

灌溉与施氮对黑河中游新垦沙地农田土壤硝态氮动态的影响

王琦^{1,2}, 李锋瑞^{1*}, 张智慧¹

(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:研究了黑河中游绿洲边缘区新垦沙地农田不同灌溉量(分别为估算春小麦生育期需水量的 0.6、0.8、1.0 倍)和不同施氮量(0、140、221 和 300 kg·hm⁻²)对春小麦不同生育期土壤硝态氮含量及分布动态的影响。结果表明,施氮量为硝态氮淋溶的决定因素,土壤剖面中硝态氮的含量随着施氮量的增加而增加,当施氮量在 0~140 kg·hm⁻²之间时,硝态氮的淋溶较为缓慢,而在 221~300 kg·hm⁻²范围时硝态氮的含量显著增加,这表明当施氮量高于 221 kg·hm⁻²时易引起硝态氮的淋溶。收获期土壤的硝态氮含量明显低于开花期,且硝态氮存在显著差异的土层深度变浅。在综合 4 个施氮处理的情况下,不同灌溉处理同一土层土壤硝态氮的含量无显著差异($p < 0.05$),这一结果表明灌溉量对春小麦生育期土壤硝态氮淋溶过程的影响要小于施氮量。不同灌溉处理同一土层土壤硝态氮含量的差异因施氮水平的不同而异,多数情况下,低灌溉处理(I_{0.6})与中等灌溉处理(I_{0.8})的土壤硝态氮含量高于高灌溉处理(I_{1.0}),同时具有显著硝态氮含量差异的土层深度随施氮量的增加而递增,说明随着灌水量的减少硝态氮向下淋溶量也相应下降。

关键词:灌溉;施氮;硝态氮动态;新垦沙地农田

中图分类号:X144 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2008)07-2037-09

Effects of Different Irrigation and Nitrogen Supply Levels on Nitrate-N Dynamics in a Recently Reclaimed Sandy Farmland in Heihe River Basin

WANG Qi^{1,2}, LI Feng-rui¹, ZHANG Zhi-hui¹

(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)

Abstract: Improper nitrogen (N) and irrigation management are major causes leading to deterioration in water environmental quality in the middle reaches of Heihe River basin. A controlled experimental study of different irrigation and N supply levels was therefore conducted in the Linze Inland River Basin Research Station, Chinese Academy of Sciences, to determine the influences of N addition and irrigation regime on the dynamics of nitrate-N (NO₃⁻-N) distribution in soil profiles over the growing season of spring wheat. The experiment employed a completely randomized block split-plot design, with irrigation treatments [0.6, 0.8, 1.0 of the estimated evapotranspiration (ET), denoting I_{0.6}, I_{0.8} and I_{1.0} respectively] and N addition treatments [0, 140, 221, 300 kg·hm⁻², denoting N₀, N₁₄₀, N₂₂₁ and N₃₀₀ respectively] as the main-plot and split-plot, respectively. Our results show that the rate of N is the key factor in influencing NO₃⁻-N content and its leaching. The content of NO₃⁻-N in the 0-200 cm soil profiles was found to increase with increased N rates, and in particular this increase was more pronounced when the N rates ranged between 221 kg·hm⁻² and 300 kg·hm⁻². In addition, NO₃⁻-N leaching is relatively less apparent at the N rates in the range of 0-140 kg·hm⁻², but this effect became significant when the N rates exceeded 140 kg·hm⁻². Our results also show that NO₃⁻-N contents were generally higher at the anthesis stage than at the harvest stage within the same soil layer. The observed differences in NO₃⁻-N contents between the irrigation treatments of I_{0.6}, I_{0.8} and I_{1.0} were insignificant across N rates. This finding suggests that N addition treatments may have greater impacts on NO₃⁻-N leaching than irrigation treatments. Although the among-irrigation differences of NO₃⁻-N contents within the same soil layer varied with N level, there was a tendency that NO₃⁻-N content of I_{1.0} treatment was significantly lower than that of I_{0.8}, and that of I_{0.6} irrigation treatment in the soil layer with significant differences in N contents. This result suggests declined NO₃⁻-N leaching with decreased irrigation levels.

Key words: irrigation; nitrogen supply; nitrate-nitrogen dynamic; recently reclaimed sandy farmland

地处甘肃河西走廊黑河中游的张掖绿洲是依赖地表水与地下水灌溉而存在的农业区,也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,这不仅造成氮与水的利用率降低,而且导致

收稿日期:2007-07-17; 修订日期:2007-11-21

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项目(CXTD-Z2005-2-4); 干旱气象科学研究基金项目(LAM200605)

作者简介:王琦(1970~),男,博士,副教授,主要研究方向事草坪、作物和牧草节水技术, E-mail: wangqi512@sohu.com

* 通讯联系人, E-mail: wangqi512@sohu.com

地下水水质恶化^[1,2].地下水硝酸盐有多种来源,但是施用氮肥和土壤有机氮的矿化是造成地下水硝酸盐污染的主要原因^[3].中国北方灌溉耕地约有 15%~55%氮肥经淋溶进入地下,接近 30%的地下水硝态氮含量超标,部分地区达到 50%^[4,5].饮用水中过量的硝态氮对人体造成严重伤害^[6,7],鉴于此,世界卫生组织(WHO)颁布的饮用水NO₃⁻-N最大允许浓度为 10 mg•L⁻¹^[8],我国生活饮用水中NO₃⁻-N的最大允许含量为 20 mg•L⁻¹^[9].

高灌溉量和过量施氮导致硝态氮淋溶与作物减产,灌溉前土壤水分高低决定了硝态氮淋溶的数量,灌溉时间与施氮时间也是诱发硝态氮淋溶的重要因素^[10,11].在单作生产中,高产与硝态氮淋溶较少的最佳施氮量为 150~180 kg•hm⁻²^[12,13].在氮肥施用管理上,通常采用将肥料分次施用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NO₃⁻-N的淋溶^[14~16].

