

# 限量灌溉对石羊河流域 春小麦根区水氮迁移和利用的影响

刘小刚, 张富仓\*, 田育丰, 崔引娣

(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)

**摘要:** 为了探讨西北旱区春小麦最佳的水氮耦合形式, 在甘肃石羊河流域绿洲区进行了田间试验, 研究了限量灌溉对作物根区的水氮迁移动态和利用的影响。结果表明: 在春小麦拔节以前各灌水处理的根区土壤硝态氮积累主要集中在剖面 0~40 cm 处, 其积累量都约为 550 kg/hm<sup>2</sup>。播后 62 d 起高水处理在根区土壤硝态氮开始出现了淋失, 其硝态氮积累量是特低水处理在整个剖面上积累量的 0.76 倍。收获时根区土壤硝态氮的残留量特低水处理 > 低水处理 > 中水处理 > 高水处理, 其中特低水处理的残留量是高水处理的 1.75 倍。除拔节期以前, 根区土壤硝态氮的积累量和土壤水贮量呈线性递减关系。高水处理比中水处理的产量高约 4%, 而灌水量比中水处理高约 30%。在水资源严重亏缺的条件下, 春小麦全生育期灌水 360~280 mm 可以保证有较高的产量和较高的水分利用效率。

**关键词:** 限量灌溉; 土壤水分; 硝态氮; 迁移; 积累; 水氮利用; 春小麦

**中图分类号:** S152.7; S153.6<sup>+1</sup> **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2008)06-0057-06

石羊河流域是甘肃省河西走廊三大内陆河流域中人口最多、水资源开发利用程度最高、用水矛盾最突出、生态环境问题最严重、水资源对经济社会发展制约性最强的区域。随着流域人口的增加和社会经济的发展, 用水矛盾日益突出, 水资源的大规模开发利用引发了一系列生态环境问题, 严重影响着流域社会经济的可持续发展和生态环境问题。本地区农业用水量占水资源利用总量的 70%~90%<sup>[1]</sup>, 农业灌溉用水和供水矛盾突出。地面灌溉是当地采用的最广泛、最主要的一种灌水方法, 大水漫灌现象比较普遍, 造成了水肥资源的严重浪费, 导致了系列农田环境问题<sup>[2~6]</sup>。如何使作物在不减产的条件下减少灌溉定额, 提高灌溉效益, 已成为石羊河流域农业发展的最急迫的任务。在当地进行了大量节水灌溉新技术的试验研究并取得了一定的成果<sup>[7~10]</sup>, 但没有很好地将水和肥结合起来。前人对不同水肥条件下土壤中水氮累积研究较多<sup>[11~15]</sup>, 但大多没有将灌溉条件下土壤中水氮迁移和作物对水氮的利用联系起来, 对荒漠绿洲区作物根区的水氮迁移研究也较少。本研究将春小麦根区的水氮迁移和水氮利用相结合, 以期找到干旱地区获得最大的水分利用效率相应的水氮耦合形式, 为石羊河流域提高灌溉

水利用效率, 减少土壤氮素损失提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与试验设计

试验于 2007 年 4~7 月在中国农业大学石羊河流域农业与生态节水试验站(37°57'20"N, 102°50'50"E)进行。试验田地处腾格里沙漠边缘, 为典型的内陆荒漠气候区, 地处黄羊河、杂木河、清源灌区交汇带, 海拔 1 581 m, 多年平均降水量仅为 164.4 mm 左右。土壤质地为灰钙质轻砂壤土, 根层土壤干容重为 1.32 g/cm<sup>3</sup>, 田间持水量为 36.58%(体积含水率), 地下水埋深达 25~30 m。土壤肥力水平较低, 速效磷含量为 5~8 mg/kg, 有机质含量为 0.4%~0.8%, 土壤 pH 值约为 8.2, 矿化度 0.71 g/L, 土壤速效性盐离子含量为 0.12%~0.56%。灌溉水源为地下水。

