植物营养与肥料学报 2010,16(6):1358-1365
Plant Nutrition and Fertilizer Science

施氮与灌水对夏玉米土壤硝态氮积累、氮素平衡及其利用率的影响

栗 丽[1], 洪坚平[1*], 王宏庭[2], 谢英荷[1], 张 璐[1], 邓树元[3], 单 杰[3], 李云刚[3]
(1 山西农业大学资源环境学院,山西太谷 030801;2 山西省农业科学院土壤肥料研究所,山西太原 030031;
3 襄汾县农业局,山西襄汾 041500)

摘要:通过田间裂区试验研究了不同施氮量(N 0、150、210 和 270 kg/hm^2)和灌水量(900、1200、和 1500 m^3/hm^2)对夏玉米土壤硝态氮分布累积、氮素平衡以及氮肥利用率的影响。结果表明,夏玉米收获期各处理土壤硝态氮在表层(0—20 cm)含量最高,在0—200 cm 剖面均呈现先减少后增加再减少的变化趋势;土壤剖面 NO_3^--N 累积量随施氮量的增加而增加,且施氮处理硝态氮积累量显著高于不施氮处理。作物吸氮量、氮素表观损失量均与施氮量和总氮输入量呈显著相关,氮素输入量每增加 1 kg,作物吸氮量仅增加 0.301 kg,而表观损失量增加 0.546 kg,是作物吸氮量的 1.8 倍左右。随施氮量的增加土壤剖面中 NO_3^--N 的损失量逐渐减少。夏玉米子粒吸氮量和收获指数随施氮量的增加有增加的趋势;氮肥回收效率和氮肥农学效率均以处理 $W_{1500}N_{150}$ 最高,分别为 46.15% 和 12.98 kg/kg;氮肥生理效率以处理 $W_{1200}N_{150}$ 最大,为 34.49 kg/kg。本试验条件下,以水氮处理 $W_{1500}N_{150}$ 的土壤硝态氮残留量、表观损失量较低,夏玉米氮肥回收效率和农学效率较高。

关键词:夏玉米;施氮量;灌水量;硝态氮积累;氮素平衡;氮素利用率
中图分类号:S513.06　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2010)06-1358-08

Effects of nitrogen application and irrigation on soil nitrate accumulation, nitrogen balance and use efficiency in summer maize

LI Li[1], HONG Jian-ping[1*], WANG Hong-ting[2], XIE Ying-he[1], ZHANG Lu[1], DENG Shu-yuan[3], SHAN Jie[3], LI Yun-gang[3]
(*1 College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China;*
2 Institute of Soil and Fertilizer, Shanxi Academy of Agricultural Science, Taiyuan 030031, China;
3 Xiangfen Agricultural Bureau, Xiangfen, Shanxi 041500, China)

Abstract: The field experiment was carried out to investigate the effects of different nitrogen and irrigation levels on soil nitrate accumulation, nitrogen balance and use efficiency in summer maize using the split-plot design. There were three irrigation levels, 900 (W_{900}), 1200 (W_{1200}), and 1500 m^3/ha (W_{1500}) in main plots and four nitrogen levels, 0 (N_0), 150 (N_{150}), 210 (N_{210}), and 270 kg/ha (N_{270}) in sub-plots. The results show that, the highest soil NO_3^--N content is observed at 0-20 cm soil layers at the harvest stage of summer maize. Soil NO_3^--N contents fluctuate with the increase of depth in 0-200 cm soil profiles. There is significant correlation between NO_3^--N accumulation amounts in the soil profile and the nitrogen application amounts, the NO_3^--N accumulations of the nitrogen treatments are significantly ($P<0.05$) higher than those of the non-nitrogen treatments. The crop nitrogen uptakes and nitrogen apparent losses are positively correlated with the nitrogen application rates. As the total nitrogen input increased by 1 kg, the crop nitrogen uptake and nitrogen apparent losses are increased by 0.301 and 0.546 kg, respectively. The nitrogen apparent losses in the soil profile are decreased with the increase of the nitro-

收稿日期:2010-01-12　　**接受日期**:2010-03-29
基金项目:华北西部补灌区小麦-玉米轮作一体化施肥关键技术研究与示范项目(2008BADA4B07-1);国家小麦现代产业技术体系建设专项经费资助。
作者简介:栗丽(1981—),女,山西长治人,博士研究生,主要从事土壤与植物营养研究。E-mail:lili_306@163.com
* 通讯作者 Tel:0354-6288399, E-mail:hjpsx@yahoo.com.cn

gen application. The nitrogen harvest index and grain N absorption of summer maize are increased with the increase of the nitrogen application. The highest nitrogen recovery efficiency and agronomic use efficiency are obtained in the treatment of $W_{1500}N_{150}$, about 46.15% and 12.98 kg/kg, respectively, and the highest physiological use efficiency is observed in the treatment of $W_{1200}N_{150}$, about 34.49 kg/kg. In our experiment, the optimal combination of nitrogen and irrigation is$W_{1500}N_{150}$ for the lower amount of soil NO_3^--N residual and nitrogen apparent losses, and the highest nitrogen recovery efficiency and agronomic use efficiency.

