

# 灌溉与施氮对黑河中游新垦农田土壤 硝态氮积累及氮素利用率的影响

王 琦<sup>1,2</sup>, 李锋瑞<sup>1,\*</sup>

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所临泽内陆河流域研究站, 兰州 730000; 2. 甘肃农业大学草业学院 兰州 730070)

**摘要:**通过田间试验系统研究了黑河中游边缘绿洲区新垦沙地农田不同灌溉与施氮量 (0、140、221 kg N hm<sup>-2</sup> 和 300 kg N hm<sup>-2</sup>, 分别为 N<sub>0</sub>、N<sub>140</sub>、N<sub>221</sub> 和 N<sub>300</sub>) 对 2m 土层土壤硝态氮的积累和分布、春小麦产量、植株吸氮量及氮肥利用效率的影响。结果表明:在 378 ~ 504 mm 灌溉水平下,当施氮量大于 221 kg hm<sup>-2</sup> (超过作物吸氮量) 时会导致收获期 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 在根层土壤剖面的显著积累 (50 ~ 140 kg hm<sup>-2</sup>);在灌溉量为 630 mm 时,收获期各处理根层土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的积累量 (25 ~ 47 kg hm<sup>-2</sup>) 要低于播种前 (58 ~ 63 kg hm<sup>-2</sup>)。当施氮量超过 221 kg hm<sup>-2</sup> 时,春小麦籽粒产量、地上干物质量、植株吸氮量、氮肥表观利用率及生理效率均不再显著增加,N<sub>221</sub> 与 N<sub>0</sub>、N<sub>140</sub>、N<sub>300</sub> 相比,其籽粒产量分别提高 46.7%、41.3% 与 9.5%,地上干物质量分别提高 31.3%、25.2% 与 3.5%。灌溉水生产力的变化介于 2.0 ~ 5.3 kg hm<sup>-2</sup>mm<sup>-1</sup>,氮肥生产力的变化介于 6.3 ~ 10.8 kg kg<sup>-1</sup>。研究还表明,灌溉与施氮对土壤贮水量的影响不显著,在 378 mm 低灌水量时,小麦产量与地上干物质量无显著的影响,这说明在黑河流域新垦沙地农田系统低灌溉 (灌溉量 378 mm) 与 221 kg hm<sup>-2</sup> 施氮是最优的水肥耦合组合,因为在此管理模式下不仅可以获得相对较高的产量,而且灌溉水和氮素的利用效率较高,硝态氮的积累量较小。

**关键词:**灌溉;施氮;硝态氮积累;氮素利用率;新垦沙地农田

文章编号:1000-0933(2008)05-2148-12 中图分类号:Q142,S154,S181 文献标识码:A

## Effects of different irrigation and N supply levels on NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N accumulation and N use efficiency on a recently reclaimed sandy farmland in Heihe River basin

WANG Qi<sup>1,2</sup>, LI Feng-Rui<sup>1,\*</sup>

1 Linze Inland River Basin Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 Pratacultral College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2148 ~ 2159.

**Abstract:** In the middle reaches of the Heihe River basin, environmental deterioration in agricultural ecosystems caused by excessive nitrogen (N) supply and high irrigation rate has received much attention in recent years. A field experiment was designed to investigate the effects of different irrigation and N supply levels on soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N accumulation and distribution, grain yield, N uptake and N use efficiency in a recently reclaimed sandy farmland system in the Heihe River basin. The

**基金项目:**中国科学院/国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划资助项目 (CXTD-Z2005-2-4);兰州干旱气象科学研究基金资助项目 (IAM200605)

**收稿日期:**2007-07-07; **修订日期:**2007-12-14

**作者简介:**王琦 (1970 ~), 男, 甘肃陇西人, 博士生, 副教授, 主要从事草坪、作物和牧草节水技术研究. E-mail: wangqi512@sohu.com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lfengrui@vip.163.com

**Foundation item:** This study was financially supported by the CAS/SAFEA International Partnership Program for Creative Research Teams (CXTD-Z2005-2-4); and a grant (IAM200605) of research from the Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou

**Received date:** 2007-07-07; **Accepted date:** 2007-12-14

**Biography:** WANG Qi, Ph. D. candidate, Associate professor, mainly engaged in water saving technology of turf, crop and pasture. E-mail: wangqi512@sohu.com

experiment followed a completely random split-plot design, taking the irrigation treatment as main-plot (with three levels of 378, 504 mm, and 630 mm for the whole growing season) and N supply treatment as split-plot (with four levels of 0, 140, 221, 300 kg hm<sup>-2</sup>; denoting N<sub>0</sub>, N<sub>140</sub>, N<sub>221</sub>, and N<sub>300</sub>, respectively). Our results showed that grain yields, above-ground dry-matter biomass, plant N in above-ground dry-matter biomass, apparent N recovery fraction, and physiological efficiency did not increase significantly with increasing N supply rates when N supply rate exceeded 221 kg hm<sup>-2</sup>. Average grain yields in N<sub>221</sub> were found to be 46.7%, 41.3% and 9.5% higher than N<sub>0</sub>, N<sub>140</sub> and N<sub>300</sub>, respectively, whereas average above-ground dry-matter biomasses in N<sub>221</sub> were 31.3%, 25.2% and 3.5% higher than N<sub>0</sub>, N<sub>140</sub> and N<sub>300</sub>, respectively. Under the rates of irrigation between 378 mm and 504 mm, a rate of N supply over 221 kg hm<sup>-2</sup> resulted in a significant accumulation of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N (from 50 kg hm<sup>-2</sup> to 140 kg hm<sup>-2</sup>) in the 0–200 cm soil profile. Under the rate of irrigation of 630 mm, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N accumulation in the 0–200 cm soil profile ranged from 25 kg hm<sup>-2</sup> to 47 kg hm<sup>-2</sup> at harvest stage, being lower than that (58 kg hm<sup>-2</sup> to 63 kg hm<sup>-2</sup>) at sowing. Overall, N fertilizer productivity varied from 6.3 kg kg<sup>-1</sup> to 10.8 kg kg<sup>-1</sup>, while irrigation water productivity varied from 2.0 kg hm<sup>-2</sup>mm<sup>-1</sup> to 5.3 kg hm<sup>-2</sup>mm<sup>-1</sup> in this recently reclaimed sandy farmland system. However, we found that neither irrigation nor nitrogen supply had a significant influence on soil water storage. The results of this study suggest that the combination of irrigation and nitrogen supply of 378 mm and 221 kg N hm<sup>-2</sup> may be the best management strategy because of its relatively higher grain yield, higher irrigation water productivity, and higher N use efficiency, as well as lower NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N accumulation.

**Key Words:** irrigation; nitrogen supply; nitrate-nitrogen accumulation; nitrogen use efficiency; recently reclaimed sandy farmland

地处甘肃河西走廊黑河中游张掖绿洲是依赖地表水与地下水灌溉而存在的农业区,是国家重要的商品粮、棉、油生产基地。由于对粮食增产的需求,每年有新开垦的沙地用于高灌溉和高施肥的农业生产,这不仅造成氮与水利用率降低,并且引起地下水水质恶化,水资源日益短缺<sup>[1,2]</sup>。因此国家对黑河流域水肥管理,特别是水资源管理得到前所未有重视:流域尺度的水资源合理调配,建设节水型绿洲农业,压缩高耗肥与高耗水作物种植面积等<sup>[3]</sup>。由于效益驱动,高灌溉量及过量施肥的问题仍然普遍存在,根据调查黑河流域中游边缘绿洲区,大田灌溉量超过 1000 mm,施氮水平在 300~450 kg N hm<sup>-2</sup>。我国北方农用氮肥引起地下水、饮用水硝酸盐污染的情况十分严重<sup>[4,5]</sup>。

高灌溉与过量施氮不仅使氮肥利用率降低与作物减产,残留的氮素随灌溉水淋溶引起氮肥损失,导致硝态氮在根区以下土层无效积累或进入地下水,成为水体污染的重要来源<sup>[6,7,8]</sup>。选择最佳施氮量与灌溉量以满足植物对氮和水的需求,可以提高作物产量、水与氮肥利用效率,降低 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋溶。在单作生产中,产量以 225 kg N hm<sup>-2</sup>施氮最高,经济效益以 150~225 kg N hm<sup>-2</sup>施氮水平较高,当施氮量大于 300 kg N hm<sup>-2</sup>时,边际效益开始出现负值<sup>[6]</sup>。高产与硝态氮淋溶较少的最佳施氮量为 150~180 kg hm<sup>-2</sup><sup>[7]</sup>。在氮肥施用管理上,通常将肥料分次施或根据作物生长需要分阶段施加,尤其在小麦种植中,分次施肥将有利于提高植物的氮肥吸收率,同时,分次施氮还能降低 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的淋溶<sup>[9~12]</sup>。

