

华北潮土长期试验中的作物产量、氮肥利用率及其环境效应*

蔡祖聪 钦绳武

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要 在河南封丘潮土上进行了小麦、玉米轮作的长期肥料试验, 对该长期试验的作物产量、氮利用率及其环境效应进行了分析。结果表明, 在施氮量为 $150 \text{ kg hm}^{-2} \text{季}^{-1}$ 的情况下, 化肥 N、P、K 配合施用 (NPK), 小麦和玉米产量最高, 且年际之间变化小, 14 a 平均产量分别为 $5\,261 \text{ kg hm}^{-2}$ 和 $7\,633 \text{ kg hm}^{-2}$ 。在等 N、P、K 的情况下, 1/2 氮用有机肥 (1/2OM), 作物产量略低于 NPK; 全部氮用有机肥 (OM), 平均产量分别降低 22% 和 16%, 产量年际变化大, 但表现出随时间而提高的趋势。小麦和玉米氮肥平均利用率 NPK 分别为 60% 和 61%、1/2OM 为 51% 和 56%, OM 为 33.6% 和 42.5%。上述处理的表层土壤 (0~20 cm) 全氮含量均显著增加, 增加幅度依次递增; 作物吸收和表层土壤残留氮合计占氮肥施用量的 69%、75% 和 69%, 均未发现 NO_3^- 盐向土壤剖面深层的移动, N_2O 的排放系数 $< 0.24\%$ 。不施 P 肥的处理 (NK), 作物产量极低, 氮肥利用率几乎为零, 且有大量的 NO_3^- 向剖面深层迁移, 在 0~100 cm 范围内, NO_3^- 含量随着深度的增加而提高, 但 N_2O 排放系数小于上述 3 处理。由此可以得出, 在该土壤上采用小麦、玉米轮作, 年氮施用量 300 kg hm^{-2} , 如果配合 P、K 肥, 可以持续保持较高的产量, 且不造成 NO_3^- 盐淋移和大量 N_2O 排放。

关键词 长期试验; 小麦; 玉米; 氮利用率; 环境影响

中图分类号 S147.2

文献标识码 A

施用氮肥是提高作物产量的重要手段, 1996 年以来全球氮肥用量超过 8 000 万 t, 我国氮肥施用量 1995 年以来变化在 2 200~2 500 万 t 之间^[1]。施用氮肥在提高作物产量的同时, 也对环境保护造成了极大的威胁, 已经引起了人们的高度重视^[1], 2003 年的 Nature 杂志甚至发表了题为“施肥到死亡 (Fertilized to death)”的警告性文章^[2]。国际肥料联合会 (IFA) 和联合国粮农组织 (FAO) 的报告指出, 到 2015 年, 谷类作物生产中的氮素消耗将会提高 15%^[3]。这样必然对区域和全球环境保护带来更大的压力。保证作物产量和减少氮肥施用对环境不利影响必须提高氮肥利用率, 避免过量施用氮肥。N、P、K 的平衡施用、水肥耦合、适时适量施用、深施、配合使用硝化和脲酶抑制剂等都是提高氮肥利用率的重要手段^[4,5]。大量的试验结果已经表明, 一般而言, 氮肥利用率随着氮肥施用量的增加而下降, 进入环境的氮则随着氮肥施用量的增加而增加。合理施肥的原则是将氮肥的施用量控制在既获得最大经济效益,

又环境影响小的范围内。确定氮肥合理施用量可以采用不同的方法^[5]。长期肥料试验为评估肥料利用率、施肥对土壤肥力和环境质量的影响提供了重要的研究平台。本文总结了河南封丘潮土上进行的长期肥料试验的作物产量、氮肥利用率和环境效应, 期望其结果有助于正确认识氮肥对保持作物高产的重要性 and 客观评价合理施肥对环境的影响。

