

不同施氮水平对冬小麦季化肥氮去向及土壤氮素平衡的影响

刘新宇^{1, 2}, 巨晓棠², 张丽娟^{1*}, 李鑫³, 袁丽金¹, 刘楠¹

(1 河北农业大学资源与环境科学学院, 河北保定 071000; 2 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094;

3 辉得昌远东有限公司, 北京 100098)

摘要: 采用田间微区¹⁵N示踪技术, 研究了冬小麦季化肥氮去向及土壤氮素平衡。结果表明, 在供试土壤肥力水平和生产条件下, N 150 kg/hm²的施肥量已达到较高产量, 再增加氮肥用量小麦产量不再增加。随着施肥量的增加, 地上部吸氮量有所增加, 氮肥的表观利用率和农学利用率持续下降, 而生理利用率则表现为低—高一低的变化趋势。在低施氮条件下, 小麦主要吸收土壤氮的比例高于化肥氮; 在高施氮条件下, 小麦吸收土壤氮的比例下降。冬小麦收获后, 仍有 26.7%~40.6%的氮肥残留在 0—100 cm 土层中, 17.4%~24.8%的氮肥损失。残留在土壤剖面中的氮肥主要分布在表土层。随着施氮量的增加, 土壤氮素总平衡由亏缺转为盈余; 土壤根区硝态氮也由播前消耗转为在播前的基础上累加, 两个小麦品种表现为相同的趋势。

关键词: 冬小麦; 氮去向; 氮素平衡; ¹⁵N

中图分类号: S145.7

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2010)02-0296-08

Effects of different N rates on fate of N fertilizer and balance of soil N of winter wheat

LIU Xin-yu^{1, 2}, JU Xiao-tang², ZHANG Li-juan^{1*}, LI Xin³, YUAN Li-jin¹, LIU Nan¹

(1 College of Resources and Environment Sciences, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China; 2 College of Resources and Environment Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 3 Wügang Far East Ltd, Beijing 100098, China)

Abstract: The fate of N fertilizer and balance of soil N under winter wheat farming were studied using filed ¹⁵N micro-plot. The results show that crop yield would not increase when the nitrogen application rate is above N 150 kg/ha. Apparent recovery efficiency and agronomic efficiency of nitrogen fertilizer are constantly decreased with increasing of rate of nitrogen fertilizer, while the trend of physiological efficiency is low-high-low. At lower N rate, more soil N is absorbed by winter wheat than that from fertilizer N, and the ratio of soil N absorption to fertilizer N absorption is decreased under high N application. After the harvest of winter wheat, 26.7% - 40.6% of fertilizer N is resided in 0-100 cm, and 17.4% - 24.8% of fertilizer N is lost. With increasing of nitrogen fertilizer application, the total balance of soil N is from deficiency to surplus, and NO₃⁻-N in the root zone soil is from consuming nitrogen to cumulating nitrogen before seeding. There is similar trend between two wheat varieties.

Key words: winter wheat; fate of N; balance of N; ¹⁵N

我国农田氮肥用量自 20 世纪 60 年代以来逐年增加, 到 2007 年高达 3500 万吨(N), 2005~2007 年我国农业氮肥用量年均增长 3.3%^[1]。氮肥施用量稳步增长, 但氮肥利用率却不断下降, 由此导致的氮

素污染环境和危害人类健康问题也日益严重^[2]。

研究氮肥施入土壤后的转化和去向, 是确定氮肥施用量和施用方法的理论依据。冬小麦-夏玉米轮作是华北平原主要的轮作方式, 高量施肥、氮肥利

收稿日期: 2009-03-16 接受日期: 2009-07-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(30571110 和 40571072); “十一五”国家科技支撑计划“粮食丰产科技工程项目(2006BAD02A08)”资助。

作者简介: 刘新宇(1984—), 女, 满族, 河北平泉人, 硕士研究生, 主要从事农田生态系统氮素行为及去向研究。

* 通讯作者 Tel: 0312-7528210; E-mail: lj-zh2001@163.com

用率低及损失率高是这一地区存在的普遍问题^[3]。调查表明,山东省惠民、泰安及兖州县和河南省的遂平、新乡县小麦季氮肥用量为 N 120~729 kg/hm²,平均为 N 325 kg/hm²^[4]。据 2008 年的调查,河北省辛集小麦季投入氮肥为 N 330 kg/hm²,夏玉米季为 N 300 kg/hm²,有些田块单季投入纯氮高达 N 500 kg/hm²以上,远远超过了作物的吸氮量。氮肥施入土壤后主要有三种去向:一是被作物吸收;二是以不同形态在土壤中残留;三是通过不同的机制和途径由土壤-作物体系损失。对北京地区的肥料氮去向问题的研究结果表明,当季冬小麦或夏玉米对化肥氮的吸收率约为 23.8%~44.5%,0—100 cm 土壤残留率为 20.9%~45.3%,损失率为 10.3%~55.2%^[5-6];高肥力土壤上,冬小麦对肥料氮的回收率是 23.2%~45.3%,0—100 cm 土壤残留率为 20.9%~45.3%,损失率为 9.4%~55.9%^[3]。在山东省惠民县的试验结果显示,在农户习惯施肥水平下(冬小麦季施氮量 N 375 kg/hm²),当季冬小麦化肥氮的利用率约为 26%,损失率为 29%~32%,0—100 cm 土壤残留量为 41%~45%^[7]。另有研究表明,氮肥的底追比例对其三条去向也有影响^[8]。近年来许多田间试验表明,施氮的增产效果低,当季施氮不增产或低施氮量即可达到最高产量^[9-12]。