黑河中游边缘绿洲区,大部分农田为近几十年来开垦的戈壁和沙漠地,土壤沙粒含量高、保水保肥性能差,作物生产耗水耗肥,硝态氮淋溶对地下水污染风险更大。大多数研究多集中于灌溉与施氮对作物产量的影响,以及土壤氮素总体平衡<sup>[6,7,11]</sup>,而少有进行灌溉与施氮对产量、土壤硝态氮分布、硝态氮积累、植物氮吸收与氮肥利用率的综合研究,尤其在黑河中游边缘绿洲区新垦沙地农田。为此,在临泽县边缘绿洲区新垦沙地农田布置灌溉与施氮的裂区试验,研究了灌溉与施氮对黑河中游边缘绿洲新垦沙地农田产量、土壤硝态氮分布、积累与氮肥利用效率的影响,旨在探明黑河中游新开垦沙地农田硝态氮的动态规律,为选择适宜施氮量与灌溉量、减少氮素损失、维持边缘绿洲健康发展、提高氮肥利用效率和控制硝态氮对地下水的污染等提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区自然条件与试验地概况

试验于 2006 年 3~7 月在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所临泽内陆河流域研究站 (39°21' N, 100°07' E, 1367 m a. s. l.) 进行, 为老绿洲向荒漠扩展的边缘绿洲区, 绿洲外围为沙漠与戈壁, 试验站与巴丹吉林沙漠南缘相接, 依黑河水和地下水灌溉, 常年平均地下水位 4.2 m, 毛管水上升高度 65 cm, 地下水补给到作物根系层的补给量忽略不计<sup>[13]</sup>。试验区土壤为灰棕荒漠土, 粘粒、粉粒与沙粒含量分别为 2.33%、11.07% 与 86.60%, 土壤 0~40 cm 基础养分状况见表 1。从表 1 可以看出, 试验区土壤碱解氮含量 5.24~11.73 mg kg<sup>-1</sup>, 小于 50 mg kg<sup>-1</sup>, 属于低等供氮水平。试验区年平均降水量 116.8 mm, 年潜在蒸发量 2390 mm, 年均气温 7.6 °C, 最高气温 39.1 °C, 最低 -27 °C, ≥10 °C 的年积温为 3088 °C, 无霜期 165 d, 年日照时数为 3045 h。地带性土壤为正常干旱土, 土壤母质为洪积-洪积物; 由于长期风沙侵袭, 发育为非地带性沙质新成土; 人类开垦利用后, 通过灌溉、施肥与耕作, 形成淤灌旱耕人为土。近几年开垦的边缘绿洲农田尚未形成淤灌层, 土壤结构松散, 肥力低下。试验地带分布着零星新开垦的沙地农田, 试验地于 2000 年由沙漠土壤开垦而成, 开垦前主要生长梭梭和沙拐枣等沙生植物, 开垦后连续用于灌溉种植玉米。

### 1.2 试验设计

试验采用完全随机裂区设计, 灌溉量作为主区, 施氮量为副区, 灌溉量的 3 个水平分别为估算作物生育期需水量 ET<sup>[14]</sup> 的 0.6、0.8、1.0 倍, 代表符号分别为 I<sub>0.6</sub>、I<sub>0.8</sub>、I<sub>1.0</sub>, 4 个施 N 水平分别为 N<sub>0</sub>、N<sub>140</sub>、N<sub>221</sub>、N<sub>300</sub> (折合纯氮 0、140、221 kg hm<sup>-2</sup> 和 300 kg hm<sup>-2</sup>), 灌溉水平中 I<sub>0.6</sub> 作为对照, 施氮水平中 N<sub>0</sub> 作为对照, 共有 12 个处理 (3 个灌溉水平 × 4 个施氮水平), 重复 3 次, 36 个小区。灌溉作为主区随机排列, 在每个主区中随机布置 4 个施氮水平。小区面积为 4.5 m × 9 m = 40.5 m<sup>2</sup>, 为了消除小区之间的侧向水分与 N 素移动, 主区之间设置 2 m 人行道, 副区之间设置 1.5 m 人行道。2006 年春小麦全生育期 3 个灌溉量分别为 378、504 mm 和 630 mm (不包括生育期降雨量), 水源为附近井水, 首先将井水引入渠道, 然后用塑料管及水泵将渠道水灌入田间, 用水表进行计量。氮肥分基肥和追肥两种, 基肥采用条播方式与春小麦种子同时施入, 追肥在灌水前撒施。采用普通尿素 (含氮 46%) 为氮源, 施氮量、施氮次数及施氮时间见表 2。气象资料由试验站的自动气象站提供, 距试验地 500 m, 春小麦生育期降雨量及灌水日期见图 1, 2006 年春小麦生育期降雨量为 43.9 mm。

### 1.3 种植管理

2005 年玉米收割后进行翻地和耧地各 1 次, 冬灌灌水量 60 mm。试验小区布置好以后, 为了保证各处理出苗的均匀性, 播种前 2d 各小区进行等量灌溉, 灌水量为 75 mm, 春小麦播种时间为 2006 年 3 月 22 日, 春小麦品种为陇富 920, 购自甘肃省临泽县种子分公司, 播种量为 337.5 kg hm<sup>-2</sup>, 行距 15 cm, 春小麦种子与基肥采用条播方式施入, 为了保证播种的均匀性, 称取每行播种量, 按行播种, 施入土壤的深度大约为 5 cm。根据当地农民施基肥经验, 除 N<sub>0</sub> 不施加氮肥, P 肥和 K 肥与其它处理相同, 基肥用量纯 N (普通尿素, 含氮 46%)、纯 P (过磷酸钙, 含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 为 46%) 和纯 K (硫酸钾, 含 K<sub>2</sub>O 为 50%) 用量分别为 79、41、39 kg hm<sup>-2</sup>。2006 年 5 月 10 日与 6 月 10 日手工除草两次, 7 月 9 日收获。

### 1.4 样品采集及测定

播种前, 首先沿每一小区的对角线等距离取 3 钻土壤样品, 采样深度 40 cm, 按 20 cm 分层, 相同层次的土壤混合为 1 个样, 分析土壤有机质、养分含量与 pH 值的变异系数, 经统计分析符合农化试验的要求。

土壤表层 0~40 cm 含水量采用烘干法测定, 每一小区中央埋设中子管, 深层土壤 40~200 cm 水分采用中子仪和烘干法联合测定, 播种前 1d、收获后 1d、灌溉前和灌溉后测定, 按 20 cm 分层。

在播种前 1d (2006 年 3 月 21 日) 与收获后 1d (2006 年 7 月 10 日) 测定土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量, 测定深度为 200 cm, 0~120 cm 按 20 cm 分层, 120~200 cm 按 40 cm 分层, 沿每一小区的对角线等距离取 3 土钻土样样品, 同一层次的土壤混合为 1 个样。土壤鲜样充分混匀过 2 mm 筛, 称取 5 g 鲜土样 3 份, 采用 2 mol·L<sup>-1</sup> KCl (土液比 1:4) 浸提, 滤液在 220 nm 和 275 nm 下比色法测定土壤硝态氮含量<sup>[15]</sup>。0~200 cm 土壤容重采用环

刀法测定,按 20 cm 分层。

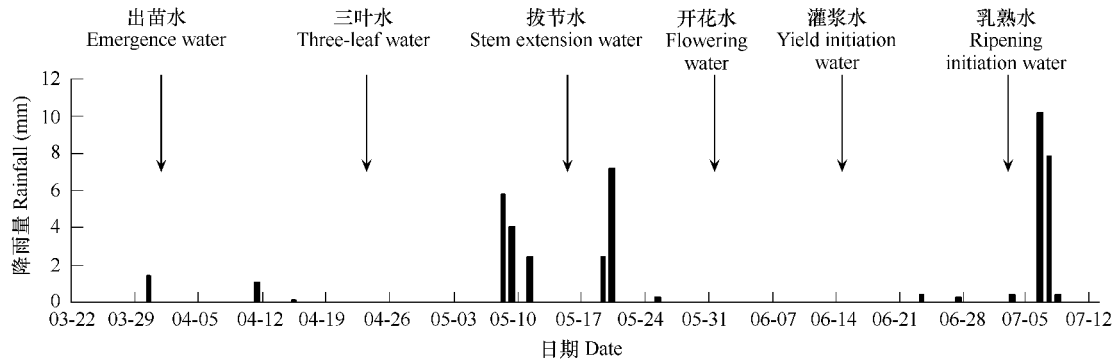


图1 2006 年春小麦生育时期降雨量及灌水时期

Fig. 1 Rainfall and irrigation dates during the 2006 growing season in spring wheat