1 材料与方法

该长期肥料试验设置于华北平原的封丘农业生态试验站内。供试土壤为轻壤质黄潮土 (两合土)。试验包括不施肥对照 (CK)、NPK、NP、NK、PK、化肥氮和有机肥氮各 1/2 (1/2OM) 和全部有机肥 N (OM), 共 7 个处理, 4 次重复。无论施用有机肥或无机肥, 各处理的施用量相等。小麦和玉米每季施氮肥 (以 N 计) 和钾肥 (以 K_2O 计) 各为 150 kg hm^{-2} , 小麦磷肥施用量 (以 P_2O_5 计) 为 75 kg hm^{-2} , 玉米为 60 kg

* 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2005CB121101) 资助

作者简介: 蔡祖聪, 男, 研究员。主要从事土壤碳、氮循环与全球变化研究

(1) <http://faostat.fao.org>

收稿日期: 2005-08-24; 收到修改稿日期: 2005-11-17

hm^{-2} 。试验开始于 1989 年小麦播种时,一年二季,冬小麦和夏玉米轮作。田间管理与当地大田相同。灌溉视每年降水情况而定,一般小麦灌溉 2~3 次,玉米灌溉 1~2 次。每次灌溉量为 900~1 200 $\text{m}^3 \text{hm}^{-2}$ 。收获时,齐地面地上部分全部移出试验区。至 2003 年玉米收获时,共 14 季小麦和 14 季玉米。每季作物收获后,测定作物产量,分析籽粒和秸秆 N、P、K 含量。玉米收获后,采集 0~20 cm 土壤,分析土壤有机质、全 N。2004 年玉米收获后,采 0~100 cm 的土壤剖面样,每 20 cm 为一层,用 KCl 提取后测定各层次 NO_3^- 和 NH_4^+ 含量。有关该长期肥料试验的肥料和田间管理已作过详细介绍,参见文献[6]。

2 结果

2.1 作物产量

该长期肥料试验各处理的小麦和玉米产量均具有显著差异($p < 0.05$,图 1)。14 a 小麦平均产量以 NPK 为最高(5 261 kg hm^{-2}),其次为处理 1/2OM(5 160 kg hm^{-2}),处理 NP 的平均产量与处理 1/2OM 无显著差异,为 5 137 kg hm^{-2} 。这 3 个处理的小麦产量年际变化小(14 a 平均产量的变异系数为 11.0%~14.7%),未表现出显著的增加或降低的趋势。最低产量均出现在 1993 年,NPK、1/2OM 和 NP 处理分别为 4 481 kg hm^{-2} 、4 047 kg hm^{-2} 和 4 524 kg hm^{-2} ;NPK 和 NP 处理的最高产量出现在 1999 年,分别为 6 337 kg hm^{-2} 和 6 269 kg hm^{-2} ,1/2OM 的最高产量出现在 2001 年,为 6 521 kg hm^{-2} 。NP 的小麦产量在 2000 年以后连续低于 NPK,且差异不断扩大,2003 年的产量仅为 NPK 的 83%。全有机肥处理(OM)的小麦 14 a 平均产量显著低于上述 3 个处理,为 4 013 kg hm^{-2} ,而且表现出随着长期试验的时间延长而增加的趋势,年平均产量与试验时间(年)的相关系数 $r = 0.6435$, $p < 0.05$ 。通过小麦产量与气象因素的相关分析发现,OM 的小麦产量与 5 月平均温度具有显著的相关性($p < 0.05$)。由于供试土壤为严重缺磷土壤,处理 NK 的小麦产量很低,且与不施肥对照(CK)无显著差异,14 a 平均产量分别为 660 kg hm^{-2} 和 628 kg hm^{-2} ;处理 PK 的产量显著高于 NK 和不施肥的对照(CK),14 a 平均产量为 1 252 kg hm^{-2} 。试验 14 a 以来,处理 PK、NK 和 CK 的小麦产量均无增加或降低的趋势。