硝态氮不易被土壤胶体吸收,易随水移动而流失,硝态氮的时空变异性大^[17,18].许多因子诸如作物氮吸收动力学、氮肥管理、降雨量、灌溉管理、土壤质地和土壤氮转化等都会影响土壤中硝酸盐的移动及其淋溶,其中,灌溉与施氮是影响氮潜在淋溶的 2 个至关重要而且也容易调控的因子^[19~21].黑河中游边缘绿洲区,由于大部分农田为近几年来开垦的戈壁与沙漠地,土壤沙粒含量高、保水保肥性能差,作物生产大量耗水耗肥,硝态氮淋溶对地下水污染风险更大.虽然灌溉与施氮对土壤硝态氮淋溶研究较多,但对黑河中游边缘绿洲区新垦沙地农田研究报道较少.因此,本试验研究了灌溉与施氮对春小麦开花期

及收获期 2 个生育时期土壤硝态氮含量和分布的影响,旨在探明黑河中游新开垦沙地农田硝态氮淋溶的规律,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参考.

1 材料与方法

1.1 试验区自然条件与试验地概况

试验区位于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),试验站与巴丹吉林沙漠南缘相接,依黑河水和地下水灌溉发展起来研究区,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可忽略不计^[22].土壤为灌耕沙质新成土,黏粒、粉粒和沙粒含量分别为 2.33%、11.07%和 86.60%.土壤 0~40 cm 基础养分状况见表 1.其中全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾、有机质、pH 值测定方法分别为凯氏定氮法、NaOH 碱溶-钼锑抗比色法、火焰光度计法、碱解扩散法、Olsen 法、1 mol/L NH₄Ac浸提-火焰光度计法、重铬酸钾容量法、电位法.从表 1 可以看出,试验区土壤碱解氮含量 5.24~11.73 mg•kg⁻¹, < 50 mg•kg⁻¹,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 2 390 mm,年均气温 7.6℃,最高气温 39.1℃,最低-27℃,≥10℃的年积温为 3 088℃,无霜期 165 d,年日照时数为 3 045 h.地带性土壤为正常干旱土,土壤母质为洪积物;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.

表 1 试验土壤基本理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties in the experimental plots										
土层 /cm	容重 /g•cm ⁻³	田间持水量 /%	全氮 /g•kg ⁻¹	全磷 /g•kg ⁻¹	全钾 /g•kg ⁻¹	碱解氮 /mg•kg ⁻¹	速效磷 /mg•kg ⁻¹	速效钾 /mg•kg ⁻¹	有机质 /g•kg ⁻¹	pH
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

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^[23]的 0.6、0.8、1.0 倍,代表符号分别为 I_{0.6}、I_{0.8}、I_{1.0},施 N 量的 4 个水平分别为 N₀、N₁₄₀、N₂₂₁、N₃₀₀(折合纯氮 0、140、221 和 300 kg•hm⁻²),共有 12 个处理(3 个灌溉水平×4 个施氮水平),每个处理重复 3 次,36 个小区.根据当地春小麦灌溉情

况:3~4 月份灌水频率为 15~20 d,5~6 月份灌水频率为 10~15 d,漫灌最小一次灌水定额 100 mm,春小麦全生育期最小灌溉定额为 800 mm.灌溉水平中 I_{0.6}作为对照,施氮水平中 N₀作为对照,灌溉主区随机排列,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 m²,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

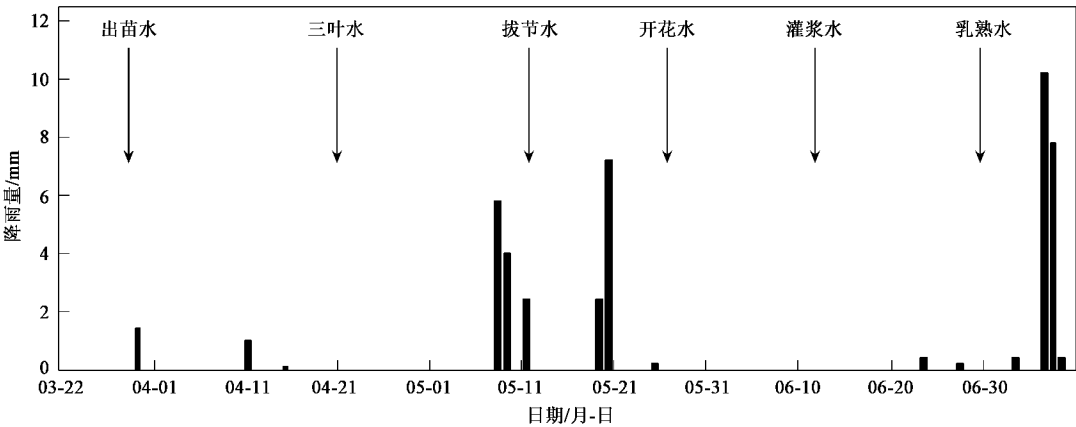
期 3 个灌溉量分别为 378、504 和 630 mm, 不包括生育期降雨量, 其中最大灌溉量 (630 mm) 小于当地大田的最小灌溉量 (800 mm), 原因是大田采用的是漫灌, 水源为附近井水, 首先将井水引入渠道, 然后用塑料管及水泵将渠道水灌入田间, 用水表进行计量. 氮肥分基肥和追肥 2 种, 基肥采用条播方式与春小麦种子同时施入, 追肥在灌水前撒施, 采用普通尿素 (含氮 46%) 为氮源, 施氮量、施氮次数及施氮时间见表 2. 气象资料由试验站的自动气象站提供, 距

试验地 500 m, 春小麦生育期降雨量及灌水时间见图 1, 2006 年春小麦生育期降雨量为 43.9 mm.