试验小麦为当地主要种植品种永良 15 号。试验设 4 个灌水水平, 全生育期灌水 4 次。灌水时间分别在分蘖期、拔节期、抽穗期和灌浆期, 灌水定额分别为 90 mm(高水)、70 mm(中水)、50 mm(低水)和 30 mm(特低水)。每个处理重复 3 次, 合计 12 个小区。小区为东西方向, 四周开阔, 小区面积为 15

收稿日期: 2008-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(50579066, 50879073)

作者简介: 刘小刚(1977-), 男, 甘肃镇原人, 博士研究生, 研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail: liuxiaogang888@tom.com。

\* 通讯作者: 张富仓, 男, 教授, 博士生导师, 从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail: zhangfucang@tom.com。

$\text{m}^2$ 。试验在田间进行了完全随机排列。氮肥选用尿素,播前一次施入,施氮量为  $255 \text{ kg}/\text{hm}^2$  纯氮。磷肥选用过磷酸钙,作为底肥深翻土地前一次均匀撒施,施磷量为  $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$  五氧化二磷。4 月 4 日

播种,7 月 15 日收获。灌水水量用低压管出水口处精确水表测量。整个生育期降雨量和参考作物的蒸发蒸腾量以及灌水时间见图 1。

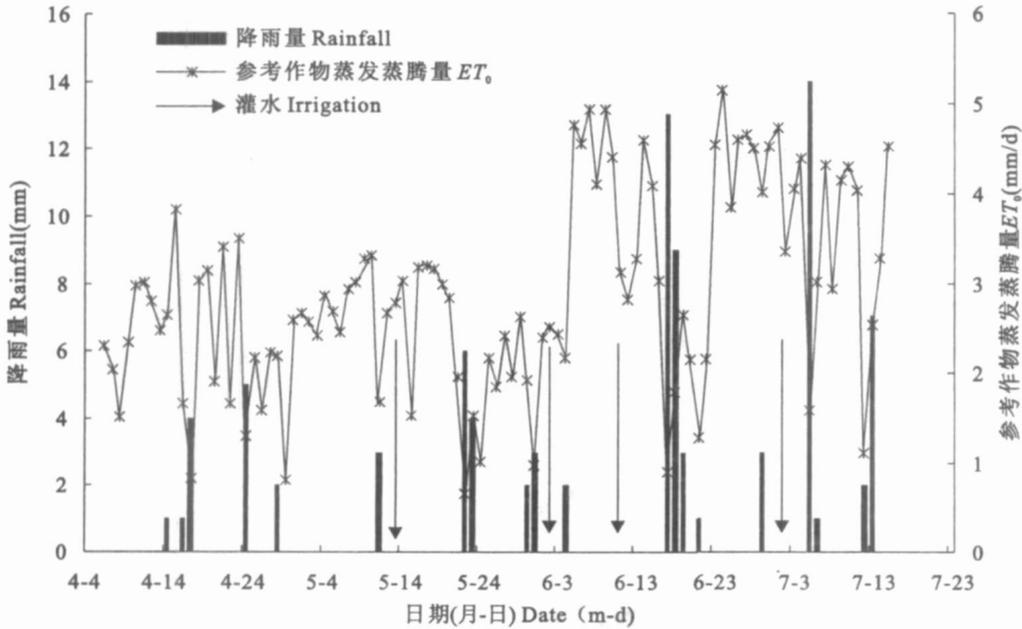


图 1 春小麦全生育期降雨量、参考作物蒸发蒸腾量和灌水时间

Fig. 1 Rainfall,  $ET_0$  and irrigation time in the whole growth period of spring wheat

