，而在30~60 cm土层则略高于限水灌溉和少次多量处理，但在60~90 cm土层三者硝态氮含量无差异。氮肥的施用和有机氮的矿化，使得扬花期土壤各层硝态氮含量比拔节期大有增加，少次多量处理表层的硝态氮含量低于少量多次处理和限水灌溉处理，而在30~60 cm则略高于少量多次处理和限水灌溉处理，在60~90 cm土层的硝态氮含量三者差异较小。由上述分析可见，返青期和拔节期的灌水使得表层的硝态氮含量低于不灌水或少灌水处理，一是由于表层水分含量增加促进了根系对硝态氮的吸收，二是因为灌水引起表层硝态氮向下迁移，但在本试验的灌水量下，硝态氮迁移均未超过60 cm土层。

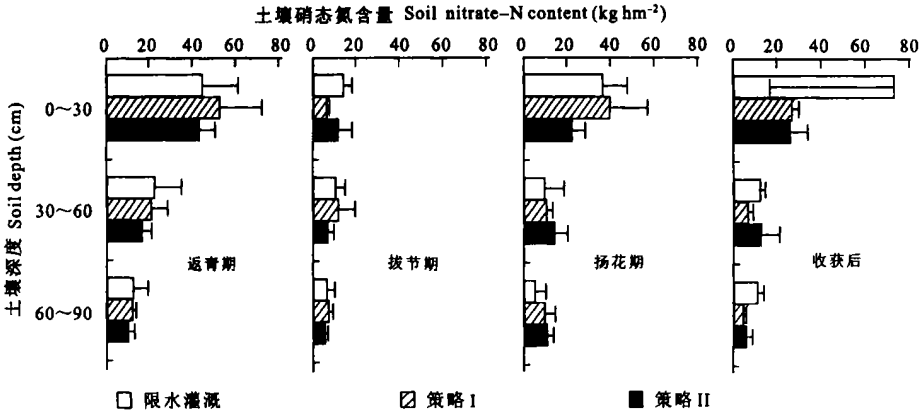


图3 不同灌溉策略下冬小麦各生育期土体内硝态氮的分布

Fig. 3 Nitrate nitrogen distribution of winter wheat under different irrigation strategies

收获后，限水灌溉处理0~30 cm土层中硝态氮的含量大大高于少量多次处理(策略Ⅰ)和少次多量处理(策略Ⅱ)，并且变异很大，这是由于扬花后表层土壤水分的缺乏降低了硝态氮的移动性，进而降低了其空间有效性，造成了表层硝态氮的高残留和高的空间变异性。在中下层(30~60 cm)少量多次处理的硝态氮含量低于限水灌溉和少次多量处理，这表明扬花后灌水促进了0~90 cm土壤氮素的吸收，减少了土壤中硝态氮的残留。

2.3.2 不同灌溉策略下冬小麦土体内有效磷和可交换性钾的动态变化 本研究的结果表明，表层土壤有效磷和交换性钾的含量大大高于中下层。在冬小麦的各生育期3个灌溉策略下各层土体内有效磷和交换性钾的含量并无显著差异，灌溉策略对土体内有效磷和交换性钾的分布并无影响。

2.4 不同灌溉策略对冬小麦的生长及产量构成的影响

由图4可以看出，在返青和拔节期3种灌溉策略下冬小麦地上部的生长没有差异，这说明返青期不灌水并不影响冬小麦在返青至拔节期地上部的生长。在扬花期少量多次处理(策略Ⅰ)的生物量高于少次多量处理(策略Ⅱ)，而少次多量处理又高于限水灌溉处理，但差异未达显著性水平；收获时，少量多次处理的生物量最高，并与限水灌溉之间差异达显著性水平。其中，少次多量处理秸秆的生物量高于少量多次处理和限水灌溉。而少量多次处理的产量显著高于少次多量处理和限水灌溉处理(表2)，各处理间穗数差异很小；而少次多量处理的穗粒数略高于少量多次处理和限水灌溉处理；但少量多次处理的千粒重则大大高于少次多量处理和限水灌溉处理，并和限水灌溉之间达显著性水平。收获指数以少量多次处理最高。