Key words: summer maize; nitrogen rate; irrigation rate; nitrate accumulation; nitrogen balance; nitrogen use efficiency

过量施用氮肥是造成地下水硝态氮污染的重要原因[1],尤其是过量施肥后的高强度降水或大量灌水,更容易引起土体中的硝态氮淋溶以及地下水污染。灌水与施氮是影响氮在土壤剖面积累和淋溶的关键因子[2-3]。灌水和施氮以及两者之间的相互作用不仅影响土壤中硝态氮的运移,还影响土壤中的氮素平衡和作物对氮肥的利用。研究表明,施氮量超过最佳施氮量会使收获后土壤硝态氮含量增加[4-5],但是受灌水量的影响,施氮量即使低于最佳施氮量时也会发生硝态氮的淋溶[6]。在干旱半干旱地区,关于灌水和施氮对作物生长和产量,以及对土体中硝态氮的迁移、积累和淋溶影响的研究较多[7-13],而对土壤硝态氮积累分布、土壤氮损失、作物氮吸收以及氮肥利用的综合研究较少。因此研究不同灌溉和施肥条件下土壤中硝态氮累积运移、氮素平衡和氮肥利用规律,不仅有助于了解氮素在土壤中的循环,而且对加强农田水氮管理,保护生态环境具有重要的意义。本试验通过田间试验,研究不同施氮量和灌水量对山西省晋南地区夏玉米土壤硝态氮分布累积、夏玉米生育期的氮素平衡以及氮肥利用率的影响,以期为该区农田氮肥运筹与灌溉制度优化,提高氮肥和灌水利用率提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验于2009年6～10月在山西省襄汾县(35°40′～36°03′ N, 111°06′～111°40′ E)农场进行。该区属暖温带大陆性气候,多年平均降水量为510 mm,年均蒸发量1732.2 mm,年均气温12.4℃,无霜期186.3 d。供试土壤为石灰性褐土,中壤,0—40 cm土层土壤理化性状见表1。

表1　试验地0—40 cm土层基础理化性状

Table 1　Basic physico-chemical propreties of the experiment soil (0-40 cm)

土层 Depth (cm)	pH	有机质 OM (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	碱解氮 Alk.-hydrol. N (mg/kg)	速效磷 Olsen-P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	容重 Bulk density (g/cm^3)	田间持水量 Field water capacity (%)
0—20	8.13	12.48	0.58	47.04	14.69	209.03	1.36	31.78
20—40	8.10	8.31	0.40	29.17	6.88	162.16	1.44	27.09

试验采用完全随机裂区设计,主区为灌溉量,设3个水平(m^3/hm^2),分别为900 (W_{900})、1200 (W_{1200})、1500 (W_{1500});副区为施氮量,设4个水平(N kg/hm^2),分别为不施氮肥(N_0)、150 (N_{150})、210 (N_{210})、270 (N_{270}),共12个处理。随机排列,重复3次。小区面积4 m×12 m,为消除小区间的水分和氮素移动,主区之间设2 m人行道,副区之间设1 m人行道。夏玉米生育期分别于拔节期和喇叭口期灌水2次(不包括生育期降水),灌水量用潜水泵抽水时间控制。夏玉米生育期降水量为195.8 mm(气象资料由襄汾县气象站提供)。

试验地前茬作物为冬小麦。2009年6月10日冬小麦收割后硬茬覆播夏玉米(*Zea mays* L.),品种为郑单958,播种方式为点播,播种密度为6×10^4株/hm^2。试验用氮肥为尿素(含氮46%),分别随灌水施入,施用量分别为拔节期40%和喇叭口期60%,不施磷肥和钾肥。播前0—20、20—40、40—60、60—80、80—100、100—120、120—140、140—160、160—180、180—200 cm土层土壤硝态氮平均含量分别为5.97、5.62、4.27、3.37、2.66、3.30、

3.39、2.27、1.48、0.84 mg/kg。

1.2 样品采集和测定

播前、收获后(2009年10月3日)分别在各小区内用土钻采集0—200 cm深度的土样,每小区3钻,每20 cm为一层,按取样层次等层混合。新鲜土样充分混匀后,称取10 g土壤,加入40 mL 1 mol/L的KCl浸提,振荡30 min,过滤后在-4℃冰箱中保存,用AA3(AutoAnalyzer 3)型流动分析仪(德国SEAL公司)测定土壤硝态氮和铵态氮含量,同时,另取土样用烘干法测定土壤含水量[14-16]。

土壤有机质用外加热法,土壤全氮用半微量凯氏法[17],速效磷用0.5 mol/L $NaHCO_3$浸提—钼蓝比色法[17],速效钾用NH_4OAc浸提—火焰光度法[17],土壤容重用环刀法,土壤pH用酸度计法测定[18]。

夏玉米收获期取样考种、测产;样品70℃烘干至恒重计算地上部干物重。样品粉碎过筛后,用H_2SO_4-H_2O_2消煮,凯氏法测定植株和子粒全氮[17]。

相关参数计算公式:

土壤硝态氮积累量(kg/hm^2)=土层厚度(cm)×土壤容重(g/cm^3)×土壤硝态氮含量(mg/kg)/10(0—20 cm土层容重按1.36 g/cm^{3}计算,20 cm以下土层按1.44 g/cm^{3}计算);

氮表观矿化量(kg/hm^2)=不施氮区地上部分吸氮量+收获后土壤残留矿质氮量-播前土壤起始矿质氮量。

根据氮素平衡模型计算氮的表观损失[22]:

氮的表观损失量(kg/hm^2)=氮输入量-氮输出量=(施氮量+播前土壤起始矿质氮量+氮表观矿化量)-(施氮区地上部分吸氮量+收获后土壤残留矿质氮量);

氮收获指数(NHI, %)=(子粒吸氮量/植株吸氮量)×100;

氮肥回收效率(NRE, %)=(施氮区地上部分吸氮量-不施氮区地上部分吸氮量)/施氮量×100;

氮肥农学效率(NAE, kg/kg)=(施氮区产量-不施氮区产量)/施氮量;

氮肥生理利用率(NPE, kg/kg)=(施氮区产量-不施氮区产量)/(施氮区地上部分吸氮量-不施氮区地上部分吸氮量)。

试验数据用SPSS 15.0和Excel 2003软件进行处理和统计分析,LSD法检验差异显著性。

2 结果与分析

2.1 施氮和灌水对土壤剖面硝态氮含量和积累量的影响

图1看出,夏玉米收获期各处理土壤硝态氮含量在表层(0—20 cm)最高,且随施氮量的增加而增加。3个灌水处理0—200 cm各施氮处理土壤硝态氮含量均随土层深度的增加呈现出先减后增再减的变化趋势;且各土层中均以不施氮处理硝态氮含量最低。处理W_{1200}和W_{1500},不同施氮处理土壤硝态氮含量的低谷和峰值分别出现在60—80和80—100 cm土层内;在灌水W_{900}处理下,各施氮处理土壤硝态氮含量低谷出现在40—60 cm土层,N_0和N_{150}处理在60—80 cm土层出现峰值,分别为2.94和3.56 mg/kg;N_{210}和N_{270}处理峰值出现在80—100 cm土层,分别为3.83和4.79 mg/kg。

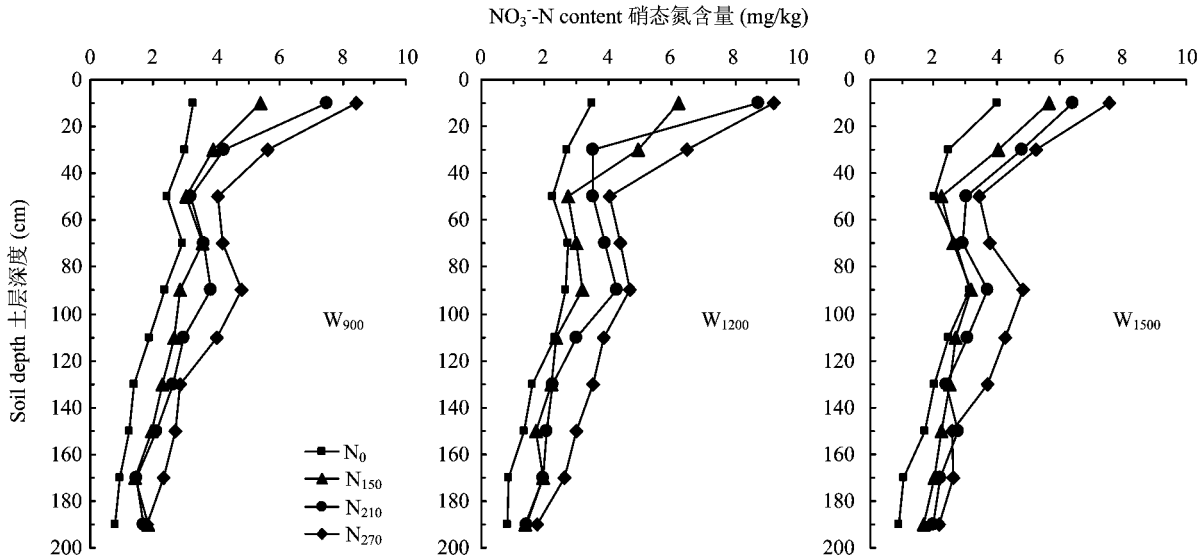

图1 不同灌溉量和施氮水平下土壤剖面NO_3^--N含量分布

Fig. 1 NO_3^--N contents in soil layers under different irrigation rates and nitrogen fertilizer application rates

同一灌水处理下,不施氮处理收获期 0—200 cm 土壤剖面硝态氮积累量最低,分别为 57.74、59.46 和 64.13 kg/hm^2。随施氮量的增加硝态氮积累量增加,各施氮处理间存在显著差异。施氮量为 N 270 kg/hm^2 时,土壤硝态氮积累量 W_{1200}处理最大,当灌水量增加至 1500 m^3/hm^2,硝态氮积累量反而减小,可能有部分硝态氮淋溶出 2 m 以下(图 2)。