垂直箭头代表灌溉,出苗水:3月31日;三叶水:4月24日;拔节水:5月16日;开花水:6月3日;灌浆水:6月13日;乳熟水:6月24日  
Vertical arrows denote irrigation dates; 31 March for emergence water, 24 April for three-leaf water, 16 May for stem extension water, 3 June for flowering water, 13 June for yield initiation water, and 24 June for ripening initiation water

春小麦收获期,每一小区选取生长均匀、长 0.6 m 行(4 段 0.15m 长的混合样),代表该区小麦的生长状况,样品风干,称重计算地上干物质重,粉碎,过筛后用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮-凯氏法测定植株含氮量<sup>[15]</sup>,计算植物吸氮量。每一小区中选取 4m × 4m = 16 m<sup>2</sup> 面积测定春小麦产量与地上生物量,用人工法打麦子,籽粒与秸秆在 65℃ 烘箱烘干 3d,计算它们的含水量及干物质重。

表1 试验区土壤理化化学特性

Table 1 Physical and chemical properties of two soil profiles in the experimental plots

| 土层<br>(cm) | 容重<br>(g cm <sup>-3</sup> ) | 田间持水量<br>(%)   | 全氮<br>(%) | 全磷<br>(%) | 全钾<br>(%) | 碱解氮<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | 速效磷<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | 速效钾<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | 有机质 (%)        | pH   |
|------------|-----------------------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|------|
| Depth      | Bulk density                | Field capacity | Total N   | Total P   | Total K   | Alaki N                       | Olsen P                       | Available K                   | Organic matter |      |
| 0 ~ 20     | 1.46                        | 19.10          | 0.05      | 0.05      | 2.37      | 11.73                         | 0.75                          | 51.09                         | 0.56           | 8.55 |
| 20 ~ 40    | 1.48                        | 15.67          | 0.03      | 0.04      | 2.30      | 5.24                          | 0.48                          | 36.96                         | 0.21           | 8.71 |

表2 施氮量及施氮时间

Table 2 The rate and the date of N supply

| 时间 Date | 生育期 Growth stage   | N0 | N140 | N221 | N300 |
|---------|--------------------|----|------|------|------|
| 03-31   | 出苗期 Emergence      | 0  | 79   | 79   | 79   |
| 04-24   | 三叶期 Three leaf     | 0  | 61   | 61   | 61   |
| 05-16   | 拔节期 Stem extension | 0  | 0    | 81   | 81   |
| 05-03   | 开花期 Flowering      | 0  | 0    | 0    | 79   |

1.5 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 积累及氮肥利用效率

根据根区(0 ~ 200 cm)土壤含氮量计算 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 积累量,植株干物质重与植株含氮量计算植株吸氮量,公式如下<sup>[10]</sup>:

土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 积累 (kg hm<sup>-2</sup>) = 土层厚度 (cm) × 土壤容重 (g cm<sup>-3</sup>) × 土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量 (mg kg<sup>-1</sup>) / 10

植株吸氮量 = 秸秆重 (或籽粒重) × 秸秆含氮量 (或籽粒含氮量)

氮肥生产力、灌溉水生产力及氮肥利用率采用以下公式计算<sup>[10]</sup>:

氮肥生产力 (nitrogen fertilizer productivity)  $NP = GY_i / N_i = (GY_0 + \Delta GY_i) / N_i$

灌溉水生产力 (irrigation water productivity)

$$WP = GY_i / W_i$$

氮肥内部利用率 (internal N use efficiency)

$$INE = GY_i / N_{upi}$$

氮肥表观利用率 (apparent N recovery fraction)

$$NF = \Delta N_{up} / N_i = (N_{upi} - N_{up0}) / N_i$$

生理效率 (physiological efficiency)

$$PE = \Delta GY_i / \Delta N_{up} = (GY_i - GY_0) / (N_{upi} - N_{up0})$$

式中,  $\Delta GY_i$  为施氮区产量 ( $GY_i$ ) 与不施氮区产量 ( $GY_0$ ) 的差值;  $\Delta N_{up}$  为施氮区植株吸氮量 ( $N_{upi}$ ) 与不施氮区植株吸氮量 ( $N_{up0}$ ) 差值;  $N_i$  为施氮量;  $W_i$  为灌溉量。

$$\text{土壤贮水量 (mm)} = \text{土层厚度 (cm)} \times \text{土壤容重 (g cm}^{-3}\text{)} \times \text{土壤水分重量百分数 (\%)} \times 10$$

## 1.6 数据分析

利用完全随机模型分析灌溉与施氮对土壤氮动态、产量、植株吸氮量及氮肥利用效率的影响, 将 3 次重复收集的参数采用 SPSS15.0 与 Excel 软件进行方差分析和显著性检验; 方差分析多重比较用 Duncan 法 ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 对土壤水分状况的影响

在同一灌溉水平下, 将 4 个施氮处理 (每个施氮处理有 3 重复, 共 12 个重复) 土壤贮水量统计求均值 (图 2 灌溉之间), 可以看出, 从播种期 (3 月 21 日) 到开花期 (6 月 2 日), 3 个灌溉处理的土壤贮水量差异不明显; 从拔节期 (5 月 23 日) 到开花期 (6 月 2 日) 各灌溉处理土壤贮水量急剧下降, 该阶段春小麦生理上处于需水高峰期, 再加上高温蒸发使各灌溉处理土壤水分处于全生育期最低时期; 开花期 (6 月 2 日) 到收获期 (7 月 10 日), 高灌溉处理 ( $I_{1.0}$ ) 的土壤贮水量略低于中等灌溉 ( $I_{0.8}$ ) 与低灌溉处理 ( $I_{0.6}$ ), 说明高灌溉处理在根区范围并不能保持比中等灌溉和低灌溉处理更高土壤水分, 反而由于高蒸散和大量入渗使高灌溉处理土壤水相对较低。为了比较施氮量对土壤贮水量的影响, 在同一施氮水平下, 将 3 个灌溉处理 (每个灌溉处理有 3 重复, 共 9 个重复) 的土壤贮水量求均值 (图 2 施氮之间), 不同施氮处理土壤贮水量与不同灌溉处理类似, 播种期 ~ 开花期, 4 施氮处理的土壤贮水量相差明显; 开花期 ~ 收获期, 对照 ( $N_0$ ) 处理土壤贮水量略高于其它 3 个施氮处理 ( $N_{140}$ 、 $N_{221}$  与  $N_{300}$ )。对照处理植株生长弱小, 消耗水分相对较少, 使其土壤水分相对较高。经过方差分析, 春小麦各生育期, 3 个灌溉处理间或 4 个施氮处理间土壤贮水量差异不显著 (文中没有列出), 说明灌溉与施氮对新垦沙地农田土壤水分保持无显著性影响。

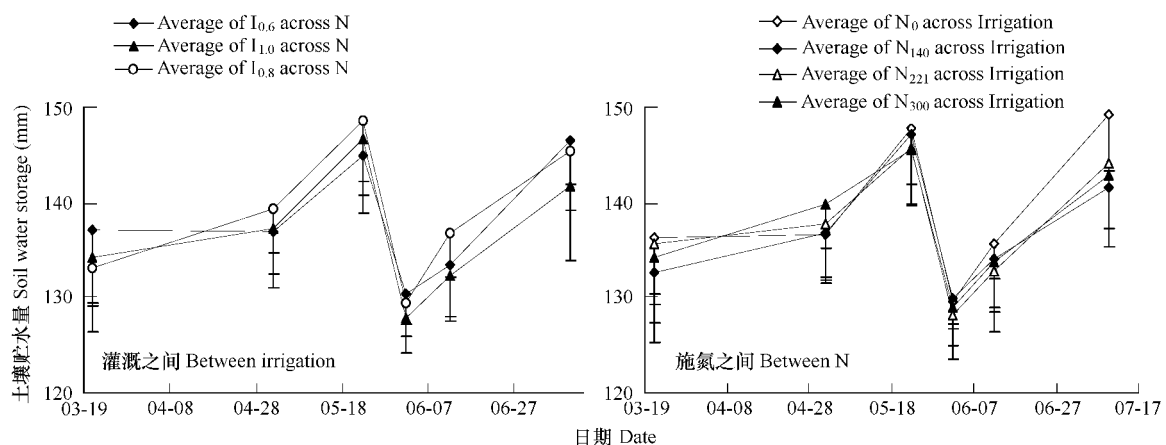


图 2 灌溉与施氮对土壤贮水量 (平均数  $\pm$  SD) 的影响

Fig. 2 Influences of nitrogen supply rates and irrigation regimes on soil water storages (mean  $\pm$  SD)