农田生态系统中养分投入和支出之间的平衡对农业的可持续发展和环境保护十分重要;同时,农田的养分平衡也是影响土地和土壤质量的一项重要指标^[13-14]。自 20 世纪 80 年代以来,中国农田生态系统中氮素总体上处于盈余状态,而且呈现持续增长趋势^[15]。累积在土壤中的残留氮素绝大部分以硝态氮的形式存在^[16-18],这部分硝态氮在夏季持续降雨或大量灌溉条件下,容易向土壤深层移动逐渐淋出根区,造成土壤深层硝态氮累积量增加,并威胁到浅层地下水的安全^[19-21]。周顺利等^[22]研究表明,土壤氮损失是盈余氮素的一个主要去向,而硝态氮淋洗是冬小麦生育期间土壤氮素损失的一个重要的途径。减量施氮条件下 0—100 cm 土壤氮残留和表观损失数量均显著低于高施氮处理,作物氮利用率也显著提高^[9]。

以往这些研究都是单纯地考虑不同施氮水平对氮去向或土壤氮素平衡的影响,没有将两者联系起来综合考虑。为了系统综合评价华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系下冬小麦季不同施氮水平对氮去向及土壤氮素平衡的影响,在河北农业大学标本园布置了¹⁵N 微区试验,研究冬小麦季不同施肥水平对子

粒产量、氮肥利用率的影响,分析不同氮素投入下的基本去向,明晰土壤氮素总平衡及其与氮投入的数量关系,寻求冬小麦季最佳施肥量,以期氮肥科学施用,减少损失,提高氮肥利用率和降低过量施氮所带来的环境污染提供合理依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2005 年 10 月—2006 年 6 月在河北省保定市河北农业大学试验基地(北纬 38°8',东经 115°4')进行。属暖温带半湿润季风气候,年平均气温为 13.8℃,年无霜期约为 210 d,年平均降水量 575 mm,全年降水主要集中在夏季(6~8月),年际间变化大。地面平均海拔 18.5 m,地下水埋深 20~23 m。试验期间降水量 359.8 mm,少于过去 10 年平均降雨量(492.4 mm),属于干旱年份。

试验地土壤为山前平原冲积性潮褐土,0—100 cm 各土层土壤基础物理化学性质见表 1。

1.2 田间试验设计

冬小麦季试验采用复因素试验设计,共计 10 个处理,采取随机区组的排列,每个处理重复 3 次。主处理为 2 个小麦品种:科农 9204,氮高效小麦品种,其播种量为 196.5 kg/hm²(密度为 361.5 × 10⁴ 株/hm²);河农 822,河北当地主要栽培品种,播种量为 187.5 kg/hm²(由于两个品种的千粒重不同,科农 9204 为 41.33 g,河农 822 为 39.59 g,因此播种时采用相同粒数)。每个微区中种植 4 行小麦,行间距为 20 cm。副处理为氮肥用量,设置 5 个氮素水平: N 0、75、150、225、300 kg/hm²,分别用 N0、N75、N150、N225、N300 表示。微区用长 1 m,宽 1 m,高 0.4 m 的铁皮框制成。氮肥的 1/2 和磷肥(P₂O₅ 90 kg/hm²)与钾肥(K₂O 90 kg/hm²)作基肥,播前撒施后翻耕;1/2 的氮肥在返青和拔节之间施用,采取溶解后喷施再灌水的方式。氮肥采用¹⁵N 标记的尿素(46%),丰度为 4.25%,磷肥为过磷酸钙(12%),钾肥为硫酸钾(50%)。播种前在微区内取出 2 kg 左右的土,过 5 mm 筛,再与做基肥的¹⁵N 标记的尿素和磷、钾肥混合均匀,均匀撒施到微区,翻耕后播种。追肥时先将¹⁵N 标记的尿素溶解于水中,再用喷壶将溶液均匀喷洒到微区,最后浇上 60 mm 的水。

1.3 采样与测定

播种前和收获后均用土钻垂直取 0—100 cm(以 20 cm 为一层)深度的土样,播种前取的土样用于土壤基本物理化学性质的测定。收获后的土壤用于土

表1 田间试验土壤的理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the soil in the field experiment