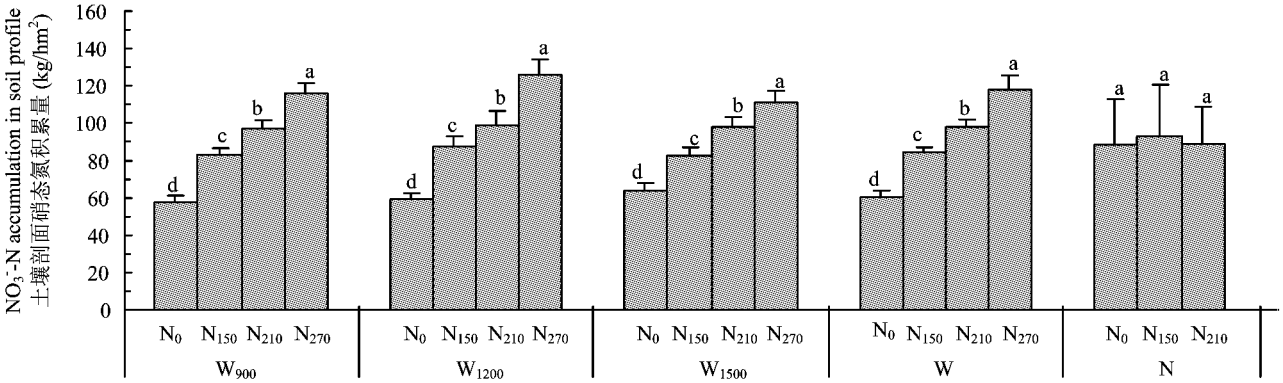

图 2　不同灌溉量和施氮水平下土壤剖面 NO_3^--N 积累量

Fig. 2　NO_3^--N accumulations in soil profile under different irrigation rates and nitrogen fertilizer application rates

[注(Note): 柱上不同小写字母表示同一灌水水平下施氮处理和处理平均值(施氮或灌水)差异显著($P<0.05$) Different letters above the bars of different groups means significant at $P<0.05$ between different N fertilizer rates in the same irrigation level and treatment means (irrigation or N rate).]

图 2 还看出,相同灌水水平下,不同施氮处理 0—200 cm 土壤剖面硝态氮积累量随施氮量的增加而增加,且各施氮处理之间差异显著。处理 N_{150}、N_{210}和 N_{270}的土壤剖面硝态氮平均积累量比处理 N_0 分别增加了 39.44%、62.01% 和 94.64%; 在相同施氮水平下,不同灌水处理的土壤剖面硝态氮积累量平均值差异不显著。

2.2　施氮和灌水对夏玉米土壤氮素平衡的影响

半干旱石灰性土壤中的无机氮主要以 NO_3^--N 形式存在,故氮平衡中土壤残留无机氮主要是以 NO_3^--N 含量为依据[23]。在氮平衡计算中,考虑到玉米根系有效利用土壤氮的范围,将土壤无机氮所在层次定为 0—200 cm 深度。

表 2 看出,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 N 214.98～232.89 kg/hm^2 之间。W_{900}、W_{1200}处理下,作物吸氮量随施氮量的增加而增加,且两者呈显著线性关系($R^2_{W900}=0.990$; $R^2_{W1200}=0.952$)。W_{1500}处理下,作物吸氮量以 N_{210}处理最大,当施氮量为 N 270 kg/hm^2 时,土壤氮表观损失量随灌水量的增加而增加。相关分析表明,氮素表观损失量随施氮量的增加而增加,且呈线性关系; 灌水处理 W_{900}、W_{1200}和 W_{1500}的 R^2 值分别为 0.917、0.996 和 0.973。

将作物吸氮量(y_1)、表观损失量(y_2)与总氮输入量(x)进行回归分析,得出作物吸氮量回归方程为:

$y_1=0.301x+100.6$ ($R^2=0.875^{**}$, n=12),即总氮输入量每增加 1 kg 作物吸氮量增加 0.301 kg。

表观损失量的回归方程为:

$y_2=0.546x-136.02$ ($R^2=0.873^{**}$, n=9),即总氮输入量每增加 1 kg 表观损失量增加 0.546 kg。说明总氮素输入量每增加 1 kg,氮素的表观损失量是作物吸氮量的 1.8 倍左右。

方差分析结果表明,同一灌水条件下,施氮处理的作物吸氮量显著高于不施氮处理的作物吸氮量,且各施氮处理间作物吸氮量差异不显著; 相同灌水条件下,施氮处理的土壤中残留矿质氮含量差异显著; 处理 W_{1200}、W_{1500}下,各施氮处理氮素表观损失量差异也达显著水平。

各灌水处理下,不施氮(N_0)处理土壤剖面中硝态氮的淋失量(初始土体硝态氮积累量和土体残留硝态氮)最大; 相同灌水处理下,随施氮量的增加土壤剖面中的硝态氮损失量逐渐减少,当施氮量大于 N150 kg/hm^2 时,土壤硝态氮损失量为负值,表现为硝态氮在土壤中积累,且积累量随施氮量增加而增加。相同施氮条件下,随灌水量的增加硝态氮损失量呈增加的趋势; 但 N_{210}处理下,处理 W_{1500}的硝态氮损失量明显小于处理 W_{900}和 W_{1200}的损失量。