表 2 施氮量及施氮时间/kg·hm⁻²

Table 2 Rate and the date of N supply/kg·hm⁻²

时间	生育期	N ₀	N ₁₄₀	N ₂₂₁	N ₃₀₀
2006-03-31	出苗期	0	79	79	79
2006-04-24	三叶期	0	61	61	61
2006-05-16	拔节期	0	0	81	81
2006-06-03	开花期	0	0	0	79



垂直箭头代表灌溉, 出苗水为 3 月 31 日; 三叶水为 4 月 24 日; 拔节水为 5 月 16 日; 开花水为 6 月 3 日; 灌浆水为 6 月 13 日; 乳熟水为 6 月 24 日

图 1 2006 年春小麦生育时期降雨量及灌水时期

Fig. 1 Rainfall and the date of different irrigations during spring wheat growth in 2006

1.3 种植管理

试验地以沙漠为基质, 依靠灌溉发展起来的绿洲农田, 已有 5a 耕作历史, 2005 年玉米收割后进行翻地和耱地各 1 次. 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 2 d 各小区进行等量灌溉, 灌水量为 75 mm, 春小麦播种时间为 2006-03-22, 春小麦品种为陇富 920, 购自甘肃省临泽县种子公司, 播种量为 337.5 kg·hm⁻², 行距 15 cm, 春小麦种子与基肥采用条播方式施入, 施入土壤的深度大约为 5 cm. 根据当地农民施肥实践经验, 除 N₀ 不施加氮肥, 基肥用量与其它小区相等, 其中纯 N (普通尿素, 含氮 46%)、纯 P (过磷酸钙, 含 P₂O₅ 为 46%) 和纯 K (硫酸钾, 含 K₂O 为 50%) 用量分别为 79、41 和 39 kg·hm⁻². 2006-07-09 收获, 分别于 2006-05-10 和 2006-06-10 手工除草.

1.4 样品采集、测定与数据分析

在播种前, 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, 同一层次的土壤混合为一个样, 分析土壤有机质、养分全量、速效养分含量与 pH 值的变异系数, 经统计分析

完全符合农化试验的要求.

在播种前 1 d (2006-03-21)、开花期 (2006-06-16) 与收获后 1 d (2006-07-10) 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一个样, 测定土壤 NO₃⁻-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. 土壤鲜样充分混匀过 2 mm 筛, 称取 5 g 鲜土样 3 份, 采用 1 mol/L KCl (土液比 1:4) 振荡浸提 30 min 后, 离心上清液用流动注射分析仪测定硝态氮含量.

Across N 为综合 4 个施氮处理的平均值, 即在同一灌溉水平下, 将 4 个施氮处理 (N₀、N₁₄₀、N₂₂₁ 与 N₃₀₀) 同一层次硝态氮含量统计求均值, 得到某一灌溉水平 (I_{0.6} 或 I_{0.8} 或 I_{1.0}) 的土壤硝态氮含量均值.

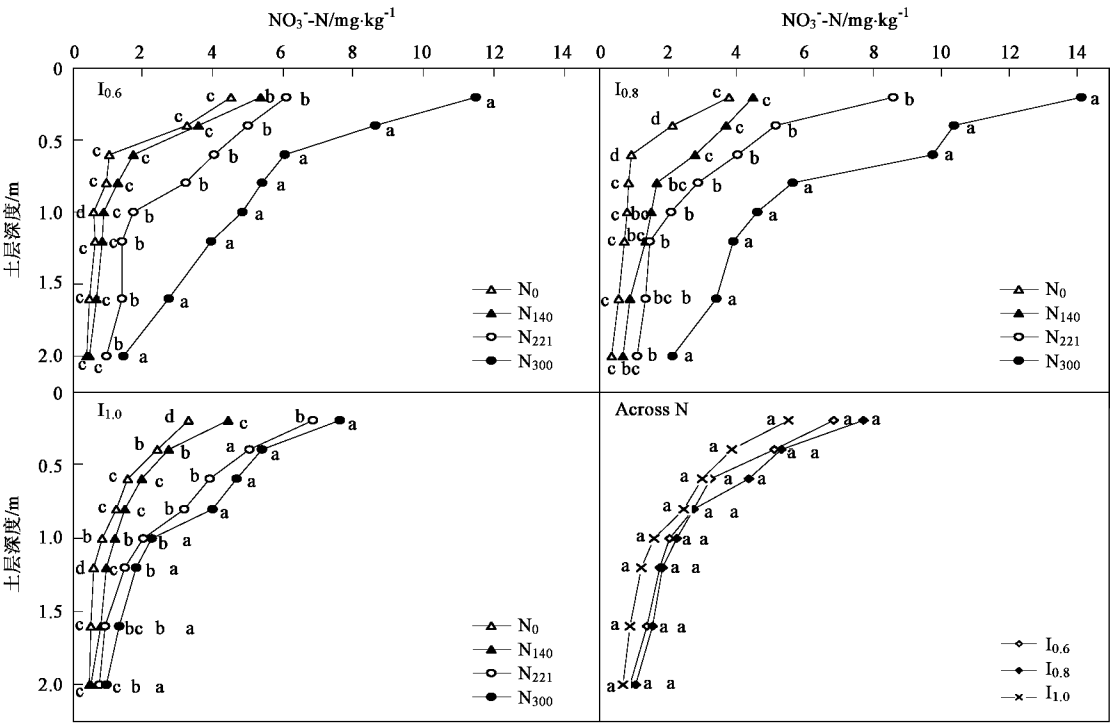
利用完全随机模型, 将 3 次重复收集的土壤参数采用 SPSS15.0 与 Excel 软件进行显著性检验与方差分析.

2 结果与分析

2.1 开花期不同施氮与灌溉对土壤硝态氮含量的影响

在同一灌溉水平下,对不同施氮处理 0~200 cm 同一层次土壤硝态氮含量进行比较,结果如图 2 所示.可以看出,春小麦开花期,在 3 个灌溉水平下,4 个施氮处理硝态氮含量曲线有共同形态,硝态氮含量在土壤表层含量最高,随着土层增加,硝态氮含量逐渐减少,尤其在 0~120 cm 土层减少最快.除了个别土层外, 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 处理二者之间硝态氮含量差异不显著,说明土壤硝态氮含量随施氮量增加而增加,尤其当施氮量达到 $221\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,土壤硝态氮含量显著增加.在同一灌溉水平下,将 4 个施氮处理 (N_0 、 N_{140} 、 N_{221} 与 N_{300}) 同一层次硝态氮含量统计求均值,得到某一灌溉水平 ($I_{0.6}$ 或 $I_{0.8}$ 或 $I_{1.0}$) 土壤硝态氮含量均值,如图 2 所示,通过对 $I_{0.6}$ 、 $I_{0.8}$ 与 $I_{1.0}$ 灌溉处理同一层次土壤硝态氮含量均值进行显著性比较,可以看出,春小麦开花期, $I_{0.8}$ 灌溉处理硝态氮含量高于 $I_{0.6}$ 灌溉处理, $I_{0.6}$ 灌溉处理硝态氮含量高于 $I_{1.0}$ 灌溉处理,但它们