土层深度 Soil layer (cm)	pH (H ₂ O:Water = 1:1)	有机质 OM (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N (mg/kg)	速效磷 Olsen-P (mg/kg)	速效钾 NH ₄ Ac-K (mg/kg)	容重 Bulk density (g/cm ³)	土壤粒径 (%) ¹⁾		
								砂粒 Sand	粉粒 Silt	粘粒 Clay
0—20	7.80	19.3	1.00	3.1	21.2	125.7	1.3	15.7	69.4	14.9
20—40	8.02	12.9	0.75	6.6	7.2	112.5	1.6	13.1	72.2	14.7
40—60	7.54	11.6	0.71	2.8	7.2	130.4	1.4	8.8	75.6	15.6
60—80	7.65	11.1	0.66	1.1	9.2	130.7	1.5	6.4	73.6	15.6
80—100	7.60	6.9	0.39	0.9	2.9	133.1	1.5	6.4	73.6	20.0

1) 美国制 USA system

壤全氮含量和¹⁵N丰度的测定。取样后,将取样孔用性质相同的土壤填充。

小麦分穗和秸秆两部分收获,在微区随机选取10株用于测定植株的含氮量和¹⁵N丰度,剩下的所有植株沿地面全部割下,风干。将小麦穗脱粒,分别称子粒和秸秆的风干重,之后65℃烘干,粉碎过0.15 mm筛,用于测定植株的含氮量和¹⁵N丰度。

1.4 测定方法及计算

土壤的基本理化性质采用常规方法进行分析测定^[23];土壤及植物样品的全氮含量用开氏法测定;将开氏法定氮后的蒸馏液酸化,浓缩至3mL,用Finnigan MAT-251同位素质谱仪(南京土壤研究所生产)测定样品的¹⁵N丰度。

氮肥表观利用率(% ,ARE) = (施氮区地上部的吸氮量 - 对照区地上部的吸氮量) / 施氮量 × 100

氮肥生理利用率(% ,PE) = (施氮区的产量 -

对照区的产量) / 吸氮量 × 100

氮肥农学利用率(% ,AE) = (施氮区的产量 - 对照区的产量) / 施氮量 × 100

试验数据采用Excel 2003和SAS8.1中的单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 施氮对作物产量和吸氮量及氮肥利用率的影响

不施氮处理的子粒产量显著低于其它施氮处理(表2),施用氮肥可以促进子粒产量的增加。随着施氮量的逐渐增加,子粒产量并不是逐渐升高,最高产量出现在施氮量为N 150 kg/hm²,说明在供试土壤的肥力水平和生产条件下,N 150 kg/hm²的施肥水平已经达到了较高产量,再增加氮肥施用量对作物产量提高无益。作物地上部分吸氮量有随施氮量

表2 微区作物产量、吸氮量、氮肥利用率的比较

Table 2 Crop yield, nitrogen uptake and the three efficiencies in micro-plot

小麦品种 Varieties	处理 Treatment	子粒产量 Grain yield (kg/hm ²)	吸氮量 N uptake (kg/hm ²)			氮肥 表观利用率 ARE	氮肥 生理利用率 PE	氮肥 农学利用率 AE
			子粒 Grain	秸秆 Straw	地上部 Shoot			
河农 822	N0	3769 b	76 b	16 d	92 c			
HN822	N75	5789 a	117 a	22 c	139 b	55.1 a	16.7 a	26.9 a
	N150	6233 a	127 a	27 bc	154 ab	34.2 ab	19.4 a	16.4 ab
	N225	6011 a	134 a	31 b	165 a	26.0 ab	16.5 a	10.0 b
	N300	5928 a	138 a	37 a	175 a	20.7 b	15.6 a	7.2 b
	科农 9204	N0	3739 b	86 b	19 c	105 c		
KN9204	N75	5971 a	118 a	25 bc	143 b	57.5 a	18.5 a	29.8 a
	N150	6692 a	136 a	32 abc	168 ab	41.0 ab	21.6 a	19.7 ab
	N225	6350 a	137 a	37 ab	175 a	27.8 b	19.0 a	11.6 b
	N300	6090 a	134 a	41 a	175 a	19.8 b	17.4 a	7.8 b

注 (Note): ARE—氮肥表观利用率 Apparent recovery efficiency; PE—氮肥生理利用率 Physiological efficiency; AE—氮肥农学利用率 Agronomic efficiency. 同列数据后不同小写字母表示达5%显著水平 Values followed by different lowercase in the same column mean significant difference at 5% level.

升高而增加的趋势,地上部吸氮量是地上各部分生物量与相应含氮量的乘积之和,这种增加并不是由于地上部生物量显著增加引起,而主要是地上部含氮量随施氮量增加显著升高引起的。子粒与秸秆吸氮量之比呈现出随施氮量升高而降低的趋势,说明高量施氮条件下,秸秆中残留的氮增多。两个小麦品种表现出相似的规律。

随着施氮量的增加,氮肥表观利用率(ARE)和农学利用率(AE)持续下降,而生理利用率(PE)却呈现出“低—高一低”抛物线型的趋势,在施氮量为 N 150 kg/hm² 时达到最高值(表 2)。说明在该施氮量时,作物能更有效地将吸收的氮转化成子粒产量。

2.2 作物吸收土壤氮和肥料氮的比例

作物吸收的氮主要来源于土壤氮和肥料氮。表 3 看出,小麦吸收的肥料氮的量随施氮量的升高而有所提高。N300 和 N225 处理之间没有显著差异,与其它两个处理之间有显著差异,两个小麦品种有