灌溉之间: 同一施氮水平下不同灌溉处理对土壤贮水量的影响; 施氮之间: 同一灌溉水平下不同施氮处理对土壤贮水量的影响; 竖线表示标准偏差 Between irrigation: Influences of different irrigation treatments on soil water storages at a given N supply level; Between N: Influences of different N supply rates on soil water storages at a given irrigation level; Vertical bars indicate 1 SD

## 2.2 对土壤剖面硝态氮分布及积累的影响

### 2.2.1 对土壤剖面硝态氮分布的影响

为了对比灌溉量与施氮量对土壤硝态氮含量与分布的影响,春小麦收获期,同一灌溉水平下,将不同施氮处理同一层次土壤硝态氮含量进行比较,由图3灌溉0.6 ( $I_{0.6}$ )、灌溉0.8 ( $I_{0.8}$ )与灌溉1.0 ( $I_{1.0}$ )可以看出,硝态氮含量在土壤表层含量最高,随着土层深度的增加硝态氮呈波浪状缓慢下降。在  $I_{0.6}$ 与  $I_{0.8}$ 灌溉水平下,0~80 cm 土壤深度,  $N_{300}$ 处理硝态氮含量显著高于  $N_{221}$ 处理,  $N_{221}$ 处理硝态氮含量显著高于  $N_{140}$ 和  $N_0$ 处理,  $N_{140}$ 与  $N_0$ 处理间硝态氮含量差异不显著;80~200 cm 土壤深度,  $N_{300}$ 处理硝态氮含量显著高于  $N_{221}$ 、 $N_{140}$ 与  $N_0$ 处理,  $N_{221}$ 、 $N_{140}$ 与  $N_0$ 处理间硝态氮含量差异不显著。在  $I_{1.0}$ 灌溉水平下,0~100 cm 土壤深度,  $N_{300}$ 与  $N_{221}$ 处理硝态氮含量显著高于  $N_{140}$ 与  $N_0$ 处理,  $N_{300}$ 与  $N_{221}$ 之间、 $N_{140}$ 与  $N_0$ 之间硝态氮含量差异不显著;当土壤深度超过100 cm,  $N_0$ 、 $N_{140}$ 、 $N_{221}$ 与  $N_{300}$ 处理间硝态氮含量差异不显著,表明硝态氮主要积累在0~100 cm 土层。在同一灌溉水平下,将4个施氮处理(每个施氮处理有3重复,共12个重复)同一层次硝态氮含量统计求均值,得到3个灌溉水平的土壤硝态氮含量均值,由图3(平均施氮)可以看出,  $I_{0.8}$ 与  $I_{0.6}$ 灌溉处理硝态氮含量剖面分布基本相似,同时  $I_{0.6}$ 与  $I_{0.8}$ 灌溉处理硝态氮含量高于  $I_{1.0}$ 灌溉处理,但灌溉处理间土壤硝态氮含量差异不显著性。当气候条件与土壤条件相同时,土壤中硝态氮含量与灌溉量、施氮量有关,随着施氮量增加,各层次土壤

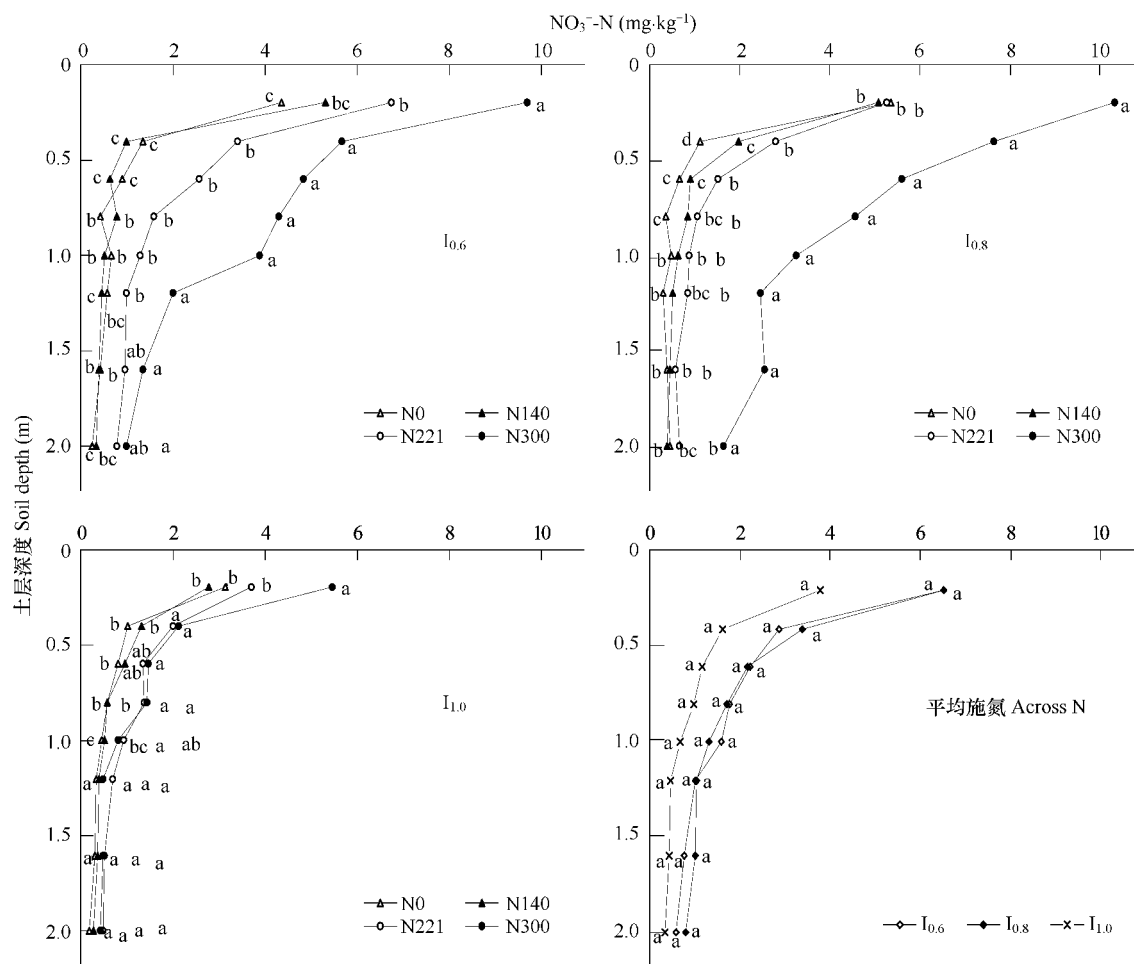


图3 不同灌溉与施氮水平下土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 的垂直分布

Fig. 3 Distribution of  $\text{NO}_3^-$ -N concentrations in the 0~2 m soil layer under different irrigation and nitrogen treatments

平均施氮 为 4 个施氮水平的平均值,同一土层中相同字母者差异不显著 Across N: the average over the 4 nitrogen rates; Means with the same letters within each soil layer are not significantly different among treatments at  $P < 0.05$

硝态氮含量均呈升高的趋势。 $N_{140}$ 和 $N_0$ 的硝态氮剖面分布相似,并且同一层次硝态氮含量差异不显著,大多数情况, $N_{221}$ 和 $N_{300}$ 处理硝态氮含量显著高于 $N_0$ 和 $N_{140}$ 处理,说明等于或大于 $221\text{ kg hm}^{-2}$ 的施氮量将超过作物吸氮量,导致 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 在 $0 \sim 200\text{ cm}$ 土壤剖面大量积累,将构成N淋溶的潜在危险。各灌溉处理硝态氮含量差异不显著( $P < 0.05$ ),表明灌溉量对春小麦生育期土壤硝态氮含量与分布的影响小于施氮量的影响。