## 1.2 测定项目与方法

土样和植物样的采集分为 4 个时期进行,分别为拔节前(5 月 18 日),抽穗前(6 月 8 日),灌浆前(6 月 23 日)和收获后(7 月 18 日)。土钻取土,每 10 cm 取一个土样,共 100 cm。部分土样用烘干法测定含水率,剩余新鲜土样立即晾干后磨碎过筛待测氮素。土壤硝态氮采用  $2 \text{ mol}/\text{L}$  KCL (土液比 1:5) 浸提,用上海光谱仪器厂生产的 756 型紫外可见分光光度计测定。植物样用烘箱  $105^\circ\text{C}$  杀青 30 min,  $60^\circ\text{C}$  烘至恒重,分别测定根干重和地上部分干重。植株和籽粒经烘干磨碎后进行全氮测定。全氮测定用开氏法<sup>[16]</sup>。植株全氮含量为地上全氮含量和地下全氮含量之和。土壤剖面硝态氮累积量的计算公式:  $A = c \times h \times BD \times 10 \times 0.01$ ,  $A$  为硝态氮的累积量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ),  $c$  为土壤硝态氮的含量( $\text{mg}/\text{kg}$ ),  $h$  为土层厚度( $\text{cm}$ ),  $BD$  为土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。土壤水分累积量的计算公式:  $A = \theta \times h \times 10$ ,  $A$  为土壤贮水量( $\text{mm}$ ),  $\theta$  为土壤体积含水率,  $h$  为土层厚度( $\text{cm}$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 限量灌溉对土壤硝态氮累积量的影响

(硝态氮是旱地作物吸收的主要氮素形态。图 2 Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

表示根区土壤硝态氮累积量的动态变化。由图 2 试验结果可知,播后 44 d 各处理在整个剖面上土壤硝态氮的累积量约为  $550 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ,变化幅度为  $82 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ,且主要集中在  $0 \sim 50 \text{ cm}$ 。这是因为播前施氮,土壤温度适宜,土壤矿化和硝化作用强烈,增加了耕层土壤的硝态氮含量。土壤硝态氮  $0 \sim 50 \text{ cm}$  土壤硝态氮累积量占整个剖面上累积量的比例有所差异,其中特低水分处理最大为 85%,低水和中水处理次之,高水处理最小为 73%。各处理剖面  $70 \sim 100 \text{ cm}$  硝态氮累积量说明了土壤的本底情况。

播后 62 d 土壤硝态氮的累积量发生了显著的变化,各处理在整个剖面上的累积量特低水处理最大为  $468 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ,是高水处理的 1.31 倍,是低水处理的 1.12 倍。和播后 44 d 相比,各处理  $0 \sim 50 \text{ cm}$  土壤硝态氮的累积量所占整个剖面累积量的比例都有所降低,其中高水处理由 73% 降低到 52%,降低的幅度最大。低水处理和特低水处理土壤硝态氮的累积还主要集中在剖面  $0 \sim 50 \text{ cm}$ ,占整个剖面的 65%~76%。这是因为灌水和降雨,土壤硝态氮随水迁移,由图 2 可知其迁移的距离和灌水量呈正相关。