三者之间的差异在 0~200 cm 土层没有达到显著性水平 ($p<0.05$). 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,说明施氮量在 $0\sim140\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 范围内,硝态氮的淋溶较为缓慢;当施氮量达到 $221\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, N_{221} 与 N_{300} 处理间同一层次硝态氮含量差异显著,同时 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 $221\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的施氮量将超过作物吸氮量,导致 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 在 0~200 cm 土壤剖面大量积累,将构成 N 淋溶的潜在危险.当灌水量较高时,一方面小麦生长量大吸收氮素多,使土壤硝态氮含量降低,另一方面由于灌水量大,使硝态氮随灌溉水淋失,大量还没有被小麦吸收的硝态氮随水向下迁移了,同时土壤通气不良而引起的反硝化损失,使 $I_{1.0}$ 灌溉处理硝态氮含量相对 $I_{0.6}$ 与 $I_{0.8}$ 灌溉处理硝态氮含量较低.



Across N 为 4 个施氮水平的平均值,根据 Duncan 多重比较法,同一层中标有不同字母表示差异显著 ($p<0.05$),下同

图 2 开花期不同施氮和灌溉水平下土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的垂直分布特征

Fig.2 Distribution of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ concentrations in the 0-2 m soil profiles under different nitrogen and irrigation levels at the anthesis stage

2.2 收获期不同施氮与灌溉对土壤硝态氮含量的影响

为了分析春小麦不同生育时期施氮量与灌溉量

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 可以看出,春小麦收获期不

同施氮处理土壤硝态氮分布与开花期类似,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.收获期与开花期相比,同一层次土壤硝态氮含量有所降低.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,且 N_{300} 与 N_{221} 处理间、 N_{140} 与 N_0 处理间差异不显著;当土壤深度超过

100 cm, N_0 、 N_{140} 、 N_{221} 与 N_{300} 处理间差异不显著,表明硝态氮主要积累在 0~100 cm 土层.综合 4 个施氮处理,将 3 个灌溉处理土壤硝态氮含量的均值进行比较,由图 3 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,但灌溉处理间差异没有达到显著性水平,表现与开花期同样的特征.从开花期(6 月 16 日)到收获期(7 月 9 日),由于灌溉水淋失与植株根系吸收的作用使得土壤硝态氮含量减少.

2.3 开花期同一施氮水平下不同灌溉处理对土壤硝态氮含量的影响

为了分析氮肥用量相同条件下灌溉量的差异对

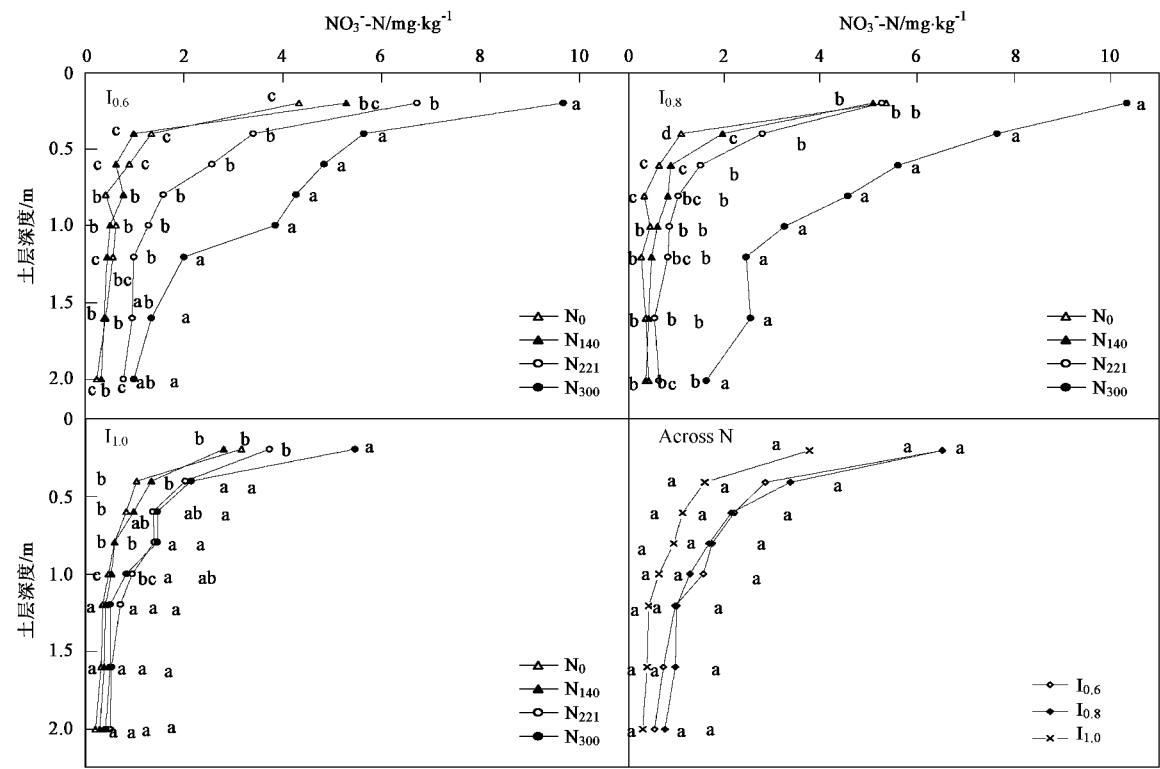


图 3 收获期不同施氮和灌溉水平下土壤 NO_3^- -N的垂直分布特征

Fig.3 Distribution of NO_3^- -N concentrations in the 0-2 m soil profiles under different nitrogen and irrigation levels at the harvest stage