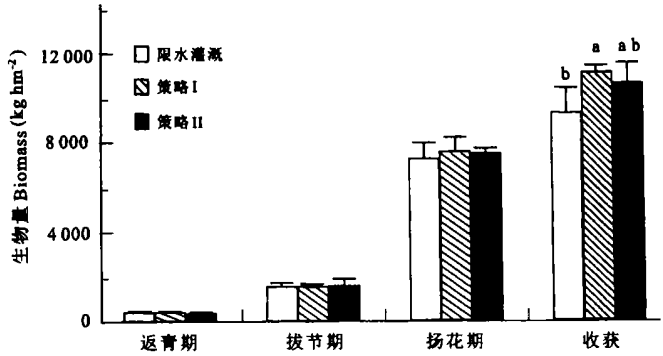


图 4　不同灌溉策略冬小麦各生育期生长的影响

Fig. 4　Effect of different irrigation strategies on growth of winter wheat

表 2　不同灌溉策略下冬小麦的产量及构成因素

Table 2　Winter wheat yield and its constituents under different irrigation strategies

处理 Treatments	穗数 Ear number(m^{-2})	穗粒数 Grains/ ear	粒重 Kernel weight(mg)	产量 Yield(kg hm^{-2})	收获指数 Harvest index
限水灌溉	571a	30.9a	31.7b	3299b	0.35
策略 I	585a	29.6a	37.1a	4521a	0.40
策略 II	566a	32.2a	34.4ab	3600b	0.33

决定穗数主要在分蘖和返青期, 各处理间穗数无差异, 表明拔节之前各灌溉策略的供水均可满足该时期对水分的需求, 可见返青期不灌水, 并不影响成穗数。而穗粒数主要决定于挑旗后期, 由于在拔节至扬花期间少次多量处理的灌水高于少量多次处理和限水灌溉处理, 故而保证了决定穗粒数的关键时期的供水, 穗粒数最多, 这也说明限水灌溉在拔节至扬花期的灌水 75mm 不能满足冬小麦水分需求, 进而影响了小花的形成和最终的穗粒数; 而少量多次处理在此阶段和少次多量处理之间耗水量相差不大, 但穗粒数明显低于少次多量处理, 这可能是由于返青期灌水促进了分蘖的生长, 在拔节至扬花阶段这些分蘖与主茎争夺水分和养分, 进而影响了后期主茎的小花分化和穗粒数。而花后少次多量处理和限水灌溉未灌水使得灌浆受到抑制, 大大降低了千粒重, 最终影响了产量, 这也是少次多量处理和限水灌溉产量低于少量多次处理的主要原因。

2.5　不同灌溉策略下冬小麦对养分的吸收

如图 5 所示, 在扬花之前各灌溉策略下冬小麦对氮磷钾的吸收并无差异。收获时少次多量处理(策略 II)的总吸氮量最高, 并和限水灌溉处理之间差异达显著性水平。而少量多次处理(策略 I)的总吸磷量高于少次多量处理和限水灌溉处理。限水灌溉处理的总吸钾量显著低于少量多次处理和少次多量处理。

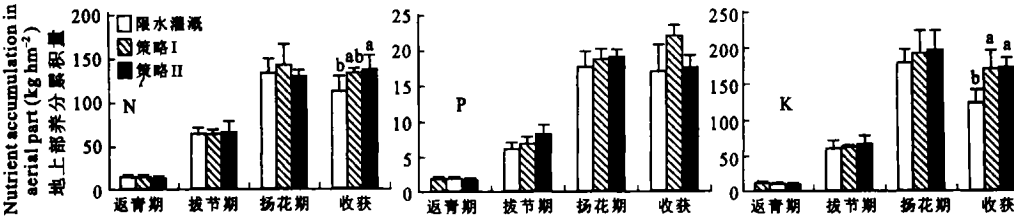


图 5　不同灌溉策略下各生育期冬小麦地上部氮磷钾累积量

Fig. 5　N, P and K accumulation in aerial part of winter wheat during growth stages under different strategies