2000 年夏季洪水,玉米绝收,因此在试验期内只获得 13 季玉米产量。该季玉米绝收后,所有已经

长成的地上部分全部回田,2001 年各处理玉米产量均显著提高,NPK 处理达到了 12 204 kg hm^{-2} ,NP 处理为 12 162 kg hm^{-2} ,1/2OM 为 11 558 kg hm^{-2} 。13 季玉米平均产量在处理间的变化趋势与小麦完全相同(图 1)。虽然处理 NPK 的平均产量最高,达到 7 808 kg hm^{-2} ,且与处理 NP(7 633 kg hm^{-2})和 1/2OM(7 685 kg hm^{-2})的平均产量达到了显著差异($p < 0.05$),但这 3 个处理玉米产量的绝对差异小于 2.2%,且年际变化均较小(年平均产量的变异系数为 21.8%~23.5%),与供试时间(年)无显著的线性关系。与小麦产量相似,NP 处理的玉米产量 2002 年和 2003 年显著低于 NPK 处理,且差异有扩大趋势,分别为 NPK 玉米产量的 95%和 86%。全有机肥处理(OM)的玉米 13 a 平均产量(6 401 kg hm^{-2})显著低于上述 3 个处理,年际变化大(年平均产量的变异系数为 32.4%),且具有随时间延长而增加的趋势,与供试时间的线性相关系数 $r = 0.6683$, $p < 0.05$ 。不施 N 肥时(处理 PK),玉米产量仅为处理 NPK 的 20%,13 季平均为 1 583 kg hm^{-2} ,但该处理的玉米产量也有随供试时间而增加的趋势,与供试时间的线性相关系数 $r = 0.6095$, $p < 0.05$ 。与小麦产量相似,处理 NK 的 13 季平均产量与不施肥对照无显著差异,分别为 980 kg hm^{-2} 和 869 kg hm^{-2} ,显著低于处理 PK 的玉米产量。

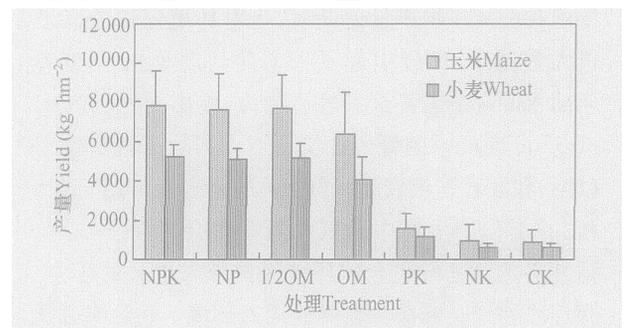


图 1 河南封丘潮土各处理小麦(14 季)和玉米(13 季)平均产量。线段为年平均产量的标准差

Fig. 1 Averaged yields of winter wheat (over 14 years) and maize (over 13 years) in the long-term experiment carried out in fluvial aquic soil in North China. Bars refer to the standard deviation of annual averaged yield

2.2 作物 N 利用率

从表 1 可以看出,在施用等氮量的情况下,小麦和玉米籽粒中氮含量仍有显著差异。秸秆中氮含量处理之间也有相同的趋势(数据未给出)。NK 处理的小麦和玉米籽粒中氮含量最高,其次为不施肥对照(CK)。施用 1/2 有机肥(1/2OM)或全有机肥(OM)的

小麦和玉米籽粒氮含量显著低于化肥(NPK)的处理。

根据小麦、玉米籽粒和秸秆产量及其它们中的N含量,计算每年作物地上部分吸收的N量。以不施用N肥的处理PK为对照,计算作物地上部分的N肥作物利用率。对于小麦,NPK的N利用率变化于50%~74%之间,NP的N利用率变化于43%~71%之间,1/2OM的N利用率变化于39%~74%之间,OM的N利用率变化于11%~62%之间。处理NPK、1/2OM和OM的N肥利用率有随着时间而升高的趋势(图2a),与供试时间(以年计)的线性相关