相同的趋势。说明在低施氮条件下,小麦主要吸收土壤氮,土壤氮在小麦生长期起主要的决定作用;在高施氮条件下,小麦吸收土壤氮的比例下降,吸收肥料氮的比例有所上升。

2.3 不同施氮量对作物吸收、土壤残留和损失的影响

冬小麦对化肥氮的吸收量随着施氮量的升高而显著提高(表 4)。当施氮量为 N 75、150、225 和 300 kg/hm² 时,河农 822 的氮肥利用率分别为 44.9%、48.4%、44.2% 和 37.7%; 科农 9204 当季氮肥利用率分别为 50.2%、51.5%、46.5% 和 37.2%。随施氮量增加,两品种氮吸收率均呈现先升高后降低的趋势。除 N300 处理外,其它处理氮肥利用率,科农 9204 均高于河农 822,但是品种间差异不显著。说明随着施氮量的逐渐增加,氮肥利用率并不是直线上升,当施氮量过高时,作物对氮肥的利用情况会减弱。

冬小麦收获后,化肥氮的土壤残留量是相当大的,且随着施氮量的增加残留量也显著增加。当施氮量分别为 N 150 和 300 kg/hm² 时,河农 822 的化肥氮残留率分别为 26.8% 和 39.1%,科农 9204 当季化肥氮残留率分别为 26.7% 和 40.6%。同时,随着施氮量的升高,化肥氮在当季的损失量显著增加。分析不同施氮水平下化肥氮三条基本去向的关系得出,随施氮量的增加,化肥氮被作物吸收量、土壤残留量、损失量(或进入环境的氮化物量)均增加。当施氮量低于 N 300 kg/hm² 时,肥料氮去向主要表现为作物吸收量 > 土壤残留量 > 氮肥损失量;而当施氮量达到 N 300 kg/hm² 时,氮肥的去向则呈现出土

表 3 作物吸收土壤氮和化肥氮的比例

Table 3 The ratio of N uptake from soil and fertilizer

处理 Treatment	河农 822 HN822		科农 9204 KN9204	
	吸氮量 N uptake (kg/hm ²)	% Ndff	吸氮量 N uptake (kg/hm ²)	% Ndff
N75	139 b	22.9 c	143 b	27.1 c
N150	154 ab	45.9 b	168 ab	45.6 b
N225	165 a	59.3 a	175 a	58.8 a
N300	175 a	61.2 a	175 a	62.0 a

注(Note): Ndff—来自于肥料的氮 Nitrogen derived from fertilizer 同列数据后不同小写字母表示达 5% 显著水平 Values followed by different lowercase in the same column mean significant difference at 5% level.

表 4 化肥氮在冬小麦季的去向

Table 4 The fate of nitrogen fertilizer in the winter wheat cropping season

品种 Varieties	处理 Treatment	作物吸收肥料氮 Fertilizer N uptake		肥料氮土壤 0—100 cm 残留 Soil residue		肥料氮总损失 Fertilizer N total loss	
		(N kg/hm ²)	(%)	(N g/hm ²)	(%)	(N kg/hm ²)	(%)
河农 822 HN822	N75	33.6 ± 4.67	44.9 b	26.0 ± 1.09	34.7 c	15.3 ± 4.72	20.4 c
	N150	72.6 ± 3.28	48.4 a	40.2 ± 1.41	26.8 c	37.2 ± 0.92	24.8 a
	N225	99.4 ± 7.31	44.2 c	82.2 ± 4.01	36.5 b	43.4 ± 7.31	19.3 a
	N300	113.2 ± 5.24	37.7 d	117.2 ± 11.40	39.1 a	69.6 ± 5.24	23.2 b
科农 9204 KN9204	N75	37.6 ± 3.92	50.2 b	24.3 ± 1.49	32.5 c	13.0 ± 2.17	17.4 c
	N150	76.6 ± 0.92	51.1 a	40.1 ± 8.31	26.7 c	33.3 ± 8.48	22.2 a
	N225	104.6 ± 4.33	46.5 c	78.1 ± 14.00	34.7 b	42.3 ± 13.71	18.8 a
	N300	111.7 ± 0.80	37.2 d	121.9 ± 16.11	40.6 a	66.4 ± 16.42	22.1 b

注(Note): 同列数据后不同小写字母表示 5% 显著水平 Values followed by different lowercase in the same column mean significant difference at 5% level.