### 2.2.2 对土壤剖面硝态氮积累的影响

将播种前与收获期各处理 $0 \sim 200\text{ cm}$ 土壤剖面 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 积累量进行方差分析,见图4,各处理播种前 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 积累量差异不显著,变化范围 $57.46 \sim 62.67\text{ kg hm}^{-2}$ 。春小麦收获期,当施氮量从 $0\text{ kg hm}^{-2}$ 增加到 $300\text{ kg hm}^{-2}$ ,硝态氮积累量变化范围为 $25.1 \sim 139.9\text{ kg hm}^{-2}$ 。在低灌溉处理( $I_{0.6}$ ,灌溉量 $378\text{ mm}$ )下, $N_0$ 与 $N_{140}$ 收获期硝态氮积累量低于播种前,表明 $N_0$ 与 $N_{140}$ 施氮处理土壤发生N损耗, $N_{221}$ 收获期硝态氮积累量约等于播种前,说明 $N_{221}$ 施氮处理保持土壤N平衡, $N_{300}$ 收获期硝态氮积累量显著大于播种前,产生大量 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 积累;在中等灌溉处理( $I_{0.8}$ ,灌溉量 $504\text{ mm}$ )下, $N_{300}$ 施氮处理同样产生大量 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 积累;在高灌溉处理( $I_{1.0}$ ,灌溉量 $630\text{ mm}$ )下,各施氮处理收获期硝态氮积累量显著低于播种前,均没有产生硝态氮积累。该结论表明:在低灌溉与中等灌溉处理下, $221\text{ kg hm}^{-2}$ 施氮处理保持土壤N平衡,大于 $221\text{ kg hm}^{-2}$ 的施氮量将超过作物吸氮量,导致 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 在 $0 \sim 200\text{ cm}$ 土壤剖面大量积累,将构成N淋溶的潜在危险;高灌溉处理下,一方面由于植株大量吸收,另一方面 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 大量淋溶,使各施氮处理收获期 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 积累量较播种前降低。为了比较灌溉量对硝态氮积累量的影响,在同一灌溉水平下,将4个施氮处理( $N_0$ 、 $N_{140}$ 、 $N_{221}$ 与 $N_{300}$ ) $0 \sim 200\text{ cm}$ 土壤剖面硝态氮积累量统计求均值,如图4(平均施氮)所示,通过比较发现,高灌溉处理硝态氮积累量明显低于低灌溉处理与中等灌溉处理,低灌溉处理与中等灌溉处理之间的硝态氮积累量差异不明显,主要原因是高灌溉处理的土壤水分下渗较多,导致 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 淋溶到 $200\text{ cm}$ 层以下的相应较大。

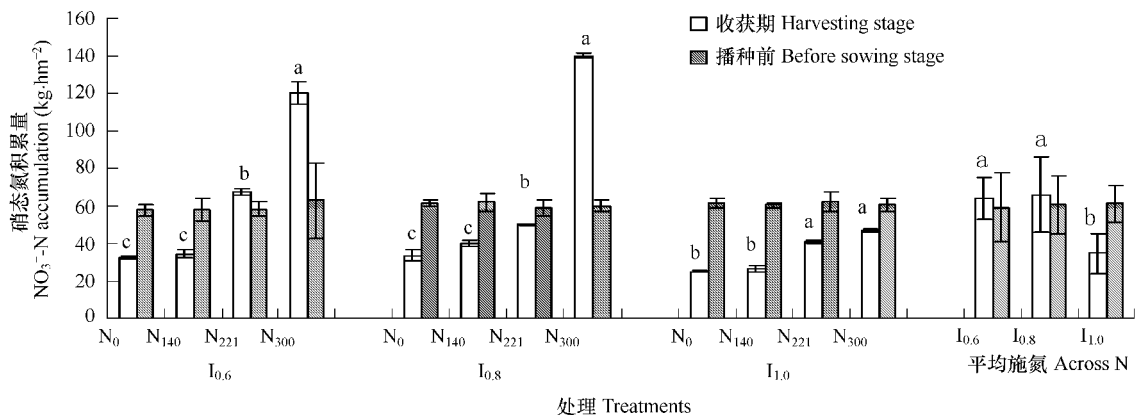


图4 不同灌溉与施氮水平下 $0 \sim 200\text{ cm}$ 土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的积累

Fig. 4 Accumulation of  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  in the  $0 \sim 200\text{ cm}$  soil profile under different irrigation and nitrogen treatments

平均施氮为4个施氮水平的平均值,同一土层中相同字母者差异不显著 Across N: the average over the 4 nitrogen rates; Means with the same letters within each soil layer are not significantly different among treatments at  $P < 0.05$

### 2.3 对作物产量和吸氮量的影响

如预期一样,春小麦籽粒产量、地上干物质质量(籽粒产量 + 秸秆产量)与施氮量均按抛物线规律变化(表3,抛物线方程没有在文中列出),当施氮量达到 $221\text{ kg hm}^{-2}$ 时,春小麦籽粒产量与地上干物质质量均达到最大值。在各灌溉处理下, $N_{300}$ 与 $N_{221}$ 的籽粒产量与地上干物质质量显著大于 $N_0$ 与 $N_{140}$ , $N_{300}$ 与 $N_{221}$ 之间、 $N_0$ 与 $N_{140}$ 之间的差异不显著。 $N_{221}$ 与 $N_0$ 、 $N_{140}$ 、 $N_{300}$ 相比,其籽粒产量平均值分别提高 $46.74\%$ 、 $41.26\%$ 与 $9.52\%$ ,其地上干物质质量平均值分别提高 $31.31\%$ 、 $25.17\%$ 与 $3.49\%$ 。同样,春小麦籽粒产量与地上干物质质量随着灌溉量增加而增加,但3个灌溉处理之间并无显著差异。

接表3 灌溉与施氮对籽粒产量、地上干物质量(籽粒产量 + 秸秆产量)、籽粒吸氮量、植株吸氮量(籽粒吸氮量 + 秸秆吸氮量)、氮肥表观利用率、生理效率、氮肥内部利用率、氮肥生产力及灌溉水生产力的影响



各处理籽粒吸氮量与植株吸氮量(籽粒吸氮量 + 秸秆吸氮量)随施氮量的增加而增加,当施氮量超过  $221 \text{ kg hm}^{-2}$  时,籽粒吸氮量与植株吸氮量不再显著增加(表3),方差分析表明,施氮量对籽粒吸氮量与植株吸氮量产生显著性的影响。尽管同一灌溉水平下的不同施氮处理之间的籽粒吸氮量与植株吸氮量表现出一定变异性,但大多数情况是  $N_{300}$  与  $N_{221}$  的值显著大于  $N_{140}$  与  $N_0$ ,  $N_{300}$  与  $N_{221}$  之间、 $N_{140}$  与  $N_0$  之间差异不显著。就3个灌溉水平平均值而言,施氮量从  $0 \text{ kg hm}^{-2}$  增加  $221 \text{ kg hm}^{-2}$ ,植株吸氮量从  $37.3 \text{ kg hm}^{-2}$  提高到  $88.4 \text{ kg hm}^{-2}$ ,当施氮量达到  $300 \text{ kg hm}^{-2}$  时,植株吸氮量下降至  $80.6 \text{ kg hm}^{-2}$ 。3个灌溉处理之间的籽粒吸氮量与植株吸氮量差异不显著。

#### 2.4 对氮效率与灌水生产力的影响

施氮区相对不施氮区增加的植株吸氮量与施氮量的比值称氮肥表观利用率(NF)。当施氮量达到  $221 \text{ kg hm}^{-2}$ ,籽粒产量、地上干物质质量及植株吸氮量达到最大值,导致NF在  $N_{221}$  施氮处理达到最大值。各处理NF平均变动在  $5.4\% \sim 27.0\%$ 。在3个灌溉水平下,  $N_{221}$  处理的NF显著大于  $N_{140}$  与  $N_{300}$ 。当施氮量超过  $221 \text{ kg hm}^{-2}$  时,NF显著下降,  $N_{140}$  与  $N_{300}$  处理的NF仅为  $N_{221}$  处理的  $30.9\%$  与  $63.0\%$ 。各处理平均值,3个灌溉量之间的NF差异不显著,4个施氮处理NF差异显著。

施氮区相对不施氮区增加的产量与相对增加的植株吸氮量的比值称生理效率(PE),生理效率越高说明产量随吸氮量增加的效果越明显。就各处理平均值而言,施氮量超过  $221 \text{ kg hm}^{-2}$  时,PE不再增加(表3)。灌溉量对PE产生效果不显著,施氮量对PE产生显著性影响,  $N_{221}$  与  $N_{300}$  的PE显著大于  $N_{140}$ ,  $N_{221}$  与  $N_{300}$  之间的差异不显著。从表3可以看出,氮肥内部利用率(产量与植株吸氮量的比值,IEN)随施氮量增加而减少,就其平均值而言,4个施氮处理之间的IEN差异不显著,3个灌溉处理之间的IEN差异显著,高灌溉处理的IEN显著大于低灌溉处理,中等灌溉处理与其它灌溉处理之间的IEN差异不显著。

