

水氮配合对绿洲沙地农田玉米产量、 土壤硝态氮和氮平衡的影响

杨 荣^{1,2}, 苏永中^{1,2,*}

(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; 2. 黑河生态水文与流域科学实验室, 兰州 730000)

摘要:在黑河中游边缘绿洲沙地农田研究了不同的水氮配合对玉米产量、土壤硝态氮在剖面中的累积和氮平衡的影响。结果表明,施氮处理较不施氮处理产量增加 48.22% ~ 108.6%,施氮量超过 225 kg hm⁻²,玉米产量不再显著增加。受土壤结构影响土壤硝态氮在土壤中呈“W”型分布,即土壤硝态氮含量在 0 ~ 20 cm、140 ~ 160 cm 和 260 ~ 300 cm 土层均出现峰值,并随施氮量增加,峰值增高。在常规高灌溉量处理硝态氮含量峰值最高值出现在 260 ~ 300 cm 土层,节水 25% 灌溉处理硝态氮含量峰值最高值出现在土壤表层 0 ~ 20 cm 土层。在常规高灌溉量处理 0 ~ 300 cm 土层中 200 ~ 300 cm 土层硝态氮累积量所占比例最高,介于 27.56% ~ 51.86% 之间;节水 25% 灌溉处理在 0 ~ 300 cm 土层中 100 ~ 200 cm 土层硝态氮累积量所占比例最高,介于 32.94% ~ 38.07% 之间;表明低灌溉处理下土壤硝态氮在土壤浅层累积较多,而高灌溉处理使更多的硝态氮淋溶至土壤深层。与 2006 年相比,2007 年不施氮处理 0 ~ 200 cm 土层土壤硝态氮含量和累积量均明显减少;而施氮处理变化很小,在低灌溉处理甚至表现出硝态氮含量和累积量增加,表明施氮是土壤硝态氮累积的主要来源,而灌溉则使硝态氮向土壤深层淋溶。0 ~ 200 cm 土层土壤硝态氮累积量平均介于 27.66 ~ 116.68 kg hm⁻²、氮素表观损失量平均介于 77.35 ~ 260.96 kg hm⁻²,和施氮量均呈线性相关,即随施氮量增加,土壤硝态氮累积量和氮素表观损失量均增加,相关系数 R^2 介于 0.79 ~ 0.99 之间,相关均显著。随施氮量增加,玉米总吸氮量和氮收获指数增加,氮的农学利用率降低,而灌溉的影响较小。施氮量超过 225 kg hm⁻² 时,地上部植株氮肥吸收利用率和籽粒氮肥吸收利用率开始有降低趋势。所以,在沙地农田,节水 10% ~ 25% 的灌溉水平和 225 kg hm⁻² 的施氮水平可以在避免水肥过量投入的基础上减少土壤有机氮淋溶对地下水造成的污染威胁。

关键词:玉米;产量;灌溉;氮肥用量;氮平衡

文章编号:1000-0933(2009)03-1459-11 中图分类号:Q938 文献标识码:A

Effects of nitrogen fertilization and irrigation rate on grain yield, nitrate accumulation and nitrogen balance on sandy farmland in the marginal oasis in the middle of Heihe River basin

YANG Rong^{1,2}, SU Yong-Zhong^{1,2,*}

1 Linze Inland River Basin Comprehensive Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China

2 Heihe Key Laboratory of Ecohydrology and Integrated River Basin, CAREERI, CAS; Lanzhou 730000, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1459 ~ 1469.

Abstract: A 2-year field experiment was conducted to determine the effects of nitrogen fertilizer rate and irrigation amounts on grain yield, nitrate accumulation and nitrogen balance on sandy farmland in the marginal oasis in the middle of Heihe River basin. Experimental treatments included three irrigation levels (conventional irrigation: 12000 m³ hm⁻², 10% (2006) or 12.5% (2007) water-saving irrigation, 20% (2006) or 25% (2007) water-saving irrigation) and five N rates (N1, 0 kg hm⁻², N2, 150 kg hm⁻², N3, 225 kg hm⁻², N4, 300 kg hm⁻², N5, 375 kg hm⁻²). Nitrogen fertilizer application increased maize yield by 48.22% ~ 108.6% compared with no nitrogen fertilizer treatment. However, maize

基金项目:国家科技支撑计划项目(2007BAD46B06);国家自然科学基金资助项目(30670375);甘肃省自然科学基金资助项目(0741B91001)

收稿日期:2008-07-13; **修订日期:**2008-12-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangrong@lzb.ac.cn

yield, N uptake and use efficiency in total aboveground biomass and in grain did not increase significantly at N rates more than 225 kg hm⁻². There were three peak values of NO₃⁻-N content in the 0—20 cm, 140—160 cm and 260—300 soil layer as affected by soil texture and the peak values increased with increased N rates. Irrigation amount obviously influence NO₃⁻-N accumulation in soil profile. The NO₃⁻-N accumulation in the 200—300 cm layer was generally higher under conventional irrigation level than under the two water-saving irrigation treatments. However, NO₃⁻-N accumulation in the 0—100 layer was higher under 20%—25% water-saving irrigation treatments than the other two irrigation treatments. The result indicated that more amount of NO₃⁻-N was leached into deeper soil layers under conventional irrigation amount. The NO₃⁻-N concentration in the 0—200 cm depth under no N fertilizer treatment was significant lower in 2007 than in 2006. The amount of NO₃⁻-N accumulation in the 0—200 cm depth ranged from 27.66 kg hm⁻² to 116.68 kg hm⁻² and the amount of apparent losses ranged from 77.35 kg hm⁻² to 260.96 kg hm⁻², which had significant and positive correlations with N fertilizer rates (R^2 : 0.788 and 0.987). With the increase of application rates, total N uptake and N harvest index increased, but N use efficiency decreased. It is concluded that 10%—25% water-saving irrigation and N fertilization with 225 kg hm⁻² could improve irrigation water use efficiency and thereby reduce potential N leaching on sandy farmland.