壤残留量 > 作物吸收量 > 氮肥损失量。说明当施氮量过高时,易造成肥料氮在土壤中的大量残留。

2.4 土壤氮素平衡

2.4.1 冬小麦收获后土壤氮素平衡 一季作物后一定深度土体氮素平衡(盈亏)可根据下式计算^[24]:

土壤氮素平衡 = 肥料氮在 0—100 cm 土体残留 + 湿(或干湿)沉降带入氮 + 灌溉水带入氮 - 作物吸收土壤氮。

如果平衡是正值,则表示经过一季作物后,土壤根区氮素盈余,如果为负值,则表示亏缺。表 5 表明,随着施氮量的增加,土壤氮素平衡由亏缺转为盈余,土壤根区硝态氮也由播前消耗转为在播前的基础上累加,两个小麦品种表现为共同的趋势。在低施氮量时,氮高效小麦品种科农 9204 比常规品种对 0—100 cm 土层的硝态氮的消耗更多。

表 5 不同施氮水平下冬小麦收获后土壤氮素的总平衡 (N kg/hm²)

Table 5 Total balance of nitrogen in different fertilization rates after the harvest of winter wheat

品种 Varieties	处理 Treatment	氮吸收 N uptake			0—100 cm 残留氮 N residue	氮输入 ¹⁾ N input	氮平衡 N balance	0—100 cm 硝态氮 Nitrate-N		
		肥料 Ndff	土壤 Ndfs	总量 Total				播前 BS	收获后 AH	收获后~播前 AF-BS
河农 822 HN822	N0	0 e	110 a	110 c	0 cd	12.8	-97.2	70.2	18.4	-51.8
	N75	34 d	105 a	139 b	26 c	12.8	-66.2	70.2	9.8	-60.4
	N150	73 c	82 b	154 a	40 c	12.8	-29.2	70.2	20.6	-49.6
	N225	99 b	66 b	165 a	82 b	12.8	+28.8	70.2	58.7	-11.5
	N300	113 a	62 b	175 a	117 a	12.8	+67.8	70.2	101.6	+31.4
科农 9204 KN9204	N0	0 e	117 a	117 c	0 cd	12.8	-104.2	70.2	13.2	-57
	N75	38 d	105 a	143 b	24 c	12.8	-68.2	70.2	11.1	-59.1
	N150	77 c	91 b	168 a	40 c	12.8	-38.2	70.2	11.6	-58.6
	N225	105 b	70 b	175 a	78 b	12.8	+20.8	70.2	52.4	-17.8
	N300	112 a	63 c	175 a	122 a	12.8	+71.8	70.2	146.9	+76.7

注(Notes): 1) 氮输入包括湿沉降和灌溉水带入的氮 N input included the N of sedimentation and irrigation; Ndff—来自于肥料的氮 Nitrogen derived from fertilizer; Ndfs—来自于土壤的氮 Nitrogen derived from soil; BS—播前 Before sowing; AH—收获后 After harvest. 同列数据后不同小写字母表示 5% 显著水平 Values followed by different lowercase in the same column mean significant difference at 5% level.

2.4.2 施氮量与土壤氮素平衡关系 为了研究施氮量与土壤氮素平衡的数量关系,以施氮量为横坐标,以土壤氮素平衡为纵坐标作图并建立回归方程。从图 1 可以看出,施氮量与土壤氮素总平衡存在着很好的正相关关系,达到了极显著水平。在本试验

条件下,河农 822 当施氮量达到 N 184 kg/hm² 时,土壤氮素达到平衡;而科农 9204 当施氮量达到 N 190 kg/hm² 时,土壤氮素达到平衡。说明氮高效品种科农 9204 对土壤氮的利用能力强。