2.3　施氮和灌水对夏玉米氮素吸收利用的影响

同一灌水处理下,施氮处理收获期夏玉米子粒吸氮量显著高于不施氮处理,且随施氮量的增加而增加; 但当施氮量超过 N 210 kg/hm^2 时,子粒吸氮量不再显著增加(表 3)。

表2 不同处理夏玉米0—200cm剖面土壤氮素平衡(kg/hm²)

Table 2 Soil N balance of summer maize under different treatments in 0–200 cm layers

处理 Treatment	氮输入 N input				氮输出 N output			剖面损失 Profile loss
	施氮量 N rates	起始 N_{min} Initial N_{min}	矿化氮 Net mineralization	总输入 Total input	作物携出 Crop uptake	N_{min}残留 Residual	表观损失 Apparent loss	
$W_{900}N_0$	0	84.39	130.59	214.98	157.24 b	57.74 d		26.65
$W_{900}N_{150}$	150	84.39	130.59	367.13	209.72 a	82.37 c	75.04 b	4.17
$W_{900}N_{210}$	210	84.39	130.59	424.98	220.81 a	94.08 b	110.09 a	–9.69
$W_{900}N_{270}$	270	84.39	130.59	484.98	247.73 a	116.0 a	121.15 a	–31.71
$W_{1200}N_0$	0	90.13	142.76	232.89	173.43 b	59.46 d		30.67
$W_{1200}N_{150}$	150	90.13	142.76	382.89	226.75 a	84.65 c	71.49 c	5.48
$W_{1200}N_{210}$	210	90.13	142.76	442.89	246.78 a	98.17 b	97.94 b	–8.04
$W_{1200}N_{270}$	270	90.13	142.76	502.89	248.18 a	124.06 a	130.65 a	–33.93
$W_{1500}N_0$	0	91.99	131.55	223.54	159.41 b	64.13 d		27.86
$W_{1500}N_{150}$	150	91.99	131.55	373.54	228.64 a	82.36 c	62.54 c	9.63
$W_{1500}N_{210}$	210	91.99	131.55	433.54	243.25 a	94.9 b	95.39 b	–2.91
$W_{1500}N_{270}$	270	91.99	131.55	493.54	222.65 a	114.79 a	156.1 a	–22.8

注(Note):数值后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$) Values followed by different letters are significant among different treatments at $P<0.05$.

表3 灌溉与施氮对夏玉米氮素利用率的影响

Table 3 Effects of irrigation and nitrogen supply levels on nitrogen use efficiencies of summer maize

灌水 Irrigation	施氮 N fertilizer	子粒吸氮量(kg/hm²) Grain N absorption	NHI (%)	NRE (%)	NAE (kg/kg)	NPE (kg/kg)
W_{900}	N_0	62.48 c	39.74 b			
	N_{150}	86.16 b	41.08 ab	34.99 a	11.40 a	32.59 ab
	N_{210}	109.66 a	49.66 a	30.27 a	10.93 a	36.11 a
	N_{270}	117.50 a	47.44 a	33.51 a	9.45 a	28.21 b
W_{1200}	N_0	76.09 c	43.87 b			
	N_{150}	104.43 b	46.06 ab	35.54 a	12.26 a	34.49 a
	N_{210}	127.67 a	48.27 ab	34.93 a	9.91 b	28.39 b
	N_{270}	124.00 a	49.96 a	27.68 a	8.17 c	29.50 b
W_{1500}	N_0	69.09 c	45.13 a			
	N_{150}	107.12 b	46.85 a	46.15 a	12.98 a	28.13 ab
	N_{210}	117.40 a	48.26 a	39.92 a	9.67 b	24.96 b
	N_{270}	104.72 b	47.03 a	23.42 b	7.43 c	31.72 a

注(Note):NHI—氮收获指数 Nitrogen harvest index; NRE—氮肥回收效率 Nitrogen recovery efficiency; NAE—氮肥农学效率 Nitrogen agronomic efficiency; NPE—氮肥生理效率 Nitrogen physiological efficiency. 同一列中同一灌水水平下不同施氮处理数值后的不同字母表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters in each column are significant among different treatments at 5% level between N rates in the same irrigation level.