Key Words: maize; yield; irrigation; nitrogen rates; nitrogen balance

地下水中的硝酸盐来源有多种,但普遍认为过量氮肥施用是造成地下水硝态氮污染的主要原因^[1]。尤其在灌溉农业生态系统,过量施肥更易引起硝态氮淋溶及地下水污染^[2]。大量的研究表明土壤硝态氮的累积和运移受包括作物氮素吸收利用率、氮肥管理、降雨、灌溉、土壤特征以及氮在土壤中转化等诸多因素的影响^[2]。其中氮肥管理和灌溉两个因子由于其便于农业生产者调控而受到国内外学者的广泛关注。许多研究都表明,施氮量超过最佳施氮量会增加作物收获后土壤硝态氮含量^[3-6], Campbell 等^[7]的研究表明,受灌溉水的影响,许多硝态氮的淋溶甚至发生在低于作物最佳施氮量的处理。从理论上讲,高施氮量必然导致土壤硝态氮的累积而最终淋溶向土壤深层,而低的氮肥施用量对硝态氮淋溶的潜在影响较小。但是针对不同的农业生产环境,合理的氮肥施用量和灌溉水平的确定往往需要结合诸如土壤特征等因素综合考虑,这就使得施肥和灌溉对土壤硝态氮淋溶影响的研究带有了区域特征。尽管大量水氮研究已经取得了许多研究成果,国内在中国科学院稷城站^[8]、北京东北旺试验基地^[9]、北京市水科所永乐店节水灌溉中心^[10]、山东省龙口市^[11]等地都开展了不同水氮处理对土壤硝态氮淋溶和累积规律的研究,但对沙质土壤水氮耦合试验研究鲜有报道。在 2006~2007 年连续两年在黑河中游边缘绿洲沙地农田生态系统开展了水氮配合试验,通过对沙地农田玉米产量、土壤硝态氮淋溶和氮平衡的影响,揭示不同水氮管理下,沙地农田硝态氮积累和淋溶的基本规律,提出合理的水氮运筹建议,为该区域农业生产提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2006~2007 年度在中国科学院临泽内陆河流域研究站综合观测场进行,研究站位于黑河中游甘肃省河西走廊中段临泽县北部平川镇(北纬 39°24', 东经 100°21', 海拔 1 350m),为近几十年来由老绿洲向荒漠扩展的边缘绿洲区,绿洲外围为沙漠与戈壁。其气候属于大陆性温带干旱气候,多年平均降水量为 116.8 mm,约 60% 的降雨集中在 7、8、9 月份。年蒸发量 2 390 mm,年均气温 7.6 °C,最高达 39.1 °C,最低为 -27.1 °C,无霜期 165 d。地带性土壤为正常干旱土,土壤母质为冲积-洪积物;由于长期风沙侵袭,发育成非地带性的砂质新成土;当人类开垦利用后,通过长期灌溉、施肥和耕作,形成灌溉旱耕人为土,土壤结构松散、肥力低下。试验地土壤为灌溉风沙土,基本理化性状见表 1,表 2。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,主处理为灌溉量,设 3 个水平即当地玉米常规灌溉 12000 m³ hm⁻² (W1)、节水 10%

表 1 试验地土壤物理性状

Table 1 Soil physical properties of the experiment field

土层 Soil depth (cm)	土壤粒级分布 Soil particle size distribution (%)			容重 Bulk density (g cm ⁻³)	田间持水量 Filed water holding capacity (%)
	砂粒 Sand 2 ~ 0.05 mm	粉粒 Silt 0.05 ~ 0.002 mm	黏粒 Clay < 0.002 mm		
0 ~ 20	84.5	11.4	4.1	1.43	20.93
20 ~ 40	91.3	4.3	4.4	1.55	22.46
40 ~ 60	93.4	3.6	3.0	1.56	20.60
60 ~ 80	90.8	5.6	3.6	1.55	22.26
80 ~ 100	90.0	5.3	4.7	1.55	22.32
100 ~ 120	90.8	4.9	4.3	1.56	21.48
120 ~ 140	89.9	5.5	4.6	1.57	20.79
140 ~ 160	79.0	14.2	6.8	1.61	22.11
160 ~ 180	91.0	4.3	4.2	1.58	27.98
180 ~ 2009	94.4	2.4	3.2	1.57	21.01

表 2 试验地土壤化学性状

Table 2 Soil chemical properties of the experiment field

土层 Soil depth (cm)	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	全磷 Total P (g kg ⁻¹)	全钾 Total K (g kg ⁻¹)	碱解氮 Available N (g kg ⁻¹)	有效磷 Olsen P (g kg ⁻¹)	速效钾 Available K (g kg ⁻¹)	pH
0 ~ 20	6.02	0.43	0.37	16.7	32.5	8.55	108	8.80
20 ~ 40	1.96	0.17	0.26	16.7	16.2	1.50	100	9.01
40 ~ 60	1.59	0.13	0.26	16.7	20.4	1.50	75	8.94
60 ~ 80	1.28	0.12	0.26	16.7	18.3	1.55	75	9.00
80 ~ 100	1.02	0.12	0.26	16.7	17.4	1.85	83	8.96

灌溉 10800 m³ hm⁻² (W2) 和节水 20% 灌溉 9600 m³ hm⁻² (W3), 考虑到沙地渗漏量大, 较小的灌溉水差异影响较小, 2007 年将灌溉量调整为常规灌溉水平 12000 m³ hm⁻² (W1)、节水 12.5% 灌溉水平 10500 m³ hm⁻² (W2)、节水 25% 灌溉水平 9000 m³ hm⁻² (W3), 灌水量用灌水管末端的水表控制计量。副处理为氮肥施用量, 在磷钾锌肥用量一致条件下, 设置 5 个施氮肥处理即不施氮肥 (N1)、施氮 150 kg hm⁻² (N2)、施氮 225 kg hm⁻² (N3)、施氮 300 kg hm⁻² (N4)、施氮 375 kg hm⁻² (N5)。主副区内随机排列, 3 次重复, 共 45 个小区, 小区面积 4 m × 5 m = 20 m²。试验用磷肥、钾肥和锌肥用量为: P₂O₅-K₂O-ZnSO₄ = 150-150-15 kg hm⁻², 氮、磷、钾肥分别为尿素 (N 46%)、过磷酸钙 (P₂O₅ 14%) 和硫酸钾 (K₂O 45%), 锌肥为硫酸锌。氮肥 1/3 作基肥, 与磷钾锌肥一起于播种前均匀撒于小区后随翻耕施入地下, 2/3 作追肥, 于拔节期和抽雄期均匀撒施于地面, 随灌水施入。供试玉米品种为郑单 958, 2006 年于 4 月 20 日播种, 9 月 25 日收获, 2007 年播种期和收获期分别为 4 月 22 日和 9 月 19 日。

1.3 样品采集与分析

玉米收获后用土钻采集 0 ~ 300 cm 深度的新鲜土样 (2006 年为 0 ~ 200 cm), 每小区取 3 钻, 按取样层次等层混合, 用塑料袋密封后, 立即运回实验室在 -4℃ 的冰箱中测定硝态氮含量。土壤硝态氮用 2 mol L⁻¹ 的 KCL 浸提, 滤液在 220 nm 和 275 nm 波长下比色测定其含量^[7]。