3 讨 论

3.1 两种灌溉策略的评价

在本试验中,少量多次处理(策略Ⅰ)取得了最高产量,但从本试验的结果来看,其灌溉的分配仍不理想,尚有待改进。主要表现在:(1) 返青水(63 mm)非但对冬小麦生长发育、养分吸收及产量均无明显的促进作用,反而增加了冬小麦在此期间的耗水量;(2) 拔节至扬花期两次灌水共100 mm,尚不足以保证穗粒数;(3) 扬花后一周灌水50 mm有利于灌浆,增加了千粒重,但其千粒重仍低于该品种正常年份的千粒重,说明后期灌水的数量在试验中干旱的气候年型下仍不能充分满足冬小麦生育后期的需水。

少次多量处理(策略Ⅱ)在返青期不灌水,给冬小麦适度的水分胁迫,并不影响地上部的生长发育,反而增加了返青后表层根系的生长,说明其前期的灌水策略是合理的。该处理重点供应拔节孕穗水,其穗粒数最高,说明其中期的策略也较为合理。但是,后期(灌浆期)供水不足影响了灌浆,导致了千粒重降低,而正是由于千粒重的差异,该处理的经济产量显著低于少量多次处理。

因此,保证拔节至收获期间的水分供应是保证冬小麦高产稳产的关键。由于在拔节之前冬小麦耗水强度低,在冬前灌足冬水的情况下,土壤水分的供给可维持至拔节期[8],返青至拔节适度的水分亏缺不但不影响冬小麦地上部的生长,反而促进了拔节和扬花后冬小麦营养体的生长和养分的吸收[9]。而在拔节至扬花阶段,是冬小麦对水分养分需求量最大的时期,也是水分最敏感的时期,此时期缺水往往会影响冬小麦的生长和产量的形成[10,11]。而扬花之后,冬小麦的耗水强度仍很大,如果后期土壤水分供应不足,将会影响灌浆致使千粒重降低,进而降低了产量[12]。

3.2 冬小麦不同灌溉策略下根系的分布与水分、养分的空间有效性

播种至拔节,冬小麦根系主要分布在0~30 cm土层,各灌溉策略下表层土壤水分含量较高,硝态氮和速效磷钾也主要分布在此层,故前期的土壤条件有利于冬小麦的生长。

在拔节后0~60 cm是主要的根层,但表层0~30 cm的根系仍占80%以上,这段时期是冬小麦大量消耗水分和养分的时期,耗水强度大,表层土壤容易干旱。少量多次的灌溉方式能够促进表层中养分的吸收;而少次多量的灌溉虽然增加了中下层根系的生长,但在此灌溉方式下,表层土壤容易干旱,水分和养分的吸收层次发生错位,因此容易降低对表层土壤中养分的吸收。

三种灌溉方式在灌浆期均因水分供应不足影响了养分的吸收,但对磷的影响小于氮。这是由于氮素(NO_3^-)主要以质流的方式被植物吸收,表层土壤水分的缺乏降低硝态氮的移动性,影响了氮的吸收,加上后期植物氮素的挥发及叶子脱落,故而扬花后氮的累积增加很小甚至下降(限水灌溉)。而磷主要以截获的方式被植物吸收,表层速效磷含量高,根长密度大,故而土壤水分的缺乏对于磷的吸收影响较小,因而扬花后各灌溉策略下磷的累积仍有一定净增长。少量多次处理扬花后灌水显著促进了冬小麦籽粒对养分的吸收,对于少次多量处理和限水灌溉处理而言,表层富含速效养分和大量的根系,而水分的缺乏限制了养分的迁移,降低了该层养分的空间有效性,虽然中下层土壤相对湿润,但由于根长密度小,有效养分含量低,养分的空间有效性,尤其是磷钾低,这是影响冬小麦后期养分吸收的主要原因。因此在北京地区后期高温干燥的气候条件下,扬花后一定量的灌水仍是保证灌浆期的生长和养分的吸收,增加产量所必不可少的措施。