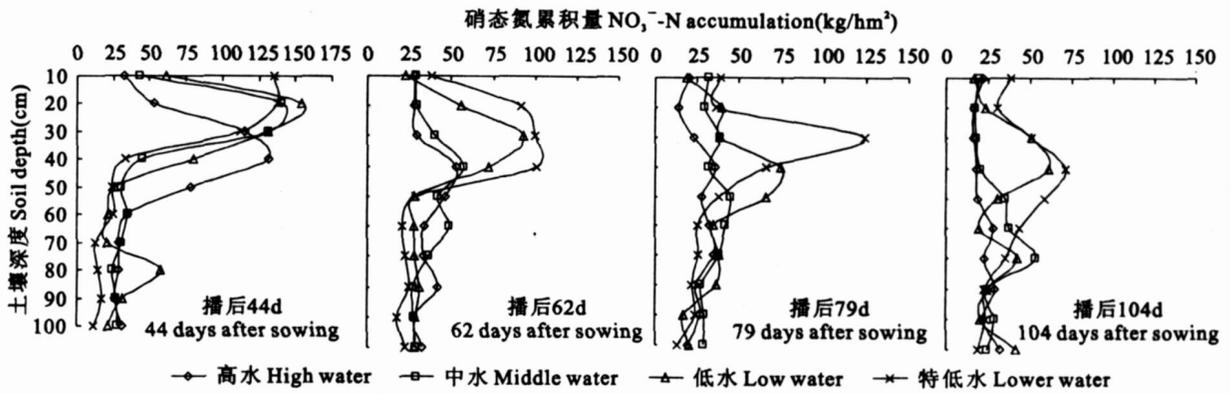


图 2 土壤硝态氮累积动态变化

Fig.2 The dynamics of accumulation of  $\text{NO}_3^- \text{N}$

由于灌水和降雨的影响,播后 79 d 高水处理剖面各层次上土壤硝态氮累积量较小,变化幅度为 16 ~ 35  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 。中水处理在剖面 50~70 cm 上累积量达到峰值,低水处理的累积峰值在 30~60 cm 处。特低水分处理在剖面 30 cm 处的累积量最大为 124  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,是高水处理相同层次上的累积量的 6 倍,0 ~ 50 cm 剖面上的累积量占整个剖面上的 73%,而高水处理 50~100 cm 剖面上的累积量占整个剖面上的 54%,说明灌水量的高低是土壤剖面上各层次硝态氮累积量大小的决定因素。

播后 104 d 土壤硝态氮在剖面上累积量代表了

硝态氮残留的多少,由图 2 可知土壤硝态氮的残留量特低水处理 > 低水处理 > 中水处理 > 高水处理。其中特低水处理的残留量是高水处理的 1.75 倍。和播后 44 d 硝态氮的累积相比,高水处理在整个剖面上减小的幅度最大为 337  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,是低水处理和特低水处理减少幅度的 2 倍和 2.5 倍。说明高水处理让硝态氮产生了淋失,降低了氮肥的利用效率。

### 2.2 限量灌溉对土壤贮水量的影响

土壤贮水量是土壤水分收支平衡状况的综合反映,水分收入小于支出,土壤贮水量降低,反之则增加。图 3 反映了根区土壤贮水量的动态变化。

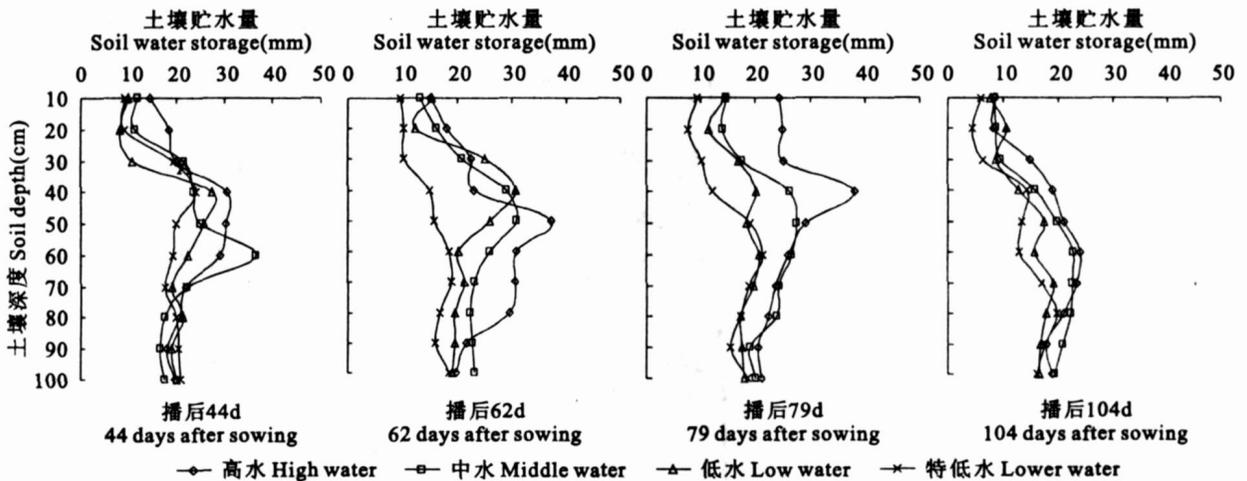


图 3 土壤贮水量动态变化

Fig.3 The dynamics of soil water storage

由试验结果可知播后 44 d 高水处理在整个剖面上的土壤贮水量最大,比特低水处理高 43 mm。其中低水处理和特低水处理的贮水量都约为 180 mm,这是因为低水和特低水处理的灌水定额(50 mm 和 30 mm)较小,灌水对剖面(50~100 cm)土壤含水率影响不大。小麦在拔节期的耗水量较大,使