玉米收获期考种、测产取样, 样品 70℃ 烘至恒重后称重计算地上部干物重。样品粉碎过筛后, 用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 凯氏法测定植株和籽粒全氮。

1.4 数据分析

土壤 NO₃⁻-N 积累量计算:

土壤 NO₃⁻-N 积累量 (kg hm⁻²) = 土层厚度 (cm) × 土壤容重 (g cm⁻³) × 土壤 NO₃⁻-N 含量 (mg kg⁻¹) / 10

氮素矿化是根据无氮区作物吸氮量与试验前后土壤无机氮的净矿化来加以计算^[12],由于不考虑氮肥的激发效应,故假定施肥处理的土壤氮素矿化量和无氮区相同,即:

土壤氮素净矿化量 = 不施氮肥区地上部分氮积累量 + 不施氮肥区土壤残留无机氮量 - 不施氮肥起始无机氮量

根据氮平衡模型计算氮的表观损失^[13]:

氮表观损失 = 氮输入量 - 氮输出量 = (施氮量 + 起始无机氮 + 氮矿化) - (作物吸收 + 土壤残留无机氮量)

氮收获指数 = 籽粒氮积累量/植株总氮积累量^[14]

氮肥农学利用率 = (施氮区产量 - 不施氮区产量)/施氮量^[15]

地上部植株氮肥吸收利用率(%) = (施氮区地上部分氮积累量 - 不施氮区地上部分氮积累量) × 100% / 施氮量^[15]

籽粒氮肥吸收利用率 = (施氮区籽粒氮积累量 - 不施氮区籽粒氮积累量) × 100% / 施氮量^[15]

灌溉水生产力 = 玉米产量(kg)/灌溉量(m³)^[16]

土壤剖面中 NO₃⁻-N 的淋失量(kg hm⁻²) = 即初始土体硝态氮累积量(kg hm⁻²) - 土体残留硝态氮累积量(kg hm⁻²)^[17]

通过 SPSS 软件应用 LSD 法进行处理平均值间的方差分析和显著性检验。

2 结果与分析

2.1 水氮配合对沙地玉米产量的影响

从表 3 可以看出,2006 年,常规灌溉和高量氮肥投入的玉米产量最高,而高灌溉下的不施氮肥产量最低。

表 3 2006 年和 2007 年不同灌溉和施氮水平玉米产量

Table 3 Maize yields under different irrigation and nitrogen fertilizer application rates

灌溉处理 Irrigation rate	氮肥处理 N rate	产量 grain yield (kg hm ⁻²)		秸秆生物量 straw biomass (kg hm ⁻²)		灌溉水生产力 WP (kg m ⁻³)	
		2006	2007	2006	2007	2006	2007
W1	N1	6178 ± 204 a	7251 ± 149 c	5370 ± 105 c	5635 ± 122 b	0.51 ± 0.02 d	0.60 ± 0.01 c
	N2	11602 ± 402 b	11530 ± 440 b	6550 ± 361 b	6351 ± 382 b	0.97 ± 0.04 c	0.96 ± 0.04 b
	N3	12885 ± 449 a	12103 ± 3 ab	6438 ± 330 b	7054 ± 460 ab	1.01 ± 0.02 b	1.01 ± 0.01 ab
	N4	13560 ± 364 a	12069 ± 105 ab	7488 ± 233 a	8711 ± 370 a	1.13 ± 0.03 a	1.01 ± 0.01 ab
	N5	13693 ± 893 a	13124 ± 65 a	7804 ± 199 a	8338 ± 168 a	1.14 ± 0.08 a	1.09 ± 0.01 a
W2	N1	6995 ± 367 c	8144 ± 532 b	5265 ± 53 d	5449 ± 182 b	0.65 ± 0.03 c	0.75 ± 0.05 b
	N2	12013 ± 355 b	11698 ± 58 a	6258 ± 25 c	7604 ± 360 a	1.11 ± 0.03 b	1.08 ± 0.01 a
	N3	13131 ± 586 a	12186 ± 209 a	7898 ± 124 a	8795 ± 612 a	1.22 ± 0.06 a	1.13 ± 0.02 a
	N4	12431 ± 245 ab	12252 ± 692 a	7507 ± 156 b	8754 ± 121 a	1.15 ± 0.04 ab	1.13 ± 0.06 a
	N5	12371 ± 420 b	12102 ± 163 a	7562 ± 300 ab	8217 ± 222 a	1.15 ± 0.04 ab	1.12 ± 0.02 a
W3	N1	7339 ± 485 b	6908 ± 389 b	5235 ± 246 c	5307 ± 158 b	0.76 ± 0.05 b	0.72 ± 0.04 b
	N2	12254 ± 624 a	9830 ± 808 a	6612 ± 419 b	6792 ± 103 ab	1.28 ± 0.07 a	1.02 ± 0.08 a
	N3	12922 ± 96 a	11946 ± 499 a	7653 ± 361 a	8336 ± 389 a	1.35 ± 0.01 a	1.24 ± 0.05 a
	N4	12158 ± 424 a	11094 ± 167 a	7199 ± 186 a	7716 ± 452 a	1.27 ± 0.04 a	1.16 ± 0.02 a
	N5	12627 ± 834 a	11818 ± 334 a	7501 ± 247 a	7812 ± 448 a	1.32 ± 0.09 a	1.23 ± 0.03 a
平均值 Mean							
灌溉 Irrigation	W1	11583 a	11215 a	6371 a	7218 a	0.97 c	0.93 b
	W2	11388 a	11276 a	6898 a	7764 a	1.06 b	0.99 ab
	W3	11460 a	10319 a	6884 a	7193 a	1.20 a	1.07 a
氮肥 Nitrogen	N1	6837 c	7434 c	5290 d	5464 d	0.64 c	0.69 c
	N2	11956 b	11019 b	6474 c	6916 c	1.12 b	1.02 b
	N3	12979 a	12078 a	7330 b	8062 b	1.21 a	1.13 b
	N4	12716 a	11805 ab	7398 ab	8394 a	1.18 a	1.10ab
	N5	12899 a	12348 a	7622 a	8122 ab	1.20 a	1.15 a

同一列中不同灌溉水平下的施氮量处理和平均值(灌溉或施氮)后不同字母表示差异显著 In each section, means followed by a different letter within a column are significantly different at $P < 0.05$

但3个灌溉处理之间玉米产量并无显著差异,尽管在同一施肥水平下不同灌溉处理之间产量表现出一定的变异性,但其平均值基本一致。在施足有机肥和磷、钾肥、锌肥的基础上,施用氮肥表现出显著的增产效应,施用150、225、300 kg hm⁻²和375 kg hm⁻²,平均产量较不施氮处理分别增加74.8%、108.6%、98%和101.4%,施氮225、300 kg hm⁻²和375 kg hm⁻²处理差异不显著,说明氮肥用量超过225 kg hm⁻²时,产量不再显著增加。地上部秸秆生物量表现出与籽粒产量基本相同的灌溉和施氮肥效应。