表 3 看出,氮收获指数(氮素向子粒转移的效率,NHI)平均变动在 39.74%～49.96% 之间,以处理 $W_{1200}N_{270}$最高,不施氮处理最低; 同一灌水处理下,处理 N_0 和 N_{150},氮收获指数随灌水量的增加而增加。方差分析表明: 处理 W_{900}下,在 N_0 与 N_{210}、N_{270}处理间差异显著和 W_{1200}下,N_0 与 N_{270}处理 NHI 存在显著差异; 处理 W_{1500}下,各施氮处理无显著差异。

夏玉米氮肥回收效率(作物对土壤中氮肥的回收利用效果,NRE)均以处理 $W_{1500}N_{150}$最高。处理 N_{150}和 N_{210}下,NRE 均随灌水量的增加而增加,最大值分别为 46.15% 和 39.93%; 而 N_{270}处理则随灌水量的增加而减少,最小值为 23.42%。灌水处理 W_{1200}和 W_{1500}下,NRE 随施氮量的增加而减少; W_{900}、W_{1200}处理下,各施氮处理的 NRE 无显著差异; 而 W_{1500}处理下,N_{150}与 N_{270}处理 NRE 差异显著。

氮肥农学效率(氮肥的增产效益,NAE)以处理 $W_{1500}N_{150}$最高,为 12.98 kg/kg; 施氮量大于 150 kg/hm^2 时,NAE 随灌水量的增加而减小。N_{210}处理下,W_{900}比 W_{1200}、W_{1500}处理分别增加了 10.29% 和 13.03%; N_{270}处理下,W_{1500}比 W_{1200}、W_{900}处理分别减少了 21.38% 和 9.06%。在 W_{900}处理下,各施氮处理的 NAE 无显著差异; 而 W_{1200}和 W_{1500}处理下,各施氮处理的差异达显著水平。

各处理氮肥生理效率(因施氮增加的吸氮量转化为产量或干物质的效率,NPE)以 $W_{900}N_{210}$处理最高,处理 N_{150}下,NPE 在 W_{1200}处理达到最大,为 34.49 kg/kg。处理 N_{210}下,以 W_{900}最大,为 36.11 kg/kg; 处理 N_{270}下,以 W_{1500}最大,为 31.72 kg/kg。在 W_{900}和 W_{1500}处理下,N_{210}与 N_{270}处理和 W_{1200}处理下,N_{150}与 N_{270}处理 NPE 存在显著差异。

3　讨论

在北方农田,施入土壤的氮大部分经硝化作用被氧化成硝态氮,是作物吸收利用的主要形态[20-21],因此,施肥、灌水等措施对土壤硝态氮含量影响明显。土壤剖面硝态氮随着施氮量的增加而增加[22-23],也会随土壤供水量增加而淋溶。高亚军[24]等研究表明,施氮是造成土壤中硝态氮积累的主要原因,灌水量对积累量影响较小; 石维等[25]认为,施氮量对 0—100 cm 土体硝态氮积累有显著影响,硝态氮累积量随施氮量的增加而增加。本试验中,0—200 cm 土壤硝态氮积累量与施氮量呈显著线性关系,与灌水量无明显的相关性,表明相对于施氮量,灌水量对硝态氮累积量的影响较小,与以上研究结果一致。硝态氮能够溶解在水中,并且在土壤剖面中随水运移,因此,灌水量能够显著影响硝态氮的积累和迁移。在本研究中,尽管灌水对土壤剖面硝态氮积累量变化影响不大,但土壤剖面积累的硝态氮最终会不会淋溶损失仍主要取决于灌水量和降水量。

土壤硝态氮淋失主要受土壤剖面中可溶性氮的数量及分布的影响,而土壤剖面中可溶性氮数量和分布受施氮量及灌水量的影响[26-27]。本研究中,随施肥量的增加土壤剖面中硝态氮的损失量逐渐减少,表现为硝态氮在土壤剖面中积累。施氮处理下,土壤硝态氮损失量有随灌水量增加而增加的趋势。但在施氮处理 N_{210}下,W_{1500}处理 0—200 cm 土层硝态氮损失量明显小于 W_{900}和 W_{1200}处理,可能有部分硝态氮淋溶至 200 cm 土层以下。各灌溉处理下,不施氮处理土壤硝态氮损失量最大。这主要是因为不施氮处理的土壤氮素来源主要是土壤自身的矿化,而土壤矿化氮一部分被作物吸收利用,再加上淋溶损失,所以土体硝态氮损失量较大,而施氮处理土壤中由于施肥补充了氮素,损失量相对较少。

研究表明,当施氮量超出一定范围时,氮素表观损失急剧增加[28]。本试验中,氮素平衡计算结果表明,夏玉米生育期土壤氮素矿化量加上播前无机氮量,土壤自身供氮量介于 214.98～232.89 kg/hm^2 之间,远高于当季夏玉米的吸氮量,这可能是土壤剖面中硝态氮积累量、氮素表观损失量增加的主要原因。施用氮肥能促进植株对氮素的吸收[24]。本试验条件下,处理 W_{900}、W_{1200}下,吸氮量随施氮量的增加而增加,玉米吸氮量与施氮量之间呈显著线性关系,这与杨荣[29]等人的研究结果一致。处理 W_{1500}下,施氮量大于 N 150 kg/hm^2 时,作物吸氮量有降低趋势,可能是由于部分硝态氮淋溶出玉米根系吸收范围而无法被作物吸收,导致吸氮量降低。