剖面 0~40 cm 的土壤含水率降低到同一水平。播后 62 d 土壤贮水量和灌水定额呈正相关。其中高水和中水处理在剖面 40~50 cm 土壤贮水量最大约为 30 mm。播后 79 d 的土壤贮水规律和播后 62 d 的规律一致。和前 3 次土壤贮水量相比,播后 104 d 土壤贮水量最小。这是因为春小麦在灌浆期到收获

期,大气温度很高,植物蒸发蒸腾作用强烈。所以消耗水分量增加。低水处理和特低水处理的土壤贮水量的差异不明显。

由图 4 可知,在整个剖面上土壤硝态氮的累积量和土壤贮水量存在线性关系,且有较好的相关性。除播后 44 d 土样外,其余 3 次土壤硝态氮的累积量都是随着土壤贮水量的增加而减少。说明从播后 62 d 起,高水处理已导致部分土壤硝态氮超出了根区范围,很难被作物吸收利用。深层土壤反硝化作用微弱,硝态氮很难转化为其他形态的氮,只能随着土壤水分的向下运动而迁移,这样就会降低氮肥的

利用效率。这是因为土壤大孔隙可以传导 90% 的土壤水流通量<sup>[17]</sup>,高水处理灌溉时使土壤剖面约 0~50 cm 的大孔隙充满水分,开始以优势流的形式向深层入渗,土壤溶液中的硝态氮随之向深层运移。而低水或特低水处理不易形成优势流,因此硝态氮向下运移的深度比高水处理的小得多<sup>[18]</sup>。由图 5 结果可知,在整个生育期高水处理的灌水量为特低水处理的 3 倍,收获时的土壤贮水为特低水处理土壤贮水的 1.35 倍,土壤硝态氮残留量高水处理为特低水处理 0.56 倍。

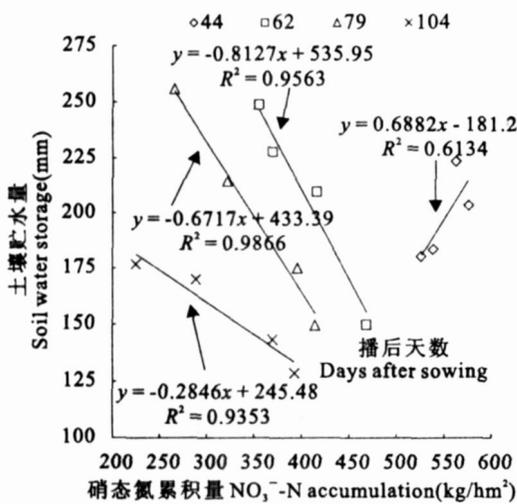


图 4 土壤剖面贮水量和硝态氮累积量关系图

Fig. 4 The diagram of water storage and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N accumulation

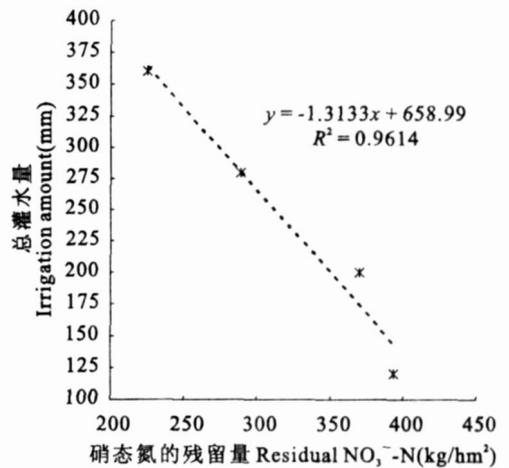


图 5 总灌水量和硝态氮残留量关系图

Fig. 5 The diagram of irrigation amount and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N residues