土壤硝态氮含量与分布的影响,在同一施氮水平下,对不同灌溉处理同一土层土壤硝态氮含量进行比较(图 4),可以看出,硝态氮主要集中在 0~40 cm 土层.就土壤硝态氮含量而言,对 N_0 施氮水平,在 0~20 cm 土层, $I_{0.6}$ 灌溉显著高于 $I_{0.8}$ 灌溉, $I_{0.8}$ 灌溉显著高于 $I_{1.0}$ 灌溉;在 20~40 cm 土层, $I_{0.6}$ 灌溉显著高于 $I_{0.8}$ 与 $I_{1.0}$ 灌溉, $I_{0.8}$ 与 $I_{1.0}$ 灌溉之间差异不显著;在 40~100 cm 土层, $I_{1.0}$ 灌溉高于或显著高于 $I_{0.6}$ 与 $I_{0.8}$ 灌溉;在 100~200 cm 土层, $I_{0.6}$ 、 $I_{0.8}$ 与 $I_{1.0}$ 灌溉之间差异

不显著.对 N_{140} 施氮水平,在 0~20 cm 土层, $I_{0.6}$ 灌溉显著高于 $I_{0.8}$ 与 $I_{1.0}$ 灌溉;在 20~40 cm 土层, $I_{0.6}$ 与 $I_{0.8}$ 灌溉显著高于 $I_{1.0}$ 灌溉;在 40~120 cm (除 60~80 cm) 土层, $I_{0.8}$ 灌溉显著高于 $I_{0.6}$ 与 $I_{1.0}$ 灌溉;在 120~200 cm 土层, $I_{0.6}$ 、 $I_{0.8}$ 与 $I_{1.0}$ 灌溉之间差异不显著.对 N_{221} 施氮水平,在 0~20 cm 土层, $I_{0.8}$ 灌溉显著高于 $I_{0.6}$ 与 $I_{1.0}$ 灌溉;在 20~200 cm 土层, $I_{0.6}$ 、 $I_{0.8}$ 与 $I_{1.0}$ 灌溉之间差异不显著.对 N_{300} 施氮水平,在 0~60 cm 土层,

$I_{0.8}$ 灌溉显著高于 $I_{0.6}$ 灌溉, $I_{0.6}$ 灌溉显著高于 $I_{1.0}$ 灌溉; 在 60~200 cm (除 160~200 cm) 土层, $I_{0.8}$ 与 $I_{0.6}$ 灌溉显著高于 $I_{1.0}$ 灌溉, $I_{0.8}$ 与 $I_{0.6}$ 灌溉相差不显著。

尽管不同灌溉处理同一层次土壤硝态氮含量差异因施氮水平而异, 但图 4 的变化趋势表明, 在 N_0 与 N_{140} 施氮水平下, $I_{0.6}$ 灌溉在 0~20 cm 土层相对 $I_{0.8}$ 与 $I_{1.0}$ 灌溉较高, 且只有在 N_0 施氮水平下, $I_{1.0}$ 灌溉处理在 60~100 cm 土层相对 $I_{0.6}$ 与 $I_{0.8}$ 灌溉较高, 其余土层与其他施氮处理 (N_{221} 与 N_{300}), $I_{0.8}$ 灌溉相对

$I_{0.6}$ 与 $I_{1.0}$ 灌溉较高。由于灌水量较低 (N 淋溶较少) 以及小麦植株生长较弱 (吸收氮素较少), 低灌溉处理 ($I_{0.6}$) 硝态氮含量在土壤表层 (0~40 cm) 较高; 而灌水量较高 (N 淋溶较多) 与小麦植株生长较强 (吸收土壤表层氮素较多), 高灌溉量处理 ($I_{1.0}$) 在 0~200 cm 土壤剖面硝态氮含量较低 (只有在 N_0 水平, 60~100 cm 土层, $I_{1.0}$ 灌溉相对其它灌溉较高); 值得注意的是, 中等灌溉处理 ($I_{0.8}$) 硝态氮含量在土壤深层 (40~200 cm) 硝态氮含量较高。