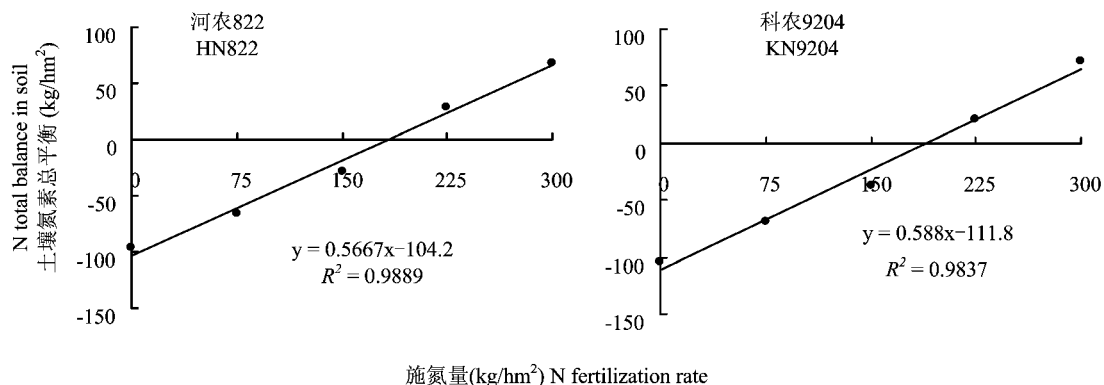


图 1 施氮量与土壤氮素总平衡的关系

Fig.1 The relation of N fertilization rates and N total balance in the soil

3 讨论

在本试验条件下,施用氮肥对冬小麦子粒产量有显著的增产作用,但当施氮量大于 $N 150 \text{ kg/hm}^2$ 时,增施的氮肥不再有增产作用,产量反而有所降低。据报道,北京郊区试验条件下的最佳施氮量是 $N 120 \text{ kg/hm}^2$ ^[6],山东惠民地区试验条件下的最佳施氮量是 $N 112 \text{ kg/hm}^2$ ^[25],其原因为土壤基础肥力状况不同。北京郊区试验地耕层碱解氮含量为 98.1 mg/kg ,山东惠民试验地 0—90 m 深度土壤剖面硝态氮的含量是 175.28 kg/hm^2 ,而本试验 0—100 m 土层土壤硝态氮含量为 43.02 kg/hm^2 。冬小麦对肥料氮的吸收量及在土壤中的残留量均随施氮量的增加而显著增加,但对肥料氮的吸收率却显著降低,与赵俊晔等^[26]的研究结果一致。在低施氮条件下,小麦主要吸收土壤氮,其在小麦生长期起主要的决定作用;在高施氮条件下,小麦吸收土壤氮的比例下降,吸收肥料氮的比例有所上升。钟茜等^[25]对华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系对氮素环境承受力分析的研究表明,氮肥利用率和农学利用率随施氮量的增加而降低,生理利用率表现出抛物线的趋势,本试验结果与其有相同的趋势。

巨晓棠等^[6]对北京郊区氮去向研究表明,氮肥利用率随施氮量的升高而降低,而损失率相应的增加。本试验条件下,随着施氮量的逐渐增加,氮肥利用率未直线上升;当施氮量过高时,作物氮肥利用率减弱。当施氮量低于 300 kg/hm^2 时,总体表现为作物吸收量 > 土壤残留量 > 氮肥损失量;而当施氮量达到 300 kg/hm^2 时,则呈现出土壤残留量 > 作物吸收量 > 氮肥损失量。这与北京郊区的结果有相似趋势,因为本试验地点与北京地区均属华北平原范围,土壤类型及气候环境条件有很大的相似性。党廷辉等^[27]研究表明,小麦积累的氮素中肥料氮的比例为 33%—40%。本试验中,小麦积累的肥料氮的比率是 37.2%—51.1%,显著高于以上结果。这与本试验土壤肥力较低有关。可见,高肥力土壤条件下,小麦吸收的土壤氮的比例高于低肥力土壤。

本试验条件下,施氮量是 $N 150 \text{ kg/hm}^2$ (优化水平)的处理,冬小麦对氮肥的吸收率为 48.4%—51.1%,0—100 cm 土壤残留率为 26.7%—26.8%,损失率为 22.2%—24.8%;而施氮量 $N 300 \text{ kg/hm}^2$ (常规水平)处理相应的数值分别为 37.2%—37.7%、39.1%—40.6% 和 22.1%—23.2%。优化处理的氮肥利用率显著高于常规水平,而常规水平的

残留率显著高于优化处理。在低施氮量时,残留氮以 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 形式存在很少;在高施氮条件下,以 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 形式存在的比例很高^[6];而硝态氮的淋溶损失是氮素的重要去向之一。Bergstrom 等^[28]研究表明,施氮量小于 100 kg/hm^2 时,硝态氮的淋溶量是缓和的, $100 \sim 200 \text{ kg/hm}^2$ 时,淋溶量随施氮量的增加而增加。周顺利等^[22, 29]研究也表明,氮肥施用量越高,土壤硝态氮含量越高,硝酸盐向深层淋洗也越严重。由此可见,常规水平条件残留较多的氮肥容易在集中降水或大量灌溉条件下随水淋洗进入土壤深层,对浅层地下水造成污染。

另外,许多对残留在土壤中氮肥去向的研究结果表明,残留在土壤中的氮肥对后季作物具有可利用性^[6, 30-32]。所以可以在后季种植中合理调控耕层水肥状况,适度减少氮肥施用,挖掘土壤累积氮素资源,以期发挥残留氮肥的后效^[33]。

郭天才等^[34]对高产麦田氮平衡研究表明,未被当季作物利用的氮主要以氮表观损失和残留无机氮形式损失,且随施氮水平的增加,氮表观损失量和土壤残留量均随之增加。巨晓棠等^[35]的研究结果表明,在不施氮或适量施氮条件下,土壤-作物系统中氮素的残留和表观损失均较低,当氮肥施用量超过作物的需要量时,氮素盈余急剧增加,盈余的氮素或以 N_{min} 形式残留于土壤剖面中,或损失于土壤-作物系统,从而导致相应的环境问题。本研究表明,施氮量与土壤氮素总平衡存在着很好的正相关关系。低施氮量时,土壤氮素总平衡表现为亏缺,小麦吸收了大量根层的土壤氮;而高施氮量时,土壤氮素总平衡盈余,易发生氮素的损失,与以上研究结果相符。而王西娜等^[36]对黄土高原旱地冬小麦-夏玉米轮作体系土壤氮平衡的研究结果表明,随氮肥用量增加表观损失量和损失率降低,这与本研究的结果不一致,这是因为王西娜的研究试验是以 0—200 cm 作为作物有效吸收层,而本试验是以 0—100 cm 深度作为研究对象。

综上所述,过量施肥是造成氮肥利用率低、损失率高和污染环境的主要原因,因此在农业生产实践中要注意合理施肥。

参考文献:

- [1] 张福锁,江荣风,陈清,等.我国肥料产业与科学施肥战略研究报告[M].北京:中国农业大学出版社,2008.
Zhang F S, Jiang R F, Chen Q *et al.* Research reports on fertilizer industry of China and strategies of fertilization[M]. Beijing: China A-