氮肥生产力(NP)反映施氮量转化为产量的效率,表3示出,NP平均变动在  $6.3 \sim 10.8 \text{ kg kg}^{-1}$ ,即在  $378 \sim 630 \text{ mm}$  灌溉水平下,  $1 \text{ kg}$  氮肥可以生产  $6.3 \sim 10.8 \text{ kg}$  小麦,施氮量对NP产生显著性影响。在低灌溉水平与中等灌溉水平下,  $N_{221}$  的NP显著大于  $N_{140}$ ,  $N_{140}$  的NP显著大于  $N_{300}$ ;在高灌溉水平下,  $N_{221}$  与  $N_{140}$  的NP显著大于  $N_{300}$ ,  $N_{221}$  与  $N_{140}$  之间的差异不显著。就各处理均值而言,3个灌溉处理之间的NP差异不显著。

不考虑降雨对小麦产量的贡献率(该年春小麦生育期降雨量  $43.9 \text{ mm}$ ,远小于灌溉量),计算小麦灌溉水生产力(产量与灌水量的比值,WP),其平均变动在  $2.0 \sim 5.3 \text{ kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ ,即每  $100 \text{ mm}$  的灌溉水在  $1 \text{ ha}$  沙地农田面积上可以生产  $200 \sim 530 \text{ kg}$  小麦。3个灌溉处理之间的WP差异不显著,4个施氮处理之间的WP有显著差异,  $N_{221}$  与  $N_{300}$  处理的WP显著大于  $N_{140}$  与  $N_0$  处理,  $N_{221}$  与  $N_{300}$ 、 $N_{140}$  与  $N_0$  之间的差异不显著,施氮量超过  $221 \text{ kg hm}^{-2}$  时,WP不再显著增加(表3)。

### 3 讨论

#### 3.1 灌溉与施氮的 $\text{NO}_3^-$ -N 积累和淋溶效益

在干旱半干旱地区,灌溉与施肥是农田生态系统生产力维持的物质基础与保证。但不合理灌溉与施肥导致水肥利用率低下,同时也给环境带来污染的风险,农田  $0 \sim 200 \text{ cm}$  土壤剖面  $\text{NO}_3^-$ -N 积累是由于长期大量施用氮肥的结果<sup>[9]</sup>。黑河中游边缘绿洲区,特别是近几年新开垦沙地农田,保水保肥能力低,调查显示:大田种植灌溉量超过  $1000 \text{ mm}$ ,施氮量在  $350 \sim 450 \text{ kg hm}^{-2}$ 。本研究表明,春小麦生长季节,在  $378 \sim 540 \text{ mm}$  灌溉水平下,大于  $221 \text{ kg hm}^{-2}$  的施氮量超过作物吸氮量,这将导致  $\text{NO}_3^-$ -N 在  $0 \sim 200 \text{ cm}$  土壤剖面大量积累( $50.1 \sim 139.9 \text{ kg hm}^{-2}$ ),将构成N潜在淋溶的危险;在  $630 \text{ mm}$  灌溉水平下,收获期  $0 \sim 200 \text{ cm}$  土壤剖面  $\text{NO}_3^-$ -N 积累量小于播种前,没有产生  $\text{NO}_3^-$ -N 积累,主要原因是小麦生长量大(吸收氮素多)与灌水量大(硝态氮随灌溉水淋溶多)。Sexton 等<sup>[16]</sup>在沙质土壤进行灌溉与施肥的玉米种植试验,结果表明,当施氮量超过  $250 \text{ kg hm}^{-2}$  时,  $\text{NO}_3^-$ -N 淋溶急剧增加。Zhu 与 Chen<sup>[9]</sup>研究表明,中国北方黄土高原,玉米-小麦轮作中平均施氮水平为  $400 \sim 600 \text{ kg hm}^{-2}$ ,该施氮量超过作物氮的需求量,降低氮肥利用率,导致大量土壤硝态氮积累与硝态氮的深层淋溶。

### 3.2 灌溉与施氮的产量效益

研究表明,在起始  $\text{NO}_3^-$ -N 含量、基肥、灌溉与种植管理等相同的条件下,施用氮肥有显著增产效应。当施氮量达到  $221 \text{ kg hm}^{-2}$  时,春小麦籽粒产量与地上干物质质量都达到最大值。施氮量  $221 \text{ kg hm}^{-2}$  与施氮量  $0 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $140 \text{ kg hm}^{-2}$ 、 $300 \text{ kg hm}^{-2}$  相比,其籽粒产量分别提高 46.74%、41.26% 与 9.52%,其地上干物质质量分别提高 31.31%、25.17% 与 3.49%,这与其它地域的研究一致。李世娟等<sup>[6]</sup>在种植冬小麦限水灌溉条件下,水分利用效率以  $150 \text{ kg N hm}^{-2}$  施氮量最高,产量和氮肥利用率以  $225 \text{ kg N hm}^{-2}$  施氮量最高。Sexton 等<sup>[16]</sup>在沙质土壤进行灌溉与施肥的玉米种植试验,结果表明,获得玉米最高产量的施氮量为  $250 \text{ kg hm}^{-2}$ 。

保水保肥能力低的沙地农田,一次灌水过多会使多余的水分很快下渗到根系分布层以下而不能被作物吸收利用,同时使养分淋溶损失增加,这是高灌溉量的产量并不增加甚至下降的主要原因之一<sup>[17]</sup>。本研究结果表明,春小麦籽粒产量与地上干物质质量随着灌溉量增加而增加,3 个灌溉处理之间产量并无显著差异。苏培玺等<sup>[18]</sup>在新垦沙地花生灌溉试验表明,在相同施肥与栽培条件下,灌溉量对经济产量和地上生物产量并无显著性影响,当灌溉量超过花生需水量,经济产量和地上生物产量随着灌溉量增加而下降,同一灌溉量的条件下,经济产量与地上生物产量随着灌水次数的增加而提高。黑河中游边缘绿洲区新垦沙地农田具有很高节水潜力,春小麦全生育期可以节约 40% 灌溉量 ( $1.0 \text{ ET} - 0.6 \text{ ET} = 0.4 \text{ ET}$ ),节约灌溉量约等于  $252 \text{ mm}$  ( $630 \text{ mm} - 378 \text{ mm} = 252 \text{ mm}$ )。

### 3.3 灌溉与施氮的土壤贮水量效益

在春小麦各生育期,3 个灌溉处理间或 4 个施氮处理间土壤贮水量差异不显著,说明高灌溉量与高施氮只是增加土壤水分与养分向深层土壤下渗,并不能使土壤水分以较长时间保持在根系分布层,供作物吸收利用。因此在生产实践中,新垦沙地农田可采用控制灌溉量,进行多次少量灌溉、施氮的方法提高灌溉水与氮素的利用效率。

### 3.4 灌溉与施氮的吸氮量、氮肥生产力、灌溉水生产力效益

结果表明,在 3 个灌溉水平下,植株吸氮量与施氮量之间按抛物线规律变化。当施氮量达到  $221 \text{ kg hm}^{-2}$  时,植株吸氮量达到最大值;施氮量从  $0 \text{ kg hm}^{-2}$  增加  $221 \text{ kg hm}^{-2}$ ,植株吸氮量从  $34.9 \text{ kg hm}^{-2}$  提高到  $94.6 \text{ kg hm}^{-2}$ ;当施氮量为  $300 \text{ kg hm}^{-2}$  时,植株吸氮量下降至  $81.6 \text{ kg hm}^{-2}$ 。

作物氮肥生产力与灌溉水生产力是评价施氮与灌溉效应的一个很好指标,沙地农田小麦灌溉水生产力平均变动在  $2.0 \sim 5.3 \text{ kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ ,氮肥生产力 (NP) 平均变动在  $6.3 \sim 10.8 \text{ kg kg}^{-1}$ ,最高值接近中国北方小麦氮肥生产力下限及灌溉水生产力下限,远低于发达国家氮肥生产力水平与灌溉水生产力水平<sup>[16]</sup>。当氮肥施用量超过  $221 \text{ kg hm}^{-2}$  时,氮肥生产力与灌溉水生产力显著下降,这与沙地农田保水保肥能力低、高渗漏和高蒸发有关。中国北方高产地区,化学氮肥年施氮量超过  $500 \text{ kg hm}^{-2}$ ,年施氮量从 1978 年的  $174.4 \text{ kg N hm}^{-2}$  上升到 1998 年的  $592.4 \text{ kg N hm}^{-2}$ ,而氮肥生产力从  $46.3 \text{ kg kg}^{-1}$  下降到  $21.2 \text{ kg kg}^{-1}$ <sup>[4]</sup>。