2007年,玉米产量最高依然是常规灌溉和高氮肥处理,产量最低为节水25%处理的不施氮肥处理。3个灌溉处理间玉米产量无显著差异,12.5%节水灌溉处理的五个施肥处理平均值高于常规灌溉处理。施用150、225、300 kg hm⁻²和375 kg hm⁻²,平均产量较不施氮处理分别增加48.22%、61.66%、62.47%和66.02%。不施氮肥处理下,常规高量灌溉籽粒产量低于12.5%节水灌溉处理,而在氮肥施用情况下,常规灌溉处理产量高于12.5%节水灌溉和25%节水灌溉处理,表现出了明显的交互效应。

玉米灌溉水生产力平均变动在0.51~1.35 kg m⁻³之间,2a的试验结果均表明灌溉水生产力随施氮量的增加而增加,但随灌溉量的增加而减少。

2.2 水氮配合对沙地土壤硝态氮含量和积累量的影响

从图1可以看出,2006年,各处理0~20 cm土层土壤硝态氮含量最高且随施氮量的增加而增加,常规灌溉水平硝态氮含量又低于节水灌溉处理。40~140 cm土层硝态氮含量较低且分布均匀,各处理最低的硝态氮含量均出现在该土壤层次。在140~160 cm土层出现硝态氮含量峰值,在常规灌溉水平,施氮量超过225 kg hm⁻²的3个施氮处理硝态氮含量较高,硝态氮在该层次有一定的积累,而施氮量低于225 kg hm⁻²的两

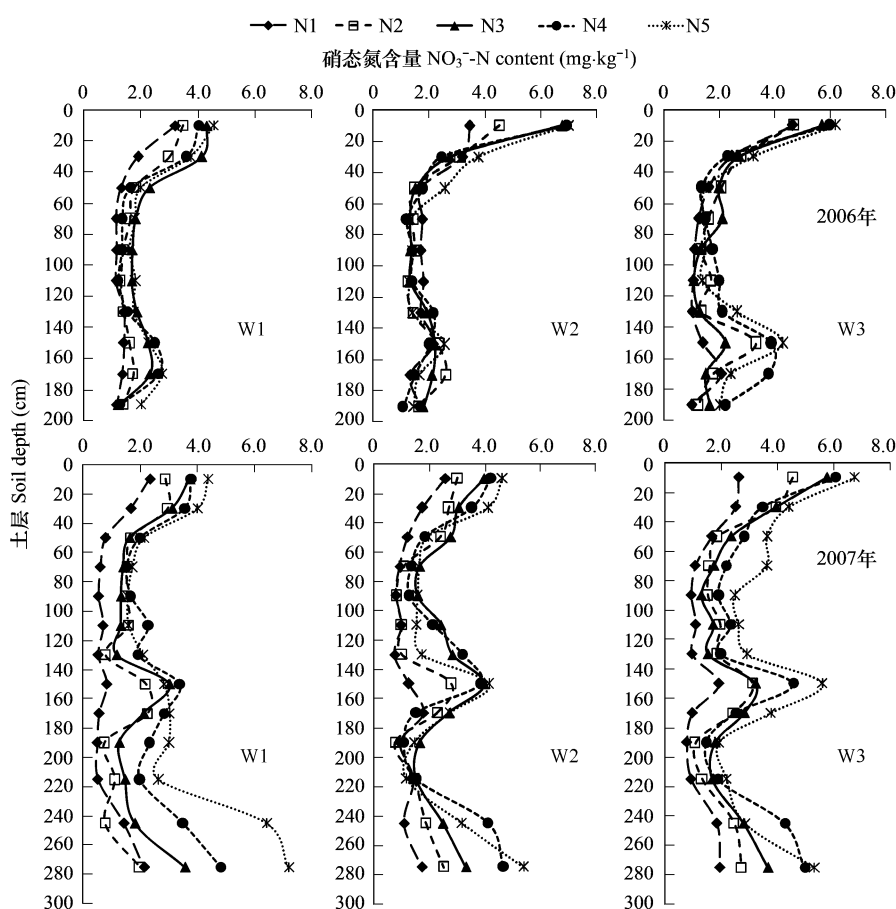


图1 2006年和2007年不同灌溉和施氮水平下土壤NO₃⁻-N在剖面的分布

Fig. 1 NO₃⁻-N concentration in soil layer under different irrigation rates and nitrogen fertilizer application rates in 2006 and 2007

个处理硝态氮含量在该层次的峰值不明显,与 40 ~ 140 cm 土层含量相差不大;在节水 10% 灌溉水平下,5 个施氮处理在该层次硝态氮含量均较高,但各施氮处理间差异很小;在节水 20% 灌溉水平下,该土壤层次土壤硝态氮含量峰值较高,明显的随施氮量的增加而增加。在 0 ~ 200 cm 土层,随施氮量的增加,硝态氮的积累量有增加的趋势(表 4),不同的灌溉水平对土壤硝态氮的积累量有明显的影响,表现为随灌溉量的减少而增加。从不同层次土壤硝态氮所占比例来看,在 0 ~ 200 cm 土层积累的硝态氮多集中在 0 ~ 100 cm 土层,这主要受土壤质地的影响。不同施氮处理平均,节水 20% 的灌溉处理 0 ~ 200 cm 土层硝态氮的积累量为 72.2 kg hm⁻²,比节水 10% 处理和常规灌溉处理高 4.6% 和 13.7%。

表 4 2006 年和 2007 年不同灌溉和施氮水平下土壤 NO₃⁻-N 在剖面的积累量(kg hm⁻²)

Table 4 NO₃⁻-N concentration in soil layer under different irrigation rates and nitrogen fertilizer application rates in 2006 and 2007