参考文献

1. Proffitt A P B, Berliner P R, Osterhuis D M. A comparative study of root distribution and water extraction efficiency by wheat grown under high-and low-frequency irrigation. Agronomy Journal, 1985, 77(5): 655~662
2. Kaetterer T, Hansson A C, Andren O. Wheat root biomass and nitrogen dynamics: Effects of daily irrigation and fertilization. Plant and Soil, 1993, 151: 21~30
3. 李子忠, 龚元石. 冬小麦农田水分循环规律及节水调控机理. 中国农业大学学报, 1997, 2(增刊): 111~116
4. 兰林旺等编著. 小麦节水高产研究. 北京: 北京农业大学出版社, 1995. 1~50
5. 樊小林, 曹新华, 郭立彬, 等. 根系提水作用的土壤水分变异及养分有效性. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(4): 71~76

6. 樊小林, 李生秀. 植物根系的提水作用. 西北农业大学学报, 1997, 25(5): 75~ 81
7. 马元喜主编. 小麦的根. 北京: 中国农业出版社, 1999. 147~ 160
8. 李建民, 王璞, 周殿玺, 等. 冬小麦灌溉制度对土壤贮水利用的影响. 生态农业研究, 1999, 7(1): 54~ 57
9. 马瑞昆, 蹇家利, 刘淑珍, 等. 冬小麦推迟春季首次灌水后不同品种的产量及水分利用效率. 华北农学报, 1995, 10(4): 20~ 25
10. 冯广龙, 罗远培, 杨培岭. 节水灌溉对冬小麦干物质分配、灌浆及水分利用率的影响. 华北农学报, 1998, 13(2): 11~ 17
11. 王俊儒, 李生秀. 不同生育时期水分有限亏缺对冬小麦产量及其构成因素的影响. 西北植物学报, 2000, 20(2): 193~ 200
12. 张喜英, 由懋正, 王新元. 不同时期水分调亏及不同调亏程度对冬小麦产量的影响. 华北农学报, 1999, 14(2): 79~ 83

WINTER WHEAT ROOT DISTRIBUTION AND SOIL WATER AND NUTRIENT AVAILABILITY

Liu Kun　Chen Xin-ping　Zhang Fu-suo

(Department of Plant Nutrition, China Agricultural University, Beijing　100094, China)

Summary

Field experiment was conducted to investigate root distribution of winter wheat and the spatial availability of soil water and nutrients under different irrigation strategies: High frequency with low amounts (HL) and low frequency with high amounts (LH). The results showed: HL decreased root growth in topsoil after regreening, but reduced root decline after shooting, while LH increased root growth in topsoil but root decline was higher after shooting. Furthermore, in subsoil layer (30~ 60 cm) root biomass and root length density of LH were higher than those of HL. Change of soil moisture was solely resulted from irrigation. Also irrigation caused nitrate-N to move down, in the three treatments, not out of 0~ 60 cm root zone. However irrigation had no effects on available P and K distribution in soil profile during wheat growth. The difference of root distribution in soil did not affect water uptake. Due to insufficient water stored in soil before sowing, available water of soil (0~ 90 cm) was depleted after harvest. Furthermore different root length density in upper and middle layer did not affect nutrient uptake in those layers. It was dry in the topsoil after flowering that affected nutrient uptake. Due to irrigation after flowering HL increased not only grain milking but also nutrient accumulation of grain. Winter wheat growth, development and nutrient uptake among three treatments had no difference before flowering. After flowering insufficient water supply of LH and LW affected grain milking, which cause decrease in kernel weight and yield.

Key words　Winter wheat, Root length density, Soil moisture, Nitrate-N