### 2.3 限量灌溉对作物群体全氮含量和水分利用效率的影响

干物质是作物光合作用产物的最高形式,其累积和分配与作物产量密切相关。由图 6A 干物质累积过程可知,播后 44 d 各处理的干物质累积集中在

2 000 kg/hm<sup>2</sup> 左右,变化幅度约为 300 kg/hm<sup>2</sup>。这是由于播前冬灌增加了土壤的贮水量,加之春小麦苗期需水量较小,水分处理对这一时段干物质累积影响不大。播后 62 d 的干物质累积和灌水量呈正相关,高水处理的干物质累积是低水和特低水处理

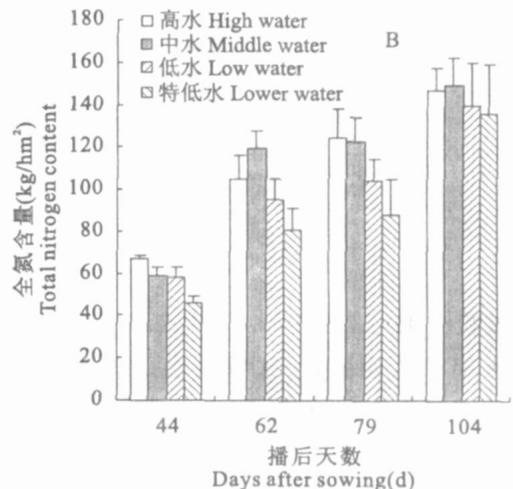
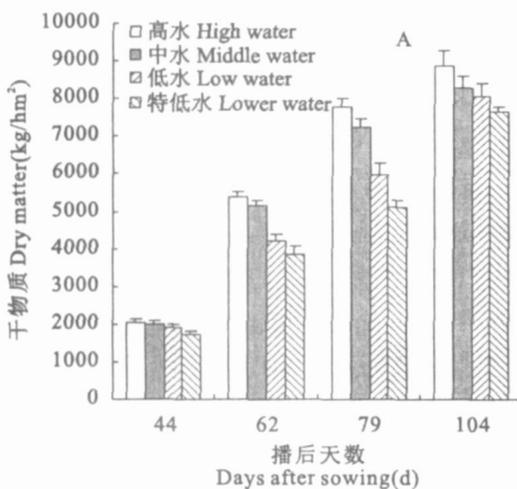


图 6 不同水分处理对干物质累积和全氮含量的影响

Fig. 6 The diagram of accumulation of dry matter and total nitrogen content

干物质累积的 1.27 和 1.40 倍。和播后 44 d 干物质累积相比,播后 62 d 各处理的累积量都有大幅度增加,高水处理增加的最多为  $3\ 320\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ,是中水、低水和特低水增加的 1.05, 1.43 和 1.58 倍。播后 44 d 到播后 62 d,干物质日累积量为  $180\sim 120\ \text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{d})$ ,其中高水处理的日累积量最大,特低水处理的最小。春小麦处在拔节期生长旺盛,蒸腾作用强烈,水分亏缺抑制了小麦的生长。播后 79 d 干物质累积和播后 62 d 累积规律一致,干物质日累积量略有减小为  $142\sim 75\ \text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{d})$ 。播后 104 d 高水处理的干物质累积量比中水、低水和特低水的累积分别高  $610\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ,  $830\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ,  $1\ 254\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。在播后 79 d 到 104 d,低水和特低水处理的干物质日累积量比高水和中水处理的高,其中特低水处理的最大为  $100\ \text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{d})$ ,说明高水处理作物的前期物质生产量大,后期物质生产量小,无效生长多。而低水和特低水处理则相反。总之,各处理在拔节期的干物质累积量最大,占整个生育期累积量的 27%~38%,而在抽穗期的干物质累积量较小,占生育期累积量的 16%~25%。