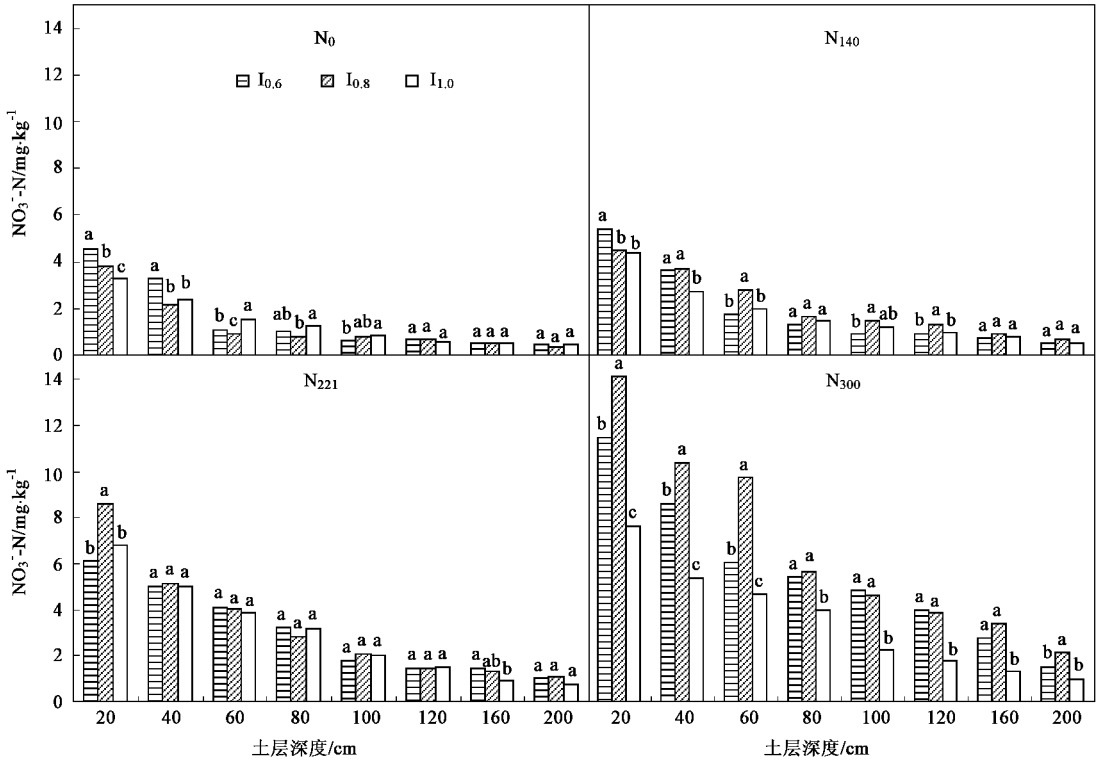


图 4 开花期同一施氮水平下不同灌溉处理对土壤硝态氮含量的影响

Fig.4 Irrigation regime effects on NO_3^- -N contents in soils as a function of depth at the same N level at the anthesis stage

2.4 收获期同一施氮水平下不同灌溉处理对土壤硝态氮含量的影响

在 N_0 、 N_{140} 、 N_{221} 与 N_{300} 施氮水平, 收获期不同灌溉处理对土壤硝态氮含量与分布的影响见图 5, 硝态氮含量仍然是在土层表层相对集中。 N_0 、 N_{140} 与 N_{221} 施氮水平不同灌溉处理土壤硝态氮含量显著性差异分别出现 0~20 cm、0~40 cm 与 0~60 cm 土层, 对 N_{300} 施氮水平, 不同灌溉处理土壤硝态氮含量显著性差异出现在整个测定土层 (0~200 cm)。对于出现硝态氮含量显著性差异的土层, 大多数情况下, $I_{0.8}$ 与 $I_{0.6}$ 灌溉处理土壤硝态氮含量显著高于 $I_{1.0}$ 处理, 与开花期规律基本类似。

通过对收获期 (图 5) 与开花期 (图 4) 土壤硝态氮含量的比较, 可以看出, 开花期同一层次土壤硝态氮含量明显高于收获期, 开花期春小麦根系发育达到高峰, 下层根系伸展到 1.6 m 以下土层, 因而能够充分吸收深层土壤中的 NO_3^- -N, 使收获期土壤 NO_3^- -N 含量较开花期低, 同时可以看出, 灌水量越大表层土壤中硝态氮含量越低。

3 讨论

自 1952~1987 年, 中国氮肥用量从 $5.9 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 增长到 $1396.4 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 相应氮肥损失从 $3.0 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 增长到 $698.2 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$, 氮肥损失

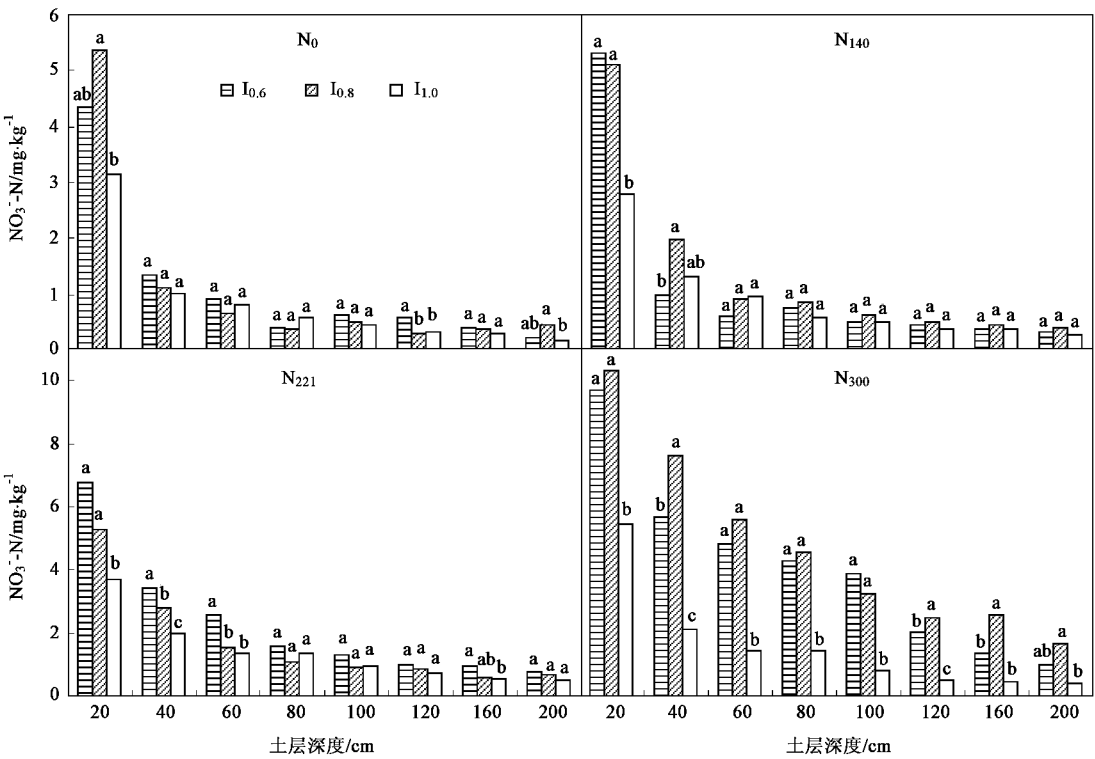


图 5 收获期同一施氮水平下不同灌溉处理对土壤硝态氮含量的影响

Fig.5 Irrigation regime effects on $\text{NO}_3^- \text{-N}$ contents in soils as a function of depth at the same N level at the harvest stage

相当于当年施氮总量的 50.8% ~ 50.0%^[3]. 氮素是生命的重要元素,同时也是水体污染的主要因子,氮肥施入土壤后,大部分以无机氮的形式存在,包括土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$,北方石灰性土壤中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 是作物利用的主要形态^[1~5]. 大量氮肥施于农田,由于作物不能全部吸收利用,土壤胶体又不能吸附 NO_3^- ,在降雨与灌溉条件下,土壤中硝酸盐很容易向下淋溶,从而污染地下水. $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 污染主要受 2 个条件的制约,一是土壤中水分的运动,二是土壤中大量残留的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$. 水分是 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 在土壤运动中的载体,土壤供水量越高,土体 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的淋溶量越大,同时残留的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 量越大, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的淋溶量越大. 质地粗的砂土粒间孔隙大,容易发生 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的淋失,而粘质土壤孔隙多但甚为狭小,大量非活性孔能阻止 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的淋失^[7,14,17].