系数依次增加,分别为 $r = 0.5367$ ($p < 0.05$), 0.6221 ($p < 0.05$) 和 0.6921 ($p < 0.01$)。处理NK的N利用率仅为-6%~6%之间,14季小麦的平均利用率仅为0.1%(表1),且随着供试时间的延长而显著下降($r = -0.5863$, $p < 0.01$)。虽然NPK的产量最高,但由于处理NP籽粒和秸秆中N含量均显著高于NPK的处理,所以,处理NP的14季小麦平均N利用率略高于NPK。处理1/2OM的籽粒和秸秆N含量均显著低于处理NPK,所以,14季平均N利用率明显低于处理NPK。

表1 河南封丘潮土长期肥料试验14季小麦和13季玉米籽粒N含量,作物N吸收总量,平均N利用率,土壤(0~20cm)残留量和回收率

Table 1 N contents in grains of winter wheat (over 14 years) and maize (over 13 years), total N uptake, N use efficiency, N residual in surface soil (0~20 cm), and N recovery in the long-term experiment carried out in fluvial aquic soil in North China

处理 Treatment	籽粒N含量		N吸收量		土壤残留N量 N residual in soil (kg hm ⁻²)	N利用率		回收率 Recovery (%)
	N content in grain (g kg ⁻¹)		Amount of N (kg hm ⁻²)			N use efficiency (%)		
	小麦 Wheat	玉米 Maize	小麦 Wheat	玉米 Maize	小麦	玉米		
NPK	20.4d	12.1c	1561a	1634a	589c	59.8a	60.5a	68.9
NP	21.1c	12.4c	1566a	1662a	415d	60.0a	61.8a	65.5
1/2OM	18.2e	11.5d	1380b	1535b	1132b	51.2b	55.7a	75.2
OM	17.1f	10.6e	1011c	1258c	1529a	33.6c	42.5b	69.2
PK	16.9f	9.9f	305d	365e	220e			
NK	29.2a	16.7a	308d	541d	69f	0.1d	8.4c	0.7
CK	24.4b	13.3b	228e	319e	-35f			

注:同一列中不同的字母表示差异达到显著水平($p < 0.05$) Note: the different letters following the digits in the same column mean significant difference ($p < 0.05$)

对于玉米,N利用率的总体趋势与小麦N利用率相似。2000年玉米绝收后秸秆全部还田对后续小麦的生长产生一定的影响,N利用率有所提高(图2a),但是极大地影响了2001年玉米的生长,这一年的玉米产量明显高于其他年份,而且以当季N肥施用量计算,处理NPK和NP的N当季利用率超过了100%,处理1/2OM的N利用率达到了99%(图2b)。

如果同时包括2000年N利用率为0%的结果,处理NPK和NP的14季玉米的平均N利用率仍与小麦N利用率相接近,处理1/2OM、OM和NK的N利用率高于小麦(表1)。如果删除2000年和2001年的特殊情况,仅处理OM的N利用率随着时间显著增加,相关系数 $r = 0.6449$, $p < 0.05$ 。处理NK的N利用率也有下降的趋势,但相关性未达显著水平($p = 0.076$)。

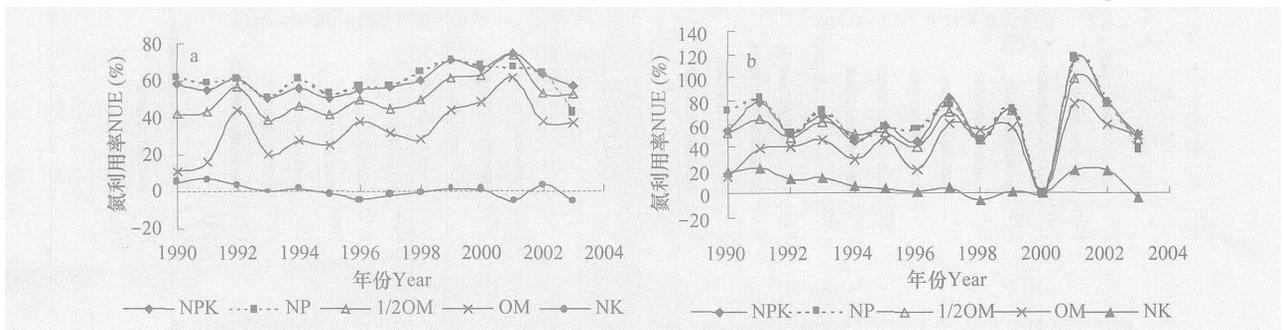


图2 河南封丘潮土长期肥料试验小麦(a)和玉米(b)氮肥利用率变化

Fig. 2 N use efficiencies (NUE) of winter wheat (a) and maize (b)