同一灌水处理下,夏玉米施氮处理的子粒吸氮量显著高于不施氮处理,且随施氮量的增加而增加; 但当施氮量超过 N 210 kg/hm^2 时,子粒吸氮量不再显著增加。说明施氮能增加子粒的吸氮量,但子粒对氮素的吸收利用也有一定的范围。氮收获指数(NHI)主要受玉米生育后期干物质和氮素转移的影响[30]。本试验条件下,不施氮处理玉米的 NHI 最低,施氮能够提高玉米的 NHI,其中,以 $W_{1200}N_{270}$处理最大,为 49.96%,说明在该灌水和施氮处理下植株吸收的氮素更多地转移到子粒中。本研究中,夏

玉米氮肥回收效率(NRE)和氮肥农学效率(NAE)均以处理 $W_{1500}N_{150}$ 最高,分别为 46.15% 和 12.98 kg/kg;氮肥生理效率(NPE)以处理 $W_{1500}N_{150}$ 最大,为 34.49 kg/kg。氮素利用率不仅与氮肥品种有关,还受土壤条件、作物品种、气候特征等因素的影响,本试验结果只能说明夏玉米当季的氮肥利用特征,而不能代表夏玉米对氮肥利用的规律,其普遍规律有待于长期试验来验证。

4 结论

1)夏玉米收获期各处理土壤 NO_3^--N 在表层含量最高;在 0—200 cm 剖面均呈先减少后增加再减少的趋势;施氮量与土壤剖面 NO_3^--N 累积量呈显著线性关系,且施氮处理 NO_3^--N 积累量显著高于不施氮处理。

2)吸氮量、氮素表观损失量均随施氮量和总氮输入量的增加而增加,呈显著线性关系,且施氮量或氮素输入量每增加 1 kg,作物吸氮量仅增加 0.304 kg,而氮素的表观损失量增加 0.546 kg,是作物吸氮量的 1.8 倍左右。

3)能够提高夏玉米的子粒吸氮量和氮收获指数;氮肥回收效率和氮肥农学效率均以处理 $W_{1500}N_{150}$ 最高;氮肥生理效率以处理 $W_{1200}N_{150}$ 最大。

综上所述,在本试验条件下,水氮处理 $W_{1500}N_{150}$ 的土壤硝态氮残留量、表观损失量较低,夏玉米子粒氮肥回收效率和农学效率较高。为减少农田土壤中硝态氮残留及其对环境造成的负面影响,确定适宜的农田生态系统水肥配比,还需对农田水肥管理和作物水肥吸收利用规律进一步深入研究。

参 考 文 献:

[1] Keeney D R. Sources of nitrate to groundwater[A]. Follett R F. Nitrogen management and groundwater protection. Developments in agricultural and managed-forest ecology 21[C]. New York: Elsevier, 1989. 23-34.

[2] Diez J A, Caballero K, Koman K *et al*. Integrated fertilizer and irrigation management to reduce nitrate leaching in central Spain [J]. J. Environ. Qual., 2000, 29: 1539-1547.

[3] 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.
Chen X M, Wu H S, Sun J H. Time-spatial variability of ammonium and nitrate in farmland soil of Taihu Lake Region[J]. Environ. Sci., 2006, 27(6): 1217-1222.

[4] Ayoub M A, Mac Kenzie, Smith D L. Evaluation of N fertilizer rate and wheat cultivars on soil residual nitrates[J]. J. Agron. Crop Sci., 1995, 175(2): 87-97.

[5] Pilbean C J, Mc Neill 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[J]. J. Sci. Food Agric., 1997, 128(4): 415-424.

[6] Canpbell C A, Zentner R P, Selles F, Akinremi O O. Nitrate leaching as influenced by fertilization in the brown soil zone[J]. Can. J. Soil Sci., 1993, 73: 387-397.

[7] 邓兰生,张承林. 滴灌施氮肥对盆栽玉米生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(1): 81-85.
Deng L S, Zhang C L. Effect of drip nitrogen fertigation on growth of maize[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(1): 81-85.

[8] 陈小莉,李世清,王瑞军,等. 半干旱区施氮和灌溉条件下覆膜对春玉米产量和氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(4): 625-658.
Chen X L, Li S Q, Wang R J *et al*. Effect of film mulching on yield and nitrogen balance of spring maize under different nitrogen and irrigation treatments in semi-arid region[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2007, 13(4): 625-658.

[9] 王聪翔,孙文涛,孙占祥,等. 辽西半干旱区水肥耦合对春玉米产量的影响[J]. 灌溉排水学报,2008,27(2): 103-105.
Wang C X, Sun W T, Sun Z X *et al*. Coupling effect of water and fertilizer on spring corn yield in semi-arid areas of western Liaoning Province[J]. J. Irrig. Drain., 2008, 27(2): 103-105.

[10] 尹光华,陈温福,刘作新,等. 风沙半干旱区春玉米水肥耦合效应产量效应初报[J]. 玉米科学,2007,15(1): 103-106.
Yin G H, Chen W F, Liu Z X *et al*. Initial research on yield effect of nitrogen, phosphorus and water coupling on spring maize in semi-arid of blown Soil[J]. J. Maize Sci., 2007, 15(1): 103-106.