- gricultural University Press, 2008.
- [2] Tilman D, Fargione J, Wolff B. Forecasting agriculturally driven global environmental change[J]. *Science*, 2001, 292: 281-284.
- [3] 巨晓棠, 潘家荣, 刘学军, 等. 高肥力土壤冬小麦生长季肥料氮的去向研究 I. 冬小麦生长季肥料氮去向[J]. *核农学报*, 2002, 16(6): 397-402.
- Ju X T, Pan J R, Liu X J *et al.* The fate of nitrogen fertilizer in winter wheat growth season under high soil fertility condition [J]. *Acta Agric. Nucl. Sin.*, 2002, 16(6): 397-402.
- [4] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P *et al.* On-farm evaluation of an in-season nitrogen management strategy based on soil Nmin test [J]. *Field Crops Res.*, 2008, 105: 48-55.
- [5] 潘家荣. 冬小麦/夏玉米轮作体系中化肥氮的去向[D]. 北京: 北京农业大学博士学位论文, 2001.
- Pan J R. The fate of N fertilizer in winter wheat/summer maize rotation [D]. Beijing: PhD dissertation, China Agricultural University, 2001.
- [6] 巨晓棠, 潘家荣, 刘学军, 等. 北京郊区冬小麦/夏玉米轮作体系中氮肥去向研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(3): 264-270.
- Ju X T, Pan J R, Liu X J *et al.* Study on the fate of nitrogen fertilizer in winter wheat/summer maize rotation system in Beijing suburban [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2003, 9(3): 264-270.
- [7] 钟茜. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系对氮素环境承受能力的研究[D]. 北京: 中国农业大学硕士学位论文, 2004.
- Zhong Q. Studies of nitrogen environmental endurance of winter wheat/summer maize rotation system in North China Plain [D]. Beijing: MS thesis, China Agricultural University, 2004.
- [8] 石玉, 于振文, 李延奇, 等. 施氮量和底追比例对冬小麦产量及肥料氮去向的影响[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(1): 54-62.
- Shi Y, Yu Z W, Li Y Q *et al.* Effects of nitrogen fertilizer rate and ratio of base and topdressing on winter wheat yield and fate of fertilizer nitrogen [J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2007, 40(1): 54-62.
- [9] 刘学军, 巨晓棠, 张福锁. 减量施氮对冬小麦-夏玉米种植体系中氮利用与平衡的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 458-462.
- Liu X J, Ju X T, Zhang F S. Effect of reduced N application on N utilization and balance in winter wheat-summer maize cropping system [J]. *Chinese J. Appl. Ecol.*, 2004, 15(3): 458-462.
- [10] 李志勇, 王璞, 魏亚萍, 等. 不同施肥条件下夏玉米的干物质积累产量及氮肥利用率[J]. *华北农学报*, 2003, 18(4): 91-94.
- Li Z Y, Wang P, Wei Y P *et al.* Effects of different nitrogen fertilization managements on dry matter accumulation, yield and nitrogen use efficiency of summer maize [J]. *Acta Agric. Bor. - Sin.*, 2003, 18(4): 91-94.
- [11] 巨晓棠, 刘学军, 邹国元, 等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(12): 1492-1499.
- Ju X T, Liu X J, Zou G Y *et al.* Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system [J]. *Sci. Agric. Sin.*, 2002, 35(12): 1493-1499.
- [12] 武俊喜, 陈新平, 贾良良, 等. 冬小麦/夏玉米轮作中高肥力土壤的持续供氮能力[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(1): 1-5.
- Wu J X, Chen X P, Jia L L *et al.* Continuous nitrogen supplying capacity of the fertile soil in the winter wheat/summer maize rotation system [J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2004, 10(1): 1-5.
- [13] William F S, Syers J K, Lingard J. A conceptual model for conducting audits at national, regional, and global scales [J]. *Nutr. Cycl. Agro-Ecosys.*, 2002, 62(1): 61-72.
- [14] 王建国, 刘鸿翔, 王守宇, 等. 黑土农田养分平衡与养分消长规律 [J]. *土壤学报*, 2003, 40(2): 246-251.
- Wang J G, Liu H X, Wang S Y *et al.* Law of nutrient equilibrium, gain and loss in black soil farmland [J]. *Acta Pedol. Sin.*, 2003, 40(2): 246-251.
- [15] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China—Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies [J]. *Nutr. Cycl. Agro-Ecosys.*, 2002, 63: 117-127.
- [16] Ju X T, Liu X J, Zhang F S, Roelcke M. Nitrogen fertilization, soil nitrate accumulation, and policy recommendations in several agricultural regions of China [J]. *Amibio*, 2004, 33(5): 330-305.
- [17] 寇长林, 巨晓棠, 张福锁. 三种集约化种植体系氮素平衡及其对地下水硝酸盐含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(4): 660-667.
- Kou C L, Ju X T, Zhang F S. Nitrogen balance and its effects on nitrate-N concentration of ground water in three intensive cropping systems of North China [J]. *Chin. J Appl. Ecol.*, 2005, 16(4): 660-667.
- [18] 李世清, 李生秀. 半干旱地区农田生态系统中硝态氮的淋失 [J]. *应用生态学报*, 2000, 11(2): 240-242.
- Li S Q, Li S X. Leaching loss of nitrate from semiarid area agro ecosystem [J]. *Chinese J. Appl. Ecol.*, 2000, 11(2): 240-242.
- [19] Richter J, Roelcke M. The N-cycle as determined by intensive agriculture—examples from central Europe and China [J]. *Nutr. Cycl. Agro-Ecosys.*, 2000, 57: 33-46.
- [20] Zhang W L, Tian Z X, Li X Q. Nitrate pollution of groundwater in northern China [J]. *Agric. Ecosys. Environ.*, 1996, 59: 223-231.
- [21] 巨晓棠, 张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响 [J]. *生态环境*, 2003, 12(1): 24-28.
- Ju X T, Zhang F S. Nitrate accumulation and its implication to environment in north China [J]. *Ecol. Environ.*, 2003, 12(1): 24-28.
- [22] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏研究. I 冬小麦 [J]. *生态学报*, 2001, 21(11): 1782-1789.
- Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. Studies on the spatio-temporal variations of soil NO₃⁻-N and apparent budget of soil nitrogen. I. Winter wheat [J]. *Acta Ecol. Sin.*, 2001, 21(11): 1782-1789.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 14-114.
- Bao S D. *Agricultural chemistry analysis of soil* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000. 14-114.
- [24] Ju X T, Liu X J, Pan J R *et al.* Fate of ¹⁵N-labeled urea under a winter wheat-summer maize rotation on the north China plain [J]. *Pedosphere*, 2007, 17(1): 52-61.