2.3 土壤 N 残留量和总回收率

与长期试验开始前比较,2003 年玉米收获后,除 CK 外,其他各处理表层土壤(0~20 cm)全 N 含量均有所增加。根据玉米收获后实际测定的土壤容重,计算出 14 a 年后表层土壤全 N 的变化,并看作是土壤残留 N 量(表 1)。土壤残留的 N 量以处理 OM 最大,达到 $1\ 529\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$,1/2OM 次之,为 $1\ 132\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 。应该特别注意的是处理 PK,14 a 中未施用任何 N 肥,作物地上部分吸收了 $670\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$,而土壤表层 N 量不仅没有下降,反而增加 $220\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$,与收获的作物地上部分吸收的氮合计增加了 $890\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 。

我们将地上部分收获物吸收的 N 和土壤残留减去处理 PK 后作为回收的氮量,回收氮占施氮量的百分数作为氮回收率。处理 NPK、NP、1/2OM 和

OM 的氮回收率达到 66%~75%,其中以处理 1/2OM 为最高,其次为 OM。处理 NK 的氮回收量仅与处理 PK 相当,为 $917\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$,回收率仅为 0.7%(表 1)。

2.4 无机 N 在土壤剖面中的分布

2004 年玉米收获后,对 0~100 cm 剖面中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量进行了测定。各处理土壤中无机 N 以 NO_3^- -N 为主, NH_4^+ -N 含量均小于 $1\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ (图 3)。在表层土壤(0~20 cm)中,处理 OM 的 NO_3^- -N 含量最高,但也仅为 $10.4\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ 。除处理 NK 外,其它各处理未发现 NO_3^- -N 向土壤剖面深度迁移的现象,20 cm 以下土层 NO_3^- -N 含量均小于 $4.5\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ 。但是处理 NK 的 NO_3^- -N 含量随着剖面深度的增加而增加,在 80~100 cm 层次, NO_3^- -N 含量达到 $22.8\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ (图 3b)。

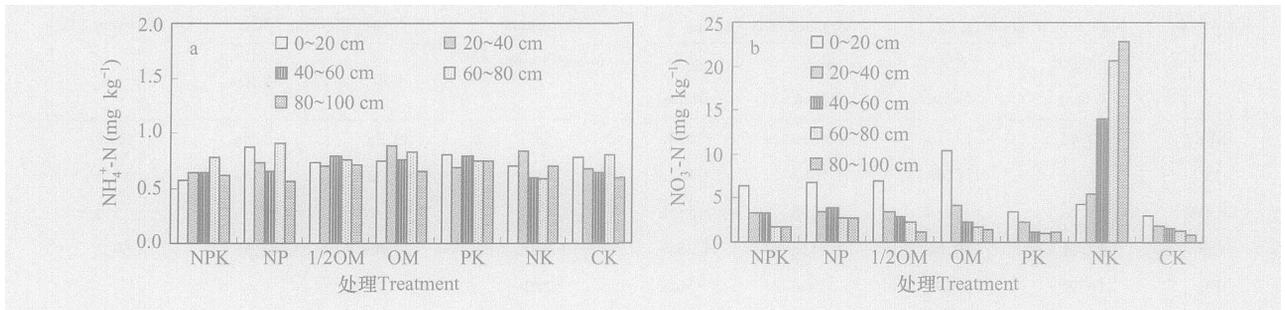


图 3 2004 年玉米收获后土壤剖面中 NH_4^+ -N(a) 和 NO_3^- -N(b) 含量分布

Fig. 3 Distribution of NH_4^+ -N (a) and NO_3^- -N (b) contents in the soil profile after maize was harvested in 2004