不同生育阶段的植株全氮含量表明(图 6B),播后 44 d 的高水处理的全氮含量是中水、低水、特低水处理的 1.15, 1.16 和 1.46 倍。由于苗期植株的全氮浓度较大,尤其是地上部分全氮浓度可达到  $40\ \text{g}/\text{kg}$  左右,所以全氮含量也较高。播后 62 d 虽然中水处理的干物质累积量小于高水处理的累积量,但中水处理的全氮的浓度比高水处理的浓度高约  $3\ \text{g}/\text{kg}$ ,中水处理的全氮含量比高水处理的全氮含量高  $14\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ,这有可能是高水处理使土壤硝态氮远离根区,降低了作物对氮素的吸收。低水处理和特低水处理植株全氮含量也达到了  $25\ \text{g}/\text{kg}$ ,但由于土壤水分的亏缺严重地抑制了作物的生长,导致作物的全氮含量也较小。播后 79 d 植株全氮含量的分布规律和干物质的规律一致,高水处理的植株全氮含量比中水处理的全氮含量高  $2\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 。播后 104 d,中水处理的植株全氮含量最大,高水处理次之,特低水处理最小。试验测得特低水处理的全氮浓度为  $18.3\ \text{g}/\text{kg}$ ,大于高水处理和低水处理的全氮浓度。这可能是高水处理条件下,作物生长旺盛,所以总生物量增加,但同时淋失和挥发增加,所以效率降低<sup>[18]</sup>。

水分利用效率是用来描述作物生长量与水分利用状况之间关系的指标。由收获时的经济产量可知,高水处理的产量最大为  $5\ 177\ \text{kg}/\text{hm}^2$ ,分别是中水、低水和特低水处理的 1.04, 1.36, 1.57 倍。而特

低水处理的灌溉水利用效率最大为  $3.65\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,分别是高水和中水处理灌溉水利用效率的 2.5 和 2.0 倍。虽然特低水处理的水分利用效率较大,但是在干旱条件下水分利用效率的增加是以牺牲产量为代价的,干旱迫使植物生长严重受阻,耗水量降低,因而水分利用率相对增加。高水处理和低水处理的产量相差只有 4%,而灌溉定额相差约 30%,说明土壤水分过高,作物营养生长过旺,降低了生殖生长,所以高水和中水处理的产量相差不大。

### 3 结 论

灌水是干旱地区土壤硝态氮迁移和累积的最主要的影响因素。高水处理会导致土壤硝态氮的淋失,降低作物对氮素的吸收。随着生育期的推进,土壤硝态氮的累积呈递减趋势。除拔节前,土壤硝态氮的累积量和土壤水贮量呈线性递减关系。特低水处理和低水处理的土壤硝态氮的累积量一直保持较高的水平。水分处理是土壤贮水量大小的决定因素,剖面 0~30 cm 的土壤贮水量较小。

春小麦在拔节期的干物质累积量最大,占整个生育期累积量的 27%~38%,而在抽穗期的干物质累积量较小,占生育期累积量的 16%~25%。高水处理的作物营养生长过旺,降低了生殖生长。特低水和低水处理严重地抑制了作物的生长,导致作物的全氮含量也较小。高水处理比中水处理的产量高约 4%,而灌溉定额比中水处理高约 30%。在水资源亏缺的条件下,春小麦全生育期灌水 360~280 mm 可以保证有较高的产量和水分利用效率。