[11] 刘微,赵同科,王丽英. 不同水分、施氮量对土壤中硝态氮含量分布的影响[J]. 华北农学报,2006,21(3): 27-30.
Liu W, Zhao T K, Wang L Y. Effect of irrigation and nitrogen fertilizer on NO_3^--N content and distribution in soil[J]. Acta Agric. Bor.-Sin., 2006, 21(3): 27-30.

[12] 叶优良,李隆. 水氮量对小麦/玉米间作土壤硝态氮累积和水氮利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(1): 33-39.
Ye Y L, Li L. Effects of nitrogen fertilizer application and irrigation level on soil nitrate nitrogen accumulation and water and nitrogen use efficiency for wheat/maize intercropping[J]. Trans. CSAE, 009, 25(1): 33-39.

[13] 王晓英,贺明荣,刘永环,等. 水氮配合对冬小麦氮肥吸收及土壤硝态氮残留淋溶的影响[J]. 生态学报,2008,28(2): 685-693.
Wang X Y, He M R, Liu Y H *et al*. Interactive effects of irrigation and nitrogen fertilizer on nitrogen fertilizer recovery and nitrate-N movement across soil profile in a winter wheat field [J]. Acta Ecol. Sin., 2008, 28(2): 685-693.

[14] 叶优良,孙建好,李隆,等. 灌水对大麦/玉米带田土壤矿质氮影响的研究[J]. 水土保持学报,2003,17(3): 107-111.
Ye Y L, Sun J H, Li L *et al*. Effect of irrigation on mineral nitrogen concentration in soils of maize/barley intercropping[J]. J.

Soil Water Conserv., 2003, 17(3): 107-111.

[15] Li W X, Li L, Sun J H *et al*. Effects of intercropping and nitrogen application on nitrate present in the profile of an Orthic Anthrosol in Northwest China[J]. Agric., Ecosyst. Environ., 2005, 105(3): 483-491.

[16] 巨晓棠,刘学军,张福锁. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J]. 中国农业科学,2002,35(11): 1361-1368.
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[J]. Sci. Agric. Sin., 2002, 35(11): 1361-1368.

[17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社,2000.
Bao S D. Analyses for soil agricultural chemistry[M]. Bejing: China Agricultural Press, 2000.

[18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社,2000.
Lu R K. Analytical method for soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science Technology Press, 2000.

[19] 刘学军,赵紫娟,巨晓棠,等. 基施氮肥对冬小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响[J]. 生态学报,2002,22(7): 1122-1128.
Liu X J, Zhao Z J, Ju X T *et al*. Effect of N application as basal fertilizer on grain yield of winter wheat, fertilizer N recovery and N balance[J]. Acta Ecol. Sin., 2002, 22(7): 1122-1128.

[20] Harmsen K. Nitrogen fertilizer use in rained agriculture[J]. Fert. Res., 1984, 5: 371-382.

[21] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China contribution to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. Nutr. Cycl. Agroecosys., 2002, 63: 117-127.

[22] 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): 270-272.
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[J]. Acta Pedol. Sin., 2004, 41(2): 270-277.

[23] 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[J]. 生态学报,2006,26(3): 815-822.
Zhao J Y, Yu Z W. Effects of nitrogen rate on fertilizer use of winter wheat growth and content of soil nitrate-N under different fertility condition[J]. Acta Ecol. Sin., 2006, 26(3): 815-822.

[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.
Gao Y J, Li S X, Li S Q *et al*. Effect of fertilization and irrigation on residual nitrate N in soil[J]. J. Soil Water Conserv., 2005, 19(6): 61-64.

[25] 石维,同延安,赵营,等. 灌溉施肥对冬小麦土壤氮素盈亏的影响[J]. 麦类作物学报,2006,26(2): 93-97.
Shi W, Tong Y A, Zhao Y *et al*. Effect of N fertilizer and irrigation on apparent budget of soil N in winter wheat in Anthrosol[J]. J. Tritic. Crops, 2006, 26(2): 93-97.

[26] Andraski T W, Bandy L G, Brye K B. Crop management and corn nitrogen rate effects on nitrogen leaching[J]. J. Environ. Qual., 2000, 29: 1095-1103.

[27] Karlen D L, Kramer L A, Logsdon S D. Field-scale nitrogen balances associated with long-term continuous crop production[J]. Agron. J., 1998, 90: 644-650.

[28] 崔振岭,石立委,徐久飞,等. 氮肥施用对冬小麦产量、品质和氮素表观损失的影响研究[J]. 应用生态学报,2005,16(11): 2071-2075.
Cui Z L, Shi L W, Xu J F *et al*. Effects of N fertilization on winter wheat grain yield and its crude protein content and apparent N losses[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(11): 2071-2075.

[29] 杨荣,苏永中. 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[J]. 生态学报,2003,29(30): 1459-1469.
Yang R, Su Y Z. 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[J]. Acta Ecol. Sin., 2003, 29(30): 1459-1469.

[30] 刘建安,米国华,陈范骏. 玉米杂交种氮效率基因型差异[J]. 植物营养与肥料学报,2002,8(3): 276-287.
Liu J A, Mi G H, Chen F J *et al*. Genotype differences on nitrogen use efficiency among maize hybrids[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2002, 8(3): 276-287.