3 讨论

从河南封丘潮土的长期肥料试验小麦和玉米产量可以看出,在 N、P、K 配合施用的条件下,施用量为每季 $150\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 时,小麦产量可稳定在 $4\ 481\sim 6\ 337\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 之间,14 a 平均产量达到 $5\ 261\ \text{kg}$

hm^{-2} ;玉米产量稳定在 $5\ 569\sim 12\ 204\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$,14 a 平均产量达到 $7\ 808\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$,而且均未表现出下降的趋势。虽然这一产量与小麦和玉米最高产量比较仍有一定的距离,但高于河南全省同期小麦和玉米产量(图 4),平均分别高出 27% 和 70%。因此,改造低产田,并保持这样的 N、P、K 肥施用量,在河南省仍具有较大的增产潜力。

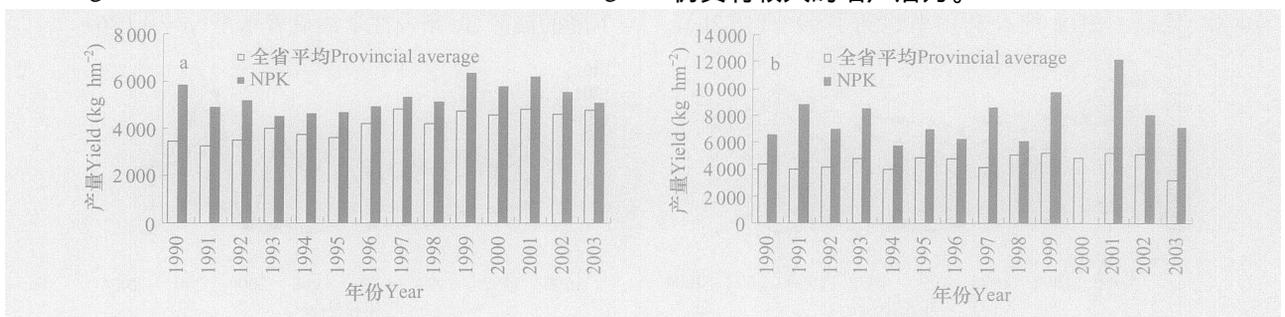


图 4 河南封丘长期肥料试验 NPK 处理小麦(a)和玉米(b)产量与同期河南全省平均产量^[7]的比较

Fig. 4 Comparison between yields of winter wheat (a) and maize (b) in Treatment NPK of the experiment and the provincial averages of Henan^[7]

对于供试土壤,在等 N、P、K 施用量的条件下,1/2N 素来之于有机肥的处理(1/2OM),虽然土壤全氮的积累量大于 NPK 的处理(表 1),但在小麦和玉米产量及其稳定性方面并未表现出优势,处理 1/2OM 的 14 a 平均产量甚至略低于处理 NPK 的产量(图 1)。施用纯有机肥的处理(OM),小麦和玉米产量始终低于处理 NPK。然而 OM 处理的小麦和玉米产量都表现出随着时间而增加的趋势,这可能与该处理土壤有机质含量大幅度提高有关。因此,从长远看,纯有机肥处理的小麦和玉米产量有可能达到或超过纯化肥处理,这还需要长期试验的继续来证明。不施用 K 肥的处理(NP),虽然在相当长时间内小麦和玉米产量都与处理 NPK 相当,但小麦产量自 2000 年,玉米产量自 2002 年开始已稳定低于处理 NPK,而且产量下降的幅度有增大的趋势。由此可见,即使在这样钾丰富的土壤中,适量施用 K 肥对于维持土壤生产力也是不可缺少的。