最优水、氮管理要求掌握植株需水量、需氮量以及土壤氮动态与植株吸收氮的互作效益。气候变化对植株生长、植株需水量、植株需氮量及土壤氮矿化过程产生显著性的影响。为了确定最佳施氮量及最优施氮时间就需要考虑气候变化及土壤起始含氮量,根据植株生长与土壤情况进行施氮管理,从而提高氮肥利用效率与减少氮淋溶。在气候变化条件下,农业系统模型对水、氮管理起到非常重要作用,因为模型通过模拟植株生长/植株吸水/植株吸氮/气候/土壤之间动态交互作用,利用长期历史气候与土壤资料,可以很好估算植株需氮量与需水量。

## 4 结论

**4.1** 黑河中游边缘绿洲区新垦沙地农田,春小麦在  $378 \sim 504 \text{ mm}$  灌溉水平下,施氮量大于  $221 \text{ kg hm}^{-2}$  时超过作物吸氮量,会导致收获期在  $0 \sim 200 \text{ cm}$  土壤剖面大量积累  $\text{NO}_3^-$ -N ( $50.1 \sim 139.9 \text{ kg hm}^{-2}$ );在  $630 \text{ mm}$  灌溉水平下,收获期在  $0 \sim 200 \text{ cm}$  土壤剖面  $\text{NO}_3^-$ -N 残留量小于播种前起始  $\text{NO}_3^-$ -N 含量。

**4.2** 当施氮量达到  $221 \text{ kg hm}^{-2}$  时,春小麦籽粒产量、地上部干物质质量、植株吸氮量、肥表观利用率及生理效

率均达到最大值。灌溉水生产力平均变动在  $2.0 \sim 5.3 \text{ kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ , 氮肥生产力 (NP) 平均变动在  $6.3 \sim 10.8 \text{ kg kg}^{-1}$ 。

**4.3** 灌溉处理间或施氮处理间土壤贮水量差异不显著, 春小麦产量与地上干物质质量在低灌溉处理下 (灌溉量  $378 \text{ mm}$ ) 并未收到显著性降低, 说明该区域沙地农田生态系统具有通过控制灌溉量提高水分利用效率的潜力。在生产实践中, 可采用控制灌溉量与施氮量, 进行多次少量灌溉与分次施氮方法提高灌溉水与氮肥利用效率。

#### References:

- [1] Jin S L, Li L, Ma L H, *et al.* N nutrition characteristics of component crops on wheat / maize strip intercropping. *Acta Univ. Agric. Boreali-occidentalis*, 1996, 24 (5): 35—41.
- [2] Pu R F, Kang E S, Ai X S, *et al.* The analysis on the enrichment factors of heavy metal pollution in the agricultural soil made by people in Heihe River valley. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21 (5): 108—111.
- [3] Cheng G D, Xiao H L, Xu Z M, *et al.* Water issue and its countermeasure in the inland river basin of northwest China — a case in Heihe river basin. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28: 406—413.
- [4] Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, *et al.* Nitrate pollution of groundwater in north China. *Agric Ecosyst Environ*, 1996, 59: 223—231.
- [5] Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, *et al.* Investigation of nitrate pollution in ground water due to nitrogen fertilization in agricultural in north China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1995, 1 (2): 80—87.
- [6] Li S J, Zhou D X, Li J M. Effect of different nitrogen application on yield, nitrogen distribution and utilization in winter wheat under soil water stress. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2001, 16 (3): 86—91.
- [7] Fan B Q, Hu C F, Ping J L. Effect of irrigation and fertilization on nitrate leaching in loamy fluvo-aquic soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4 (1): 16—21.
- [8] Ju X T, Liu X J, Zhang F S, *et al.* Nitrogen fertilization, soil nitrate accumulation, and policy recommendations in several agricultural regions of China. *Ambio*, 2004, 33: 278—283.
- [9] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China-contribution to food production, impacts on the environment and best management strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63: 117—127.
- [10] Fang Q X, Yu Q, Wang E L, *et al.* Soil nitrate accumulation, leaching and crop nitrogen use as influenced by fertilization and irrigation in an intensive wheat- maize double cropping system in the North China Plain. *Plant Soil*, 2006, 284: 335—350.
- [11] Liu X J, Ju X T, Zhang F S. Effect of basal application of urea on inorganic nitrogen in soil profile. *Journal China Agricultural University*, 2001, 6 (5): 63—68.
- [12] Ma X H, Yu Z W, Liang X F, *et al.* Effects of nitrogen application rate and its basal-/ top-dressing ratio on spatio-temporal variations of soil  $\text{NO}_3^-$ -N and  $\text{NH}_4^+$ -N contents. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17 (4): 630—634.
- [13] Su P X, Du M W, Zhao A F, *et al.* Study on water requirement law of some crops and different planting mode in oasis. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2002, 20 (2): 79—85.
- [14] Ji X B, Kang E S, Zhao W Z, *et al.* Simulation of the Evapotranspiration from Irrigational Farmlands in the Oases of the Heihe River Basin. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(6): 713—719.
- [15] Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences. *Physical and Chemical Analysis Methods of Soil*. Shanghai: Shanghai Science Technology Press, 1978. 7—59.
- [16] Sexton B T, Moncrieff J F, Rosen C J, *et al.* Optimizing nitrogen and irrigation inputs for corn based on nitrogen leaching and yield on a coarse-textured soil. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25: 982—992.
- [17] Zhang S L, Tong Y A, Liang D L, *et al.* Nitrate-N movement in the soil profile as influenced by rate and timing of nitrogen application. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 270—277.
- [18] Su P X, Chen H S. Changes in yield under different irrigating schemes and photosynthetic characteristics of peanut in oasis. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31 (12): 1660—1664.

- [19] Ighadun H E, Mahoo H F, Tatio A K P R, *et al.* Crop water productivity of an irrigated maize crop in Mkoji sub-catchment of the Great Ruaha River basin, Tanzania. *Agricultural Water Management*, 2006, 85: 141—150.

## 参考文献

- [1] 金绍龄, 李隆, 马丽慧, 等. 小麦/玉米带田作物氮营养特点. *西北农业大学学报*, 1996, 24 (5): 35~41.
- [2] 蒲瑞丰, 康尔泗, 艾贤嵩, 等. 黑河流域农业土壤重金属人为污染的富集因子分析. *干旱区资源与环境*, 2007, 21 (5): 108~111.
- [3] 程国栋, 肖洪浪, 徐中民, 等. 中国西北内陆河水问题及其应对策略——以黑河流域为例. *冰川冻土*, 2006, 28: 406~413.
- [5] 张维理, 田哲旭, 张宁, 等. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查. *植物与营养学报*, 1995, 1 (2): 80~87.
- [6] 李世娟, 周殿玺, 李建民. 限水灌溉下不同氮肥用量对小麦产量及氮素分配利用的影响. *华北农学报*, 2001, 16 (3): 86~91.
- [7] 范丙全, 胡春芳, 平建立. 灌溉施肥对壤质潮土硝态氮淋溶的影响. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4 (1): 16~21.
- [11] 刘学军, 巨晓棠, 张福锁. 基施尿素对土壤剖面中无机氮动态的影响. *中国农业大学学报*, 2001, 6 (5): 63~68.
- [12] 马兴华, 于振文, 梁晓芳, 等. 施氮量和底施追施比例对土壤硝态氮和铵态氮含量时空变化的影响. *应用生态学报*, 2006, 17 (4): 630~634.
- [13] 苏培玺, 杜明武, 赵爱芬, 等. 荒漠绿洲主要作物及不同种植方式需水规律研究. *干旱地区农业研究*, 2002, 20 (2): 79~85.
- [14] 吉喜斌, 康尔泗, 赵文智, 等. 黑河流域山前绿洲灌溉农田蒸散发模拟研究. *冰川冻土*, 2004, 26 (6): 713~719.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所主编. *土壤理化分析*. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 7~59.
- [17] 张树兰, 同延安, 梁东丽, 等. 氮肥用量及施用时间对土体中硝态氮移动的影响. *土壤学报*, 2004, 41 (2): 270~277.
- [18] 苏培玺, 陈怀顺. 荒漠绿洲区花生在不同灌溉条件下的产量变化及光合生理特性. *作物学报*, 2005, 31 (12): 1660~1664.