年份 Year	灌溉处理 Irrigation	氮肥处理 N rate (kg hm ⁻²)	土层 Soil layer (cm)							
			0 ~ 100cm		100 ~ 200cm		200 ~ 300 cm		0 ~ 200cm	
			占 0 ~ 300cm 比例(%) Percent of 0 ~ 300cm		占 0 ~ 300cm 比例(%) Percent of 0 ~ 300cm		占 0 ~ 300cm 比例(%) Percent of 0 ~ 300cm		占 0 ~ 300cm 比例(%) Percent of 0 ~ 300cm	
2006	W1	0	26.24	—	20.29	—	—	—	46.53	—
		150	34.10	—	23.37	—	—	—	57.47	—
		225	43.29	—	29.56	—	—	—	72.85	—
		300	36.22	—	28.96	—	—	—	65.18	—
		375	41.42	—	33.53	—	—	—	74.95	—
	W2	0	36.37	—	27.88	—	—	—	64.24	—
		150	36.37	—	29.30	—	—	—	65.67	—
		225	41.30	—	30.01	—	—	—	71.31	—
		300	41.42	—	26.04	—	—	—	67.45	—
		375	48.32	—	26.56	—	—	—	74.88	—
	W3	0	33.11	—	20.58	—	—	—	53.69	—
		150	37.67	—	29.78	—	—	—	67.46	—
		225	41.55	—	24.57	—	—	—	66.12	—
		300	38.35	—	44.03	—	—	—	82.38	—
		375	41.49	—	40.35	—	—	—	81.84	—
2007	W1	0	17.85	35.57	9.81	19.54	22.53	44.89	27.66	50.19
		150	32.18	41.46	24.05	30.98	21.39	27.56	56.23	77.62
		225	33.87	33.93	28.18	28.22	37.79	37.85	62.05	99.83
		300	37.85	28.25	40.18	29.99	55.95	41.76	78.03	133.97
		375	41.82	24.70	39.69	23.44	87.83	51.86	81.52	169.34
	W2	0	22.06	35.10	18.12	28.83	22.68	36.07	40.18	62.86
		150	30.48	34.94	25.04	28.70	31.71	36.36	55.51	87.22
		225	39.63	32.32	43.11	35.17	39.85	32.51	82.74	122.59
		300	37.04	28.34	37.48	28.67	56.20	42.99	74.52	130.72
		375	42.21	31.56	36.96	27.63	54.60	40.81	79.17	133.77
	W3	0	26.88	38.07	18.28	25.88	25.45	36.05	45.16	70.61
		150	40.80	37.38	33.29	30.50	35.05	32.12	74.09	109.14
		225	45.68	36.43	35.34	28.18	44.36	35.38	81.01	125.38
		300	49.53	32.94	40.77	27.11	60.06	39.95	90.30	150.36
		375	63.30	36.41	53.38	30.71	57.17	32.89	116.68	173.85

2007 年(图 1),各处理 0 ~ 20 cm 土层硝态氮含量依然较高,且随施氮量的增加而增加,常规灌溉水平硝态氮含量低于节水灌溉处理,其中节水 12.5% 灌溉处理土壤硝态氮含量又低于节水 25% 灌溉处理。与 2006 年相比,不施氮处理 40 ~ 140 cm 土层土壤硝态氮明显降低,而施氮处理明显增加,而且增加趋势随灌溉量的

减少而明显增强。在 140 ~ 160 cm 土层依然存在硝态氮含量峰值,除不施氮处理峰值比 2006 年降低之外,其它几个氮肥处理峰值都明显比 2006 年增高,而且峰值的高度受灌溉量的影响也较明显,施氮量高的低灌溉处理峰值最高。为充分了解土壤硝态氮在土壤中的分布规律,2007 年土壤硝态氮含量的测定土层从 200 cm 增加至 300 cm,分析结果表明(图 1),在 230 ~ 300 cm 土层内土壤硝态氮含量出现高峰,而且土壤硝态氮含量随灌溉量和施肥量的增加而增加,最大值为常规灌溉的最高氮肥施用量处理。在 0 ~ 300 cm 土层,土壤硝态氮的积累量有随灌溉量和施肥量的增加而增加的趋势(表 4),其中 200 ~ 300 cm 土层土壤硝态氮的积累量所占比例明显高于 0 ~ 100 cm 土层和 100 ~ 200 cm 土层,施氮量和灌溉量越大所占比例越高。表明,施肥量和灌溉量的增加,都会增加土壤硝态氮淋溶的可能性。

2.3 水氮配合对沙地土壤-玉米体系中氮素平衡的影响

根据土壤无机氮和玉米吸氮动态,运用氮平衡原理计算了 2007 年玉米生育期阶段的氮素平衡(表 5)。氮输入包括氮肥、起始土壤无机氮和氮矿化 3 部分;氮输出包括作物吸收、残留无机氮和表观损失 3 部分,其中表观损失是氮输入总量与作物吸收和残留无机氮两项输出之差,指各处理肥料氮相对与对照处理的损失数量。文中讨论的 N 平衡中土壤残留无机氮主要是以 NO_3^- -N 含量为依据^[18]。

考虑到作物根系有效利用土壤氮的范围,在氮平衡计算中,将土壤无机氮所在层次定义为 0 ~ 200 cm 深度。从表可以看出,施氮量在总输入项中所占比例最高,而土壤自身的供氮能力也不容忽视,土壤氮素矿化量加上起始无机氮的数量,土壤自身供氮量介于 139.06 ~ 185.57 kg hm^{-2} 之间。随着施氮量的增加,作物氮素积累量增加,而表观损失量也相应的增加,表明适当降低施氮量可有效减少氮素损失。由于气候及管理措施的原因,当季氮素的气体损失不严重,表观损失可能主要是由淋洗引起的。除不施氮处理,其它各处理无机氮残留量均有所增加,容易淋洗出土壤体系,造成地下水环境的污染。

表 5 2007 年玉米氮素平衡 (kg hm^{-2})

Table 5 Nitrogen balance of grain

灌溉处理 Irrigation rate	氮肥处理 N rate	项目 Item					
		(A) 氮输入 Nitrogen input			(B) 氮输出 Nitrogen output		
		(1) 施氮量 Nitrogen fertilizer rate	(2) 起始无机氮 Initial Nmin	(3) 矿化 Net mineralization	(4) 作物携出 Crop uptake	(5) 残留无机氮 Residual Nmin	(6) 表观损失 Apparent losses
W1	N1	0.00	46.53	92.53	111.41	27.66	0.00
	N2	150.00	57.47	92.53	141.21	56.23	102.57
	N3	225.00	72.85	92.53	163.41	62.05	164.92
	N4	300.00	65.18	92.53	193.82	78.03	185.86
	N5	375.00	74.95	92.53	202.67	81.52	258.30
W2	N1	0.00	64.24	90.08	114.14	40.18	0.00
	N2	150.00	65.67	90.08	168.42	55.51	81.82
	N3	225.00	71.31	90.08	226.29	82.74	77.35
	N4	300.00	67.45	90.08	187.91	74.52	195.10
	N5	375.00	74.88	90.08	199.83	79.17	260.96
W3	N1	0.00	53.69	104.09	112.62	45.16	0.00
	N2	150.00	67.46	104.09	151.43	74.09	96.03
	N3	225.00	66.12	104.09	178.12	81.01	136.07
	N4	300.00	82.38	104.09	169.13	90.30	227.04
	N5	375.00	81.84	104.09	206.98	116.68	237.26