### 参 考 文 献:

- [1] 杜 群. 西北地区水资源可持续管理与防治土地退化的区域政策——以石羊河流域为例[J]. 资源科学, 2004, 26(6): 77—82.
- [2] 尉元明, 朱丽霞, 乔艳君, 等. 干旱地区灌溉农田化肥施用现状与环境影响分析[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(5): 65—69.
- [3] 李晓欣, 胡春胜, 张玉铭, 等. 华北地区小麦—玉米种植制度下硝态氮淋失量研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(6): 7—11.
- [4] Zhu Z L. Loss of fertilizer N from plant-soil system and strategies and techniques for its reduction[J]. Soil and Environmental Science, 2000, 9(1): 1—6.
- [5] Benbi D K, Biswas C R, Kalkat J S. Nitrate distribution and accumulation in an ustochrept soil profile in a long term fertilizer experiment[J]. Fertilizer Research, 1991, 28: 173—177.
- [6] Beay Singh, Yadving-singh, Khind C S, et al. Leaching losses of urea-N applied to permeable soil under lowland rice[J]. Fertilizer Research, 1991, 28: 179—184.

- [7] 杜太生, 康绍忠, 张建华. 不同局部根区供水对棉花生长与水分利用过程的调控效应[J]. 中国农业科学, 2007, 40(11): 2546-2555.
- [8] 杜太生, 康绍忠, 王振昌, 等. 隔沟交替灌溉对棉花生长、产量和水分利用效率的调控效应[J]. 作物学报, 2007, 33(12): 1982-1990.
- [9] 杜太生, 康绍忠, 胡笑涛, 等. 根系分区交替滴灌对棉花产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(10): 2061-2068.
- [10] 汪杰, 王耀琳, 李昌龙, 等. 民勤绿洲水资源利用中的问题与节水途径[J]. 中国沙漠, 2006, 26(1): 103-107.
- [11] 李世清, 李生秀. 半干旱地区农田生态系统中硝态氮的淋失[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 240-242.
- [12] 王西娜, 王朝辉, 李生秀. 施氮量对夏季玉米产量及土壤水氮动态的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 197-204.
- [13] 黄冠华, 查贵锋, 冯绍元, 等. 冬小麦再生水灌溉时水分与氮素利用效率的研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 65-68.
- [14] 张丽娟, 巨晓棠, 张福锁, 等. 小麦各生育期对土壤不同深度标记硝态氮的利用[J]. 中国农业学, 2005, 38(11): 2261-2267.
- [15] 张丽娟, 巨晓棠, 高强, 等. 两种作物对土壤不同层次标记硝态氮利用的差异[J]. 中国农业科学, 2005, 38(2): 333-340.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 49-60.
- [17] 倪余文, 区自清. 土壤优先流及污染物优先迁移的研究进展[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 60-63.
- [18] 王兴武, 于强, 张国梁, 等. 鲁西北平原夏玉米产量与土壤硝态氮淋失[J]. 地理研究, 2005, 24(1): 140-150.

## Effects of limited irrigation on water and nitrogen transport and use in spring wheat rootzone soil in Shiyang River basin

LIU Xiao-gang, ZHANG Fu-cang, TIAN Yu-feng, CUI Yin-di

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The objective of this study is to explore the best coupling form of water and nitrogen in arid areas of northwest China. A field experiment was conducted in the oasis region of Shiyang River basin, and the effects of limited irrigation on water and nitrogen transport and use in spring wheat rootzone soil were investigated. The results showed that  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  accumulation in root soil was mainly concentrated in the 0~40 cm profile before the jointing stage and the accumulation was about  $550 \text{ kg/hm}^2$ .  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  was leaching in the rootzone soil of high water treatment from 62 days after sowing, and the  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  accumulation of high water treatment was 0.76 times of that of lower treatment in the profile. The residual  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  of lower water > low water > middle water > high water at harvest time, and the residues of lower water treatment is 1.75 times of that of high treatment. A linear decreasing correlation existed in the accumulation of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  and soil water storage after jointing stage. The yield of high water was higher than that of middle water by 4%, while the amount of irrigation was higher by 30%. The irrigation amount of 360~280 mm in the whole growth period could guarantee yield and water use efficiency on the condition of deficit water resources.

**Keywords:** limited irrigation; soil water;  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ; transport; accumulation; use of water and nitrogen; spring wheat