表 3 灌溉与施氮对籽粒产量、地上干物质量(籽粒产量 + 秸秆产量)、籽粒吸氮量、植株吸氮量、植株吸氮量(籽粒吸氮量 + 秸秆吸氮量)、氮肥表观利用率、生理效率、氮肥内部利用率、氮肥生产力及灌溉水生产力的影响

| Table 3 The effects of different irrigation and N supply levels on grain yield (GY), above-ground dry-matter (grain yield + straw yield, DM), grain N uptake, plant N (grain N uptake + straw N uptake, plant N), apparent N recovery fraction (NF), physiological efficiency (PE), internal N use efficiency (IEN), nitrogen fertilizer productivity (NP) and irrigation water productivity (WP) |                              |                              |                                  |                                 |                                 |                |                                |                                   |                                 |                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------|
| 灌溉<br>(mm)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 施氮<br>(kg hm <sup>-2</sup> ) | 产量<br>(kg hm <sup>-2</sup> ) | 地上干物质量<br>(kg hm <sup>-2</sup> ) | 籽粒吸氮量<br>(kg hm <sup>-2</sup> ) | 植株吸氮量<br>(kg hm <sup>-2</sup> ) | 氮肥表观利用率<br>(%) | 生理效率<br>(kg kg <sup>-1</sup> ) | 氮肥内部利用率<br>(kg kg <sup>-1</sup> ) | 氮肥生产力<br>(kg kg <sup>-1</sup> ) | 灌溉水生产<br>(kg hm <sup>-2</sup> mm <sup>-1</sup> ) |
| Irrigation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | N                            | GY                           | DM                               | Grain N uptake                  | Plant N                         | NF             | PE                             | IEN                               | NP                              | WP                                               |
| 378                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0                            | 909 ± 79c                    | 2482 ± 337b                      | 22.6 ± 3.2d                     | 34.9 ± 8.2b                     |                |                                | 26.8 ± 5.5a                       |                                 | 2.4 ± 0.2c                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 140                          | 1063 ± 40c                   | 2799 ± 62b                       | 28.6 ± 2.4c                     | 46.6 ± 7.6b                     | 8.3 ± 2.1b     | 14.5 ± 6.5a                    | 22.9 ± 2.2a                       | 7.6 ± 0.3b                      | 2.8 ± 0.1c                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 221                          | 2014 ± 82a                   | 3902 ± 229a                      | 60.3 ± 2.9a                     | 94.6 ± 5.7a                     | 27.0 ± 2.4a    | 18.6 ± 1.1a                    | 21.3 ± 0.8a                       | 9.1 ± 0.4a                      | 5.3 ± 0.2a                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 300                          | 1762 ± 112b                  | 3704 ± 676a                      | 51.8 ± 3.9b                     | 78.9 ± 18.3a                    | 14.6 ± 6.1b    | 21.4 ± 8.3a                    | 23.0 ± 4.7a                       | 5.9 ± 0.4c                      | 4.7 ± 0.3b                                       |
| 504                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0                            | 1090 ± 70d                   | 2821 ± 293b                      | 25.2 ± 1.8b                     | 35.0 ± 2.7c                     |                |                                | 31.1 ± 0.4a                       |                                 | 2.0 ± 0.1d                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 140                          | 1184 ± 42c                   | 3034 ± 479b                      | 31.0 ± 4.8b                     | 46.3 ± 10.7b                    | 8.1 ± 7.0c     | 8.0 ± 2.3b                     | 25.5 ± 0.4b                       | 8.5 ± 0.3b                      | 2.2 ± 0.1c                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 221                          | 2093 ± 32a                   | 4110 ± 125a                      | 58.5 ± 1.0a                     | 86.2 ± 3.9a                     | 23.2 ± 0.9a    | 19.6 ± 1.4a                    | 24.3 ± 1.0bc                      | 9.5 ± 0.1a                      | 3.9 ± 0.1a                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 300                          | 1876 ± 37b                   | 3911 ± 186a                      | 55.6 ± 3.7a                     | 81.6 ± 7.8a                     | 15.5 ± 2.1b    | 17.0 ± 2.0a                    | 23.1 ± 1.6c                       | 6.3 ± 0.1c                      | 3.5 ± 0.1b                                       |
| 630                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0                            | 1410 ± 39b                   | 3268 ± 86b                       | 32.0 ± 2.5b                     | 42.1 ± 5.3b                     |                |                                | 33.9 ± 4.5a                       |                                 | 2.2 ± 0.1b                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 140                          | 1512 ± 53b                   | 3502 ± 149b                      | 36.2 ± 3.0b                     | 49.6 ± 6.5b                     | 5.4 ± 4.6b     | 16.7 ± 8.8a                    | 30.7 ± 3.2ab                      | 10.8 ± 0.4a                     | 2.4 ± 0.1b                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 221                          | 2292 ± 144a                  | 4466 ± 209a                      | 64.3 ± 7.5a                     | 84.3 ± 9.2a                     | 19.1 ± 4.0a    | 21.1 ± 2.2a                    | 27.3 ± 1.7b                       | 10.4 ± 0.7a                     | 3.6 ± 0.2a                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 300                          | 2154 ± 12a                   | 4426 ± 97a                       | 58.5 ± 1.3a                     | 81.3 ± 4.0a                     | 13.1 ± 0.9a    | 19.0 ± 1.7a                    | 26.5 ± 1.0b                       | 7.2 ± 0.0b                      | 3.4 ± 0.0a                                       |
| 处理平均值 Treatment means *                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                              |                              |                                  |                                 |                                 |                |                                |                                   |                                 |                                                  |
| 灌溉 (mm)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 378                          | 1437 ± 535a                  | 3222 ± 688a                      | 40.8 ± 18.1a                    | 63.8 ± 27.7a                    | 16.6 ± 9.5a    | 18.2 ± 3.5a                    | 23.5 ± 2.3b                       | 7.5 ± 1.6a                      | 3.8 ± 1.4a                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 504                          | 1561 ± 499a                  | 3469 ± 636a                      | 42.6 ± 16.9a                    | 62.3 ± 25.4a                    | 15.7 ± 7.5a    | 14.9 ± 6.1a                    | 26.0 ± 3.6ab                      | 8.1 ± 1.6a                      | 2.9 ± 0.9a                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 630                          | 1842 ± 445a                  | 3916 ± 620a                      | 47.7 ± 16.0a                    | 64.3 ± 21.6a                    | 12.3 ± 6.9a    | 18.9 ± 2.2a                    | 29.6 ± 3.4a                       | 9.5 ± 2.0a                      | 2.9 ± 0.7a                                       |
| 施氮<br>(kg hm <sup>-2</sup> N)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 0                            | 1136 ± 254b                  | 2857 ± 394b                      | 26.6 ± 4.8b                     | 37.3 ± 4.1d                     |                |                                | 30.6 ± 3.6a                       |                                 | 2.2 ± 0.2 b                                      |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 140                          | 1253 ± 232b                  | 3112 ± 358b                      | 31.9 ± 3.9b                     | 47.5 ± 1.8c                     | 7.1 ± 1.6c     | 13.0 ± 4.5b                    | 26.4 ± 4.0a                       | 9.0 ± 1.7a                      | 2.5 ± 0.3b                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 221                          | 2133 ± 143a                  | 4159 ± 285a                      | 61.0 ± 2.9a                     | 88.4 ± 5.5a                     | 23.0 ± 3.9a    | 19.8 ± 1.2a                    | 24.3 ± 3.0a                       | 9.7 ± 0.6a                      | 4.3 ± 0.9a                                       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 300                          | 1930 ± 202a                  | 4014 ± 372a                      | 55.3 ± 3.4a                     | 80.6 ± 1.5b                     | 14.5 ± 1.2b    | 19.2 ± 2.2a                    | 24.2 ± 2.0a                       | 6.4 ± 0.7b                      | 3.9 ± 0.7a                                       |

根据 Duncan 多重比较, 同一列中同一灌溉水平下施氮处理和平均值(灌溉或施氮)后的不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ ) Means within N fertilizer rates under same irrigation level, treatment means (irrigation or N rate) followed by the different letters in each column are significantly different at  $P < 0.05$  according to Duncan's multiple comparison test

\* 处理平均值为同一灌溉水平下 4 个施氮处理的平均值或同一施氮水平下 3 个灌溉处理的平均值 Treatment means indicate the average over 4 nitrogen rates within the same irrigation level or the average over 3 irrigation rates within the same nitrogen level