相关分析表明,施氮量与土壤硝态氮累积量呈显著线性关系,即随施氮量的增加土壤硝态氮累积量线性增加,常规灌溉、12.5% 节水灌溉水平和 25% 节水灌溉水平 R^2 分别为 0.97、0.79 和 0.96。

氮素表观损失包括氨态氮的挥发、硝态氮淋溶等,相关分析表明,氮素表观损失量随施氮量的增加线性增加,呈显著线性关系。常规灌溉、12.5% 节水灌溉水平和 25% 节水灌溉水平 R^2 分别为 0.99、0.90 和 0.91。

2.4 0~200 cm 土壤剖面硝态氮损失量

计算土壤剖面中 NO_3^- -N 的淋失量,即初始土体硝态氮累积量和土体残留硝态氮累积量的差值。分析表明,灌溉量和施肥量对土壤剖面 NO_3^- -N 的损失量有一定影响。0~200cm 中以 0~20cm 土层硝态氮损失量较大,较深层次特别是在 100cm 土层以下也有部分层次存在硝态氮的损失,但损失量一般较小,大部分则表现为土壤硝态氮累积量有所增加,尤其施氮量为 225、300 kg hm^{-2} 和 375 kg hm^{-2} 的高氮肥处理土体硝态氮累积量的增加更为明显,表明表层土壤硝态氮向深层土壤淋溶。不施氮处理土壤硝态氮损失量最大,土体硝态氮损失量最大的处理均为各灌溉处理下的不施肥处理,这主要是因为不施氮土体得到氮源补充只能通过土壤自身的矿化,而这部分氮源还要被作物吸收利用一部分,再加上淋溶损失,所以土体硝态氮的损失量较大。而高施氮肥处理则由于施肥补充了氮素供应而表现出在土体中累积。

土壤硝态氮损失量有随灌水量增加而增加的趋势,施氮量为 375 kg hm^{-2} 的节水 25% 灌溉处理 0~200 cm 土体硝态氮损失量为 -34.87 kg hm^{-2} ,表明土体内硝态氮累积量增加 34.87 kg hm^{-2} ,而常规灌溉和节水 12.5% 处理损失量为 -6.56 kg hm^{-2} 和 -4.29 kg hm^{-2} ,硝态氮累积量的增加明显小于节水 25% 灌溉处理,很大数量硝态氮的淋溶至 0~200 cm 土层以下。

2.5 水氮配合对沙地玉米氮素吸收利用的影响

2007 年各处理总吸氮量平均变动在 111.14~226.29 kg hm^{-2} 之间(表 6),在 3 个灌溉水平下,随施氮量的增加,总吸氮量有增加的趋势。节水 25% 灌溉处理总吸氮量最高,为 184.74 kg hm^{-2} ,比节水 12.5% 灌溉处理和常规灌溉处理分别高 3.20% 和 13.69%。

表 6 2007 年不同水氮配合对沙地玉米氮素利用率的影响

Table 6 Effects of nitrogen fertilizer rates and irrigation rate on nitrogen using efficiency

处理 Treatment	总吸氮量 Total N absorption (kg hm^{-2})	氮收获指数 N harvest index (%)	氮肥农学利用率 Agronomic efficiency of N fertilizer(kg grain kg^{-1})	地上部植株氮肥 吸收利用率 PRE (%)	籽粒氮肥吸 收利用率 GRE (%)
W1N1	111.41	37.79	—	—	—
W1N2	141.21	42.65	28.53	19.87	12.08
W1N3	163.41	44.96	21.57	23.12	13.94
W1N4	193.82	41.82	16.06	27.47	12.99
W1N5	202.67	44.34	15.66	24.34	12.73
W2N1	114.14	39.12	—	—	—
W2N2	168.42	42.14	23.70	36.19	17.54
W2N3	226.29	44.91	17.97	49.85	25.32
W2N4	187.91	37.88	13.70	24.59	8.84
W2N5	199.83	43.04	10.56	22.85	11.03
W3N1	112.62	43.59	—	—	—
W3N2	151.43	41.07	19.48	25.87	8.73
W3N3	178.12	35.48	22.39	29.11	6.27
W3N4	169.13	39.16	13.96	18.83	5.71
W3N5	206.98	47.96	13.10	25.16	13.38

氮收获指数用来衡量在植株内氮素在籽粒中的分布,其值越高说明植株吸收的氮素在籽粒中的分布量也越高。氮收获指数平均变动在 35.48%~47.96% 之间,在 3 个灌溉处理中,施氮量低于 225 kg hm^{-2} 时,氮收获指数有随施氮量增加的趋势,但当施氮量高过 225 kg hm^{-2} 时,氮收获指数增加趋势不明显,甚至有降低趋势。氮收获指数不同施氮处理平均,常规灌溉、节水 10% 灌溉处理和节水 20% 灌溉处理分别为 43.44%、42.00% 和 40.87%,随灌溉量的减少,氮收获指数减少。

氮肥农学利用率是每单位氮肥作物产量的增值,不能反映作物吸收的氮有多少转化成了经济产量,主要

表现氮肥的增产效益。而地上部植株氮肥吸收利用率和籽粒氮肥利用率则是每单位氮肥植株和籽粒氮的积累量增值,反映了氮肥对植株地上部分氮积累量和籽粒氮积累量的贡献,其值的高低不仅与作物地上部分生物量、籽粒产量有关,还与植株吸氮能力及氮素在植株体内的分布有关。表6结果表明,氮肥农学利用率平均变动在 $10.56 \sim 28.53 \text{ kg kg}^{-1}$ 之间,并随施氮量的增加而降低。而地上部植株氮肥吸收利用率和籽粒氮肥利用率平均变动分别介于 $18.83\% \sim 49.85\%$ 和 $5.71\% \sim 25.32\%$ 之间,呈现出“低-高-低”抛物线型的变化趋势,当施氮量 225 kg hm^{-2} 时不仅作物的产量不再显著增加,作物对氮素的吸收量也基本达到饱和,导致了植株和籽粒对氮素吸收能力的下降。而不同施氮处理平均,常规灌溉处理氮肥农学利用效率 20.45 kg kg^{-1} ,比节水 12.5% 灌溉处理和节水 25% 灌溉处理高 20.90%,这是水肥的交互效应引起,灌溉量的增加使氮肥的肥效进一步提高。