- [25] 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[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 285-293.
Zhong Q, Ju X T, Zhang F S. Analysis of environmental endurance of winter wheat/summer maize rotation system to nitrogen in North China Plain[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(3): 285-293.
- [26] 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 nitrogen fertilizer use of winter wheat and content of soil nitrate-N under different fertility condition [J]. Acta Ecol. Sin., 2006, 26(3): 815-822.
- [27] 党廷辉,蔡贵信,郭胜利,等. 黄土旱塬黑垆土-冬小麦系统中尿素氮的去向及增产效果[J]. 土壤学报, 2002, 39(2): 199-205.
Dang T H, Cai G X, Guo S L *et al.* Fate of and crop response to nitrogen applied to winter wheat growing on heilu soil [J]. Acta Pedol. Sin. 2002, 39(2): 199-205.
- [28] Bergstrom L, Brink N L. Effects of differentiated application of fertilizer N leaching losses and distribution of inorganic N in soil [J]. Plant Soil, 1986, 93(3): 333-345.
- [29] 周顺利,张福锁,王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表现盈亏研究. II 夏玉米[J]. 生态学报, 2002, 22(1): 48-53.
Zhou S L, Zhang F S, Wang X R. Studies on the spatio-temporal variations of soil NO_3^- -N and apparent budget of soil nitrogen II. Summer maize [J]. Acta Ecol. Sin., 2002, 22(1): 48-53.
- [30] Macdonald A J, Poulton P R, Stockdale E A *et al.* The fate of residual ^{15}N -labelled fertilizer in arable soils: Its availability to subsequent crops and retention in soil[J]. Plant Soil, 2002, 246: 123-137.
- [31] 张丽娟,巨晓棠,张福锁,等. 土壤剖面不同层次标记硝态氮的运移及其后效[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1964-1972.
Zhang L J, Ju X T, Zhang F S *et al.* Movement and residual effect of labeled nitrate-N in different soil layers[J]. Sci. Agric. Sin. 2007, 40(9): 1964-1972.
- [32] Zhang L J, Ju X T, Gao Q *et al.* Recovery of ^{15}N -labeled nitrate injected into deep subsoil by maize in a Calcaric Cambisol in North China Plain[J]. Com. Soil Sci. Plant Anal., 2007, 38(1): 1563-1577.
- [33] 袁丽金,巨晓棠,张丽娟,等. 磷对小麦利用土壤剖面深层累积硝态氮的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(5): 1665-1671.
Yuan L J, Ju X T, Zhang L J *et al.* Effects of phosphorus fertilizer on the utilization ratio of nitrate accumulated in deep soil profile by wheat [J]. Sci. Agric. Sin., 2009, 42(5): 1665-1671.
- [34] 郭天才,宋晓,冯伟,等. 高产麦田氮素利用、氮平衡及适宜施氮量[J]. 作物学报, 2008, 34(5): 886-892.
Guo T C, Song X, Feng W *et al.* Utilization and balance of nitrogen and proper application amount of nitrogen fertilizer in winter wheat in high-yielding regions[J]. Acta Agron. Sin., 2008, 34(5): 886-892.
- [35] 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[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.
- [36] 王西娜,王朝辉,李生秀. 黄土高原旱地冬小麦/夏玉米轮作体系土壤的氮素平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 759-764.
Wang X N, Wang Z H, Li S X. Soil nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system on dryland of Loess Plateau [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2006, 12(6): 759-764.