试验区土壤为灌耕沙质新成土,春小麦开花期,在各灌溉水平下, N_{300} 处理土壤硝态氮含量显著高于 N_{221} 处理, N_{221} 处理土壤硝态氮含量显著高于 N_{140} 与 N_0 处理, N_{140} 与 N_0 处理间土壤硝态氮含量差异不显著,说明 221 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 与 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮量显著大于作物吸氮量,形成 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 大量积累,构成 N 淋溶的

潜在危险,而当施氮量在 0 ~ 140 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围内,硝态氮的淋溶较为缓慢. 春小麦收获期,在低灌溉($\text{I}_{0.6}$)与中等灌溉($\text{I}_{0.8}$)水平下,不同施氮处理硝态氮含量分布表现出与开花期类似的特征,具有硝态氮含量显著性差异的土层深度变浅;在高灌溉水平($\text{I}_{1.0}$)下,0 ~ 100 cm 土层深度, N_{300} 与 N_{221} 处理硝态氮含量显著高于 N_{140} 与 N_0 处理,且 N_{300} 与 N_{221} 处理间、 N_{140} 与 N_0 处理间硝态氮含量差异不显著;100 ~ 200 cm 土层深度, N_0 、 N_{140} 、 N_{221} 与 N_{300} 处理间硝态氮含量差异不显著. 表明当施氮量在 221 ~ 300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围时,硝态氮含量显著增加,可见施氮量等于或大于 221 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,易引起硝态氮淋溶. 高亚军等^[24]研究发现不论是春玉米还是冬小麦,当生育期施氮量 > 225 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,0 ~ 200 cm 土层均有明显的硝态氮积累. 由于灌溉水淋失与植株根系吸收作用,春小麦收获期土壤硝态氮含量明显低于开花期,硝态氮含量具有显著差异的土层深度变浅. 这表明小麦经过从开花期(6 月 16 日)到收获期(7 月 9 日)23 d 的生长,灌溉水淋失与植株根系吸收作用使春小麦收获期同一层次土壤硝态氮含量小于开花期,并且在高灌溉处理($\text{I}_{1.0}$)下,当土壤深度 > 100 cm 时,不

同施氮处理同一层次土壤硝态氮含量差异不显著。

黑河流域边缘绿洲区蒸发量远大于降雨量与灌溉量,由降雨与灌溉渗入通量和渗入深度有限,同时由于作物的耗水使大量硝态氮积累在土壤表层,硝态氮含量在土壤表层含量最高,随着土层增加硝态氮含量逐渐减少.Chaney^[25]研究发现,土壤中的硝态氮含量随施氮量的增加而增加,但并不是线性相关,此结论与该研究一致.高亚军等^[24]研究表明,氮肥用量为 $187.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,淋失量相当于施氮量的 36.2%,氮肥用量为 $375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,淋失量相当于施氮量的 38.3%,可以看出,施氮量越高,其淋失量越大.硝态氮淋失究竟以多大的土壤深度来衡量,目前尚无明确定论,一般认为 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的淋失量是以根层为依据的.小麦根系在 160 cm 以上占总根量的 95.4%^[26,27],因此,可以认为小麦能有效利用 160 ~ 200 cm 土体中的氮素,硝态氮下移至 200 ~ 300 cm 或更深的土层,应视为随灌溉水下渗而淋失下来的,可能是氮肥主要损失途径.因施氮肥过高或施肥方式不合理而导致土壤残留过多 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 情况下,土壤下层的氮素很难被作物利用,积累在土壤中的硝态氮,总是一个向下迁移的过程,随着时间的推移,这部分氮素损失可引起地下水源的污染。

不论开花期或收获期,在平均施氮水平下,不同灌溉处理间硝态氮含量差异不显著,说明施氮量是影响土壤硝态氮淋溶的主要因素,灌溉对春小麦生育期土壤硝态氮淋溶的影响比较小.Fang 等^[1]研究发现作物生育期的气候变化对植物生长及硝态氮淋溶产生显著性影响,尤其是降雨高峰期,降雨量对硝态氮淋溶的影响远大于灌溉对硝态氮淋溶的影响.在该研究中,2006 年春小麦生育期降雨量为 43.9 mm,其中最大一次降雨量为 10.2 mm,在蒸散高峰期,最大日蒸散量高于 10 mm,可以判断降雨量对该研究区硝态氮淋溶的影响远小于灌溉对硝态氮淋溶的影响。

尽管不同灌溉处理的同一层次土壤硝态氮含量差异因施氮水平而异,开花期与收获期硝态氮含量具有相同变化趋势,对 N_0 、 N_{140} 、 N_{221} 与 N_{300} 施氮处理土壤硝态氮含量显著差异分别主要出现 0 ~ 20 cm、0 ~ 40 cm、0 ~ 60 cm 与 0 ~ 200 cm 土层,硝态氮含量具有显著差异的土层深度随施氮量的增加而增加,对于出现硝态氮含量显著性差异的土层,大多数情况下是 $\text{I}_{0.8}$ 与 $\text{I}_{0.6}$ 灌溉土壤硝态氮含量显著高于 $\text{I}_{1.0}$ 灌溉.由于小麦生长量大(吸收氮素多)与灌水量大(硝态氮随灌溉水淋溶越多),高灌溉处理($\text{I}_{1.0}$)土壤