3 讨论

作物对土壤氮素的吸收可以改变土壤剖面硝态氮的分布,限制土壤硝态氮向深层迁移,但是长期使用氮肥超过作物需要,会导致土壤中硝态氮的累积,而在灌溉农业地区,土壤中积累的硝态氮最终随灌溉水淋溶而不能保持在土壤中供下季作物吸收利用。而在水肥渗漏量较大的沙地农田生态系统,硝态氮随灌溉水向土壤深层淋溶的可能性更大。前人对农田硝态氮变化动态的研究结果不尽一致,Liu 等人^[19]研究表明,小麦生长期施氮 240 kg hm^{-2} ,表层土壤硝态氮显著向 $20 \sim 100 \text{ cm}$ 土层下移;也有研究认为,高施氮量促进作物氮素吸收,以致当施氮量超过作物最佳需氮量时,土壤硝态氮含量变化很小^[2]。本试验中,土壤硝态氮积累量和施氮量存在显著的线性相关关系,随施氮量的增加,土壤硝态氮积累量增加。施氮量增加使土壤硝态氮的积累量增加可能与施氮量的增加导致氮肥利用效率的降低有关,张翔等人^[20]对河南省中低产田区的研究表明每公顷施氮 214.0 kg 可显著提高冬小麦氮肥利用效率,当施氮量为 300 kg hm^{-2} 时,氮肥利用效率降低。本试验结果表明,施氮量从 150 kg hm^{-2} 增加至 375 kg hm^{-2} 时,氮肥农学利用效率降低 $32.30\% \sim 124.49\%$ 。施氮量增加而氮肥利用率降低,必然导致了氮素在土体内的累积,不能被作物吸收的冗余氮素容易通过灌溉和其它途径流失,表现为随施氮量的增加,氮的损失量显著增加^[15]。本试验条件下,施氮量从 150 kg hm^{-2} 增加至 375 kg hm^{-2} 时,氮的表观损失量增加 $41.7\% \sim 218.95\%$ 。氮的表观损失量与试验条件有很大的关系,石玉等人^[15]在产量水平为 $7909.80 \sim 8177.21 \text{ kg hm}^{-2}$ 高产麦田上研究结果表明,氮素表观损失量介于 $121 \sim 211 \text{ kg hm}^{-2}$ 之间;钟茜等人^[21]壤质潮土上设置最大施氮量为 375 kg hm^{-2} 的田间试验进行研究表明,夏玉米生育期氮素表观损失量介于 $9 \sim 239 \text{ kg hm}^{-2}$ 之间。本试验最大施氮量也为 375 kg hm^{-2} ,表观损失量却达 $77.35 \sim 260.96 \text{ kg hm}^{-2}$,明显是由于沙质土壤较强的渗漏特性和较低的营养吸附作用加速了土壤中氮素的损失。

在相同施氮量条件下,减少灌溉水量,可以减少氮素损失量,有利于维持土壤-作物体系的氮素平衡。从 $0 \sim 300 \text{ cm}$ 土壤剖面硝态氮含量和累积分布可以看出,灌溉对土壤累积硝态氮在土壤中的分布有很大影响,随灌溉水量的增加,土壤硝态氮在深层积累的数量越多,下层土壤硝态氮含量和积累量越高。在常规灌溉处理,硝态氮在 $200 \sim 300 \text{ cm}$ 土层积累量所占比例最高,占 $0 \sim 300 \text{ cm}$ 土层的 $27.56\% \sim 51.86\%$,尤其在施氮量最高的处理,硝态氮在 $200 \sim 300 \text{ cm}$ 土层积累量所占比例占到了 $0 \sim 300 \text{ cm}$ 土层的 51.86% 。随灌溉量的减少,硝态氮在深层的累积量逐渐减少,在浅层土壤的分布量有所增加,在节水 25% 的灌溉处理, $0 \sim 100 \text{ cm}$ 土层的硝态氮积累量介于 $26.88 \sim 63.30 \text{ kg hm}^{-2}$,明显高于节水 12.5% 灌溉处理和常规灌溉处理的相应施氮量处理,硝态氮积累量在该层次所占比例也基本最高,占 $0 \sim 300 \text{ cm}$ $32.94\% \sim 38.07\%$ 。可见,在沙地农田生态系统,适量减少灌溉水数量可有效控制土壤硝态氮向土壤深层的淋溶,减少地下水的污染威胁,并有效节约水资源。

施用氮肥显著促进作物植株对氮素的吸收^[11],本试验条件下,施氮量超过 225 kg hm^{-2} 时,地上部植株氮肥吸收利用率和籽粒氮肥吸收利用率开始有降低趋势。玉米产量对施氮量有明显反应,针对不同的区域环境,研究结果不尽相同。钟茜等人^[21]对冬小麦/夏玉米轮作体系的研究表明,夏玉米最高产量时的施氮量为 180 kg hm^{-2} ;Fang 等^[18]在华北地区的研究表明,施氮超过 200 kg hm^{-2} 时产量不在显著增加。本试验的沙质

土壤沙粒含量高肥力水平比较低,加之易漏水漏肥,肥料损耗较为严重,最佳施肥量为 225 kg hm^{-2} ,略高于其它研究区域。相应地,也应当看到,一味地强调过低的施肥量投入会导致土壤无法提供作物生长的正常氮素供应而不利于作物产量的稳定,因而,在沙地生态系统,有效的施肥方式的采用是比单纯施肥量的控制对作物产量的提高和土壤硝态氮淋溶的降低更有效的途径。

4 结论

合理水氮管理是保证沙地农田生态系统作物生产力和减少区域水资源污染的重要途径。过量的水氮投入使氮肥利用率降低,增加土壤硝态氮的淋溶损失。节水 12.5% 灌溉处理和节水 25% 灌溉处理 0 ~ 200 cm 土层土壤硝态氮含量比常规灌溉高 8.7% 和 33.3%,而与之相比表观损失量降低了 15.67% 和 2.2%。所以适量(节水 10% ~ 25%)减少水资源的投入可以在不减少作物产量的基础上减少土壤有机氮的淋溶损失。与高氮肥使用量($300 \sim 375 \text{ kg hm}^{-2}$)相比,氮肥适量(225 kg hm^{-2})施用可以在不降低玉米产量的基础上,提高氮肥利用效率(41.66% ~ 57.56%),减少农业成本($129.375 \sim 258.75 \text{ 元 hm}^{-2}$,按中国农资市场网公布 6 月份甘肃省尿素价格 1725 元 t^{-1} 计算),减少氮素表观损失量(24% ~ 61%)。因此,从环境效益和经济效益的双赢角度出发,在黑河中游边缘绿洲沙地农田,节水 10% ~ 25%,施氮量 225 kg hm^{-2} 是合理的水肥运筹技术。

为了最大限度的减少 NO_3^- -N 的淋失及其对环境的负面影响,制定适宜沙地农田生态系统水肥平衡和可持续发展,对沙地农田水肥精确管理和沙地作物对水肥吸收和利用规律的研究还需更进一步深入开展。

References:

- [1] Keeney D R. Sources of nitrate to groundwater. In: Follett R F. Nitrogen management and groundwater protection. Developments in agricultural and managed-forest ecology 21. New York: Elsevier. 1989, 23 - 34.
- [2] Ottman M J, Pope N V. Nitrogen fertilizer movement in the soils influenced by nitrogen rate and timing in irrigated wheat. Soil Science Society of America Journal, 2002, 64(5): 1883 - 1892.
- [3] Chaney K. Effect of nitrogen fertilizer rate on soil nitrate nitrogen content after harvesting winter wheat. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1990, 114(2): 171 - 176.
- [4] Alcoz M M, Hons F M, Haby V A. Nitrogen fertilization timing effect on wheat production, nitrogen uptake efficiency, and residual soil nitrogen. Agronomy Journal, 1993, 85(6): 1198 - 1203.
- [5] Ayoub MA, MacKenzie, Smith D L. Evaluation of N fertilizer rate and timing and wheat cultivars on soil residual nitrates. Journal of Agronomy and Crop Science, 1995, 175(2): 87 - 97.
- [6] Pilbeam C J, McNeill A M, Harris H C, Swift R S. Effect of fertilizer rate and form on the recovery of ^{15}N -labelled fertilizer applied to wheat in Syria. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1997, 128(4): 415 - 424.
- [7] Campbell C A, Zentner R P, Selles F, Akinremi O O. Nitrate leaching as influenced by fertilization in the brown soil zone. Canadian Journal of Soil Science, 1993, 73: 387 - 397.
- [8] Yang L L, Pei D, Hu S C, Zhang X Y, Mao R Z. Effects of treatments with water and fertilization on nitrate leaching loss in the piedmont of Taihang mountain. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(1): 1 - 7.
- [9] Li Y B, Zheng L M, Liao S H, Zhu H, Liu H J. Effects of different patterns of irrigation and N application on grain yield and utilization ratio of water and nutrient of winter wheat in Beijing suburb. Journal of Triticeae Crops, 2005, 25(2): 51 - 56.
- [10] Shen R K, Wang K, Zhang Y. Field Test and Study on Yield, Water Use and N Uptake Under Varied Irrigation and Fertilizer in Crops. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001, 17(5): 40 - 43.
- [11] Zhao J H, Yu Z W. Effects of nitrogen rate on nitrogen fertilizer use of winter wheat and content of soil nitrate-N under different fertility condition, Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(3): 815 - 822.
- [12] Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(11): 1361 - 1368.
- [13] Liu X J, Zhao Z J, Ju X T, Zhang F S. Effect of N application as basal fertilizer on grain yield of winter wheat, fertilizer N recovery and N balance. Acta Ecologica Sinica, 2002, 33(7): 1122 - 1128.
- [14] Liu L J, Sang D Z, Liu C L, Wang Z Q, Yang J C, Zhu Q S. Effects of Real-time and Site-specific Nitrogen Managements on Rice Yield and

Nitrogen Use Efficiency. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(12): 1456—1461.

- [15] Shi Y, Yu Z W. Effects of Nitrogen Fertilizer Rate and Ratio of Base and Topdressing on Yield of Wheat, Content of Soil Nitrate and Nitrogen Balance. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3661—3669.
- [16] Igbadun H E, Mahoo H F, Tarimo A K P R, Salim B A. Crop water productivity of an irrigated maize crop in Mkoji sub-catchment of the Great Ruaha river basin, Tanzania. *Agricultural Water Management*, 2006, 85(1): 141—150
- [17] Feng Z Z, Wang X K, Feng Z W, Liu H Y, Li Y L. Influence of autumn irrigation on soil N leaching loss of different farmlands in Hetao irrigation district, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 3661—3669.
- [18] 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 and Soil*, 2006, 284(04): 335—355.
- [19] Liu X J, Ju X T, Zhang F S, Pan J, Christie P. Nitrogen dynamics and budgets in a winter wheat-maize cropping system in the North China plain. *Field Crops Research*, 2003, 83(2): 111—124.
- [20] Zhang X, Zhu H X, Sun C H. Study on recommend system of N fertilizer application by N-(15) in winter wheat of Middle-lower Yield area. *Chinese Journal of Soil Science*, 1999, 30(6): 2027—2032.
- [21] Zhong X, Ju X T, Zhang F S. Analysis of environmental endurance of winter wheat / summer maize rotation system to nitrogen in North China Plain. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(3): 285—293.

参考文献:

- [8] 杨莉琳, 裴冬, 胡春胜, 张喜英, 毛任钊. 水肥配合对太行山山前平原高产土壤矿质氮分布及作物产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(1): 1~7.
- [9] 李永宾, 郑丽敏, 廖树华, 朱虹, 刘洪见. 北京郊区不同水氮管理模式对冬小麦产量及水分和养分利用效率的影响. *麦类作物学报*, 2005, 25(2): 51~56.
- [10] 沈荣开, 王康, 张瑜. 水肥耦合条件下作物产量、水分利用和根系吸氮的试验研究. *农业工程学报*, 2001, 17(5): 40~43.
- [11] 赵俊晔, 于振文. 不同土壤肥力条件下施氮量对小麦氮肥利用和土壤硝态氮含量的影响. *生态学报*, 2006, 26(3): 815~822.
- [12] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究. *中国农业科学*, 2002, 35(11): 1361~1368.
- [13] 刘学军, 赵紫娟, 巨晓棠, 张福锁. 基施氮肥对冬小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响. *生态学报*, 2002, 22(7): 1122~1128.
- [14] 刘立军, 桑大志, 刘翠莲, 王志琴, 杨建昌, 朱庆森. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响. *中国农业科学*, 2003, 36(12): 1456~1461.
- [15] 石玉, 于振文. 施氮量及底追比例对小麦产量、土壤硝态氮含量和氮平衡的影响. *生态学报*, 2006, 26(11): 3661~3669.
- [17] 冯兆忠, 王效科, 冯宗炜, 刘宏云, 李延林. 河套灌区秋浇对不同类型农田土壤氮素淋失的影响. *生态学报*, 2003, 23(10): 2027~2032.
- [20] 张翔, 朱洪勋, 孙春河. 应用 N-(15) 对中低产区冬小麦施氮推荐体系的研究. *土壤通报*, 1999, 30(6): 224~226.
- [21] 钟茜, 巨晓棠, 张福锁. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系对氮素环境承受力分析. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(3): 285~293.