硝态氮含量显著低于低灌溉($\text{I}_{0.6}$)与中等灌溉处理($\text{I}_{0.8}$),说明随灌水量的减少硝态氮向下淋溶也相应减小。

综上所述,在春小麦生育期,最有可能造成土壤氮素淋失的因素是施氮量,笔者在另外研究中^[28],用回归方程计算得到该地区新垦沙地农田最佳经济施氮量为 $227 \sim 228 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.该研究表明,当施氮量等于或小于 $140 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,不易引起硝态氮淋溶.依据硝态氮淋溶确定的氮肥使用量($140 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)小于依经济产量确定的施氮量($227 \sim 228 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),该结论与 Zhu^[3]研究结果一致(单作农作物减少硝态氮淋溶推荐的施氮量为 $150 \sim 180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$).可以得出与该试验区相似土壤、气候的地区,当施氮量 $> 221 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,将引起产量的负增长;当施氮量 $> 140 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,将在 0 ~ 200 cm 土层产生更多氮积累,这必然导致大量硝态氮淋溶污染地下水,从而危及人畜及生态的安全及持续性发展.因此,要控制施氮量与灌溉量,才可以防止深层土体中氮素累积和淋失及由此造成的环境污染。

4 结论

黑河中游边缘绿洲新垦沙地农田,当施氮量在 0 ~ $140 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围内时,硝态氮的淋溶是缓慢的;当施氮量在 $221 \sim 300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围内时,硝态氮含量显著增加,易引起硝态氮淋溶.尽管不同灌溉处理的土壤硝态氮含量差异因施氮水平而异,但具有相同变化趋势,对于出现硝态氮含量显著性差异的土层,大多数情况下是低灌溉($\text{I}_{0.6}$)与中等灌溉($\text{I}_{0.8}$)处理土壤硝态氮含量显著高于高灌溉($\text{I}_{1.0}$)处理.在综合 4 个施氮处理的情况下,不同灌溉处理间硝态氮含量差异不显著,说明灌溉对春小麦生育期土壤硝态氮含量的影响小于施氮量的影响.由于灌溉水淋失与植株根系吸收作用,春小麦收获期土壤硝态氮含量明显低于开花期.较高的土壤蒸发使硝态氮在土壤表层积累最多。

参考文献:

- [1] 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 [J]. *Plant Soil*, 2006, **284**: 335-350.
- [2] 丁宏伟,张举.干旱区内陆平原地下水持续下降及引起的环境问题——以河西走廊黑河流域中游地区为例[J]. *水文地质工程地质*, 2002, **3**: 71-75.
- [3] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China-contribution to

food production, impacts on the environment and best management strategies [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, **63**: 117-127.

[4] 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[J].植物与营养学报,1995, **1**(2): 80-87.

[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 [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1995, **2**: 80-87.

[6] 张玉良.地下水系统的污染控制[M].北京:中国环境科学出版社,1991.

[7] 罗启仕,王慧,张锡辉,等.土壤中硝酸盐在非均匀电动力学作用下的迁移与转化[J].环境科学,2004, **25**(2): 98-103.

[8] 陈怀满.土壤中化学物质的行为与环境[M].北京:科学出版社,2002. 259-267.

[9] 中华人民共和国国家标准(GB 5749285).生活饮用水环境质量标准[M].北京:中国标准出版社,1988. 226-227.

[10] 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[J].土壤学报,2004, **41**(2): 270-277.

[11] Ottman M J, Pope N V. Nitrogen fertilizer movement in the soil as influenced by nitrogen rate and timing in irrigation wheat [J]. Soil Sci Soc Am J, 2000, **64**: 1883-1892.

[12] 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[J].植物营养与肥科学报,1998, **4**(1): 16-21.

[13] 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[J].华北农学报,2001, **16**(3): 86-91.

[14] 邓建才,陈效民,蒋新,等.典型地区饱和土壤中硝态氮垂直运移及拟合[J].环境科学,2005, **26**(2): 200-205.

[15] 刘微,赵同科.冬小麦土壤无机氮淋失规律及灌水施氮量的推荐[J].农业环境科学学报,2006, **25**(6): 1541-1546.

[16] Sowers K E, Pan W L, Miller B C, *et al.* Nitrogen use efficiency of split nitrogen application in soft white winter wheat [J]. Agronomy Journal, 1994, **86**: 942-948.

[17] 陈效民,邓建才,张佳宝,等.黄淮海平原主要土类中硝态氮水平运移规律[J].环境科学,2002, **23**(5): 96-99.

[18] 王朝辉,宗志强,李生秀,等.蔬菜的硝态氮累积及菜地土壤的硝态氮残留[J].环境科学,2002, **23**(3): 79-83.

[19] 苏涛,王朝辉,李生秀.黄土高原地区农田土壤的硝态氮残留及其生态效应[J].农业环境科学学报,2004, **23**(2): 411-414.

[20] Diez J A, Caballero R, Roman R, *et al.* Integrated fertilizer and irrigation management to reduce nitrate leaching in central Spain [J]. Journal of Environment Quality, 2000, **29**: 1539-1547.

[21] 陈效民,吴华山,孙静红.太湖地区农田土壤中铵态氮和硝态氮的时空变异[J].环境科学,2006, **27**(6): 1217-1222.

[22] 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[J].干旱地区农业研究,2002, **20**(2): 79-85.

[23] 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[J].冰川冻土,2004, **26**(6): 713-719.

[24] 高亚军,李生秀,李世清,等.施肥与灌水对硝态氮在土壤中残留的影响[J].水土保持学报,2005, **19**(6): 61-64.

[25] Chaney K. Effect of nitrogen fertilizer rate on soil nitrate nitrogen content after harvesting winter wheat[J]. J Agric Sci, 1990, **114**: 171-176.

[26] Parameswaran K V M, Graham R D, Aspinall D. Studies on the Nitrogen and Water Relations of Wheat[J]. Irrigation Science, 1984, **5**: 105-121.

[27] 童依平,李继云,刘全友,等.收获后不同小麦品种土壤硝态氮残留量的差异研究[J].环境科学学报,2000, **20**(2): 251-253.

[28] 王琦,李锋瑞,赵文智.黑河绿洲新垦沙地农田灌溉与施氮量对春小麦产量及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2007, **23**(12): 51-57.