我国的 N 肥利用率低于世界发达国家。根据朱兆良^[5]的统计,我国稻麦的 N 肥利用率平均仅为 30%~41%,高产地区甚至低于此值。在本试验中,氮肥施用量为每季 150 kg hm⁻²,全年施用量为 300 kg hm⁻²,处理 NPK 的小麦和玉米 N 利用率始终保持在 50%和 45%以上,14 a 平均达到了 60%,高于 1/2OM 处理和 OM 处理,后者则有较多的 N 残留在土壤中。NK 处理的 N 利用率几乎为零,这虽然是供试土壤严重缺磷导致的结果,但也说明相对于其他营养元素,当 N 的供应过量时,N 肥的利用率将大幅度下降。由此可以看出,如果控制 N 肥用量在每季 150 kg hm⁻²,且 N、P、K 配比合适,即使不采取特殊的措施,华北平原的 N 肥利用率也可以达到发达国家 N 肥利用率的水平。

值得注意的是 PK 处理,没有施用任何氮肥,作物产量仍然显著高于 CK 和 NK 处理,作物吸收和土壤残留的 N 总量达到 890 kg hm⁻²,平均每年进入的 N 量达到 63 kg hm⁻²。供试地区采用地下水灌溉,1994 年和 1999 年测定的灌溉水全 N 含量小于 1 mg L⁻¹,即使全年以 5 次灌溉,每次灌溉水 1 200 m³ hm⁻²计,灌溉带入的 N 量也不足 10 kg hm⁻²。在小麦和玉米轮作条件下,可能发生自生固氮或联合固氮,但其量估计很少^[4],其他的活性氮应该来之于大气沉降。由此 PK 处理氮回收量估算供试地区大气干湿沉降 N 超过 50 kg hm⁻²。这可能是 PK 处理能够长期维持相当的小麦和玉米产量,并使土壤全 N 含量有所增加的原因所在。

如果把未被作物吸收和残留于土壤中的氮量看作是已经损失的氮,那么 NPK、1/2OM 和 OM 的氮肥总损失率为 31%~25%,这与李贵宝和张水旺^[8]用¹⁵N 标记法在河南潮土测定的氮损失率接近。由于供试土壤呈碱性,氮损失可能主要以氨挥发为主。根据李贵桐等^[9]用微气象学方法测定的华北平原冬小麦和夏玉米氨挥发占施氮量的 9.9%~37.0%,Zhang 等^[10]在同一区域用¹⁵N 标记方法计算冬小麦夏玉米的氨挥发损失占施氮量的 33%。大气中 NH₃ 浓度主要受当地氨挥发影响^[11]。从 PK 处理接受了大量的大气沉降的氮这一事实可以看出,氨挥发损失的氮可能有相当一部分回到了农田。硝化和反硝化损失是肥料氮损失的另一条重要途径。在该地区这一过程对环境产生的可能影响是硝化过程生成的 NO₃⁻ 向地下水的淋溶和硝化反硝化生成的 N₂O 向大气的排放。从图 3 可以看出,全年施 N 量为 300 kg hm⁻²,除 N、P 比例严重失调(NK 处理),作物不能正常生长的情况外,各处理并没有发生 NO₃⁻ 盐向下迁移的现象。由此也可以得出,在这样的施 N 量下,只有相对于其它营养元素,N 的供应过量时,才出现 NO₃⁻ 盐的向下迁移。至于 N₂O 的排放,2002 年 5 月至 2003 年 6 月对该长期试验各处理的 N₂O 排放进行了测定^[12],结果表明 N₂O 年排放量以 OM 处理为最高,但也仅为 858 g hm⁻²;PK 处理最小,为 138 g hm⁻²。以 PK 处理为基准,排放系数最高的 OM 处理仅为 0.24%。根据 Xing^[13]估算,计算我国旱地农田的 N₂O 排放系数平均为 0.57%。可见这一 N₂O 排放系数远低于全国旱地的 N₂O 排放系数,更低于 1997 IPCC 国家温室气体排放清单编制指南^[14]的 N₂O 排放系数缺损值(1.25%),甚至低于间歇灌溉的稻田 N₂O 排放系数(0.37%)^[15]。

综上所述,在我国华北平原潮土上,进行冬小麦和夏玉米轮作,施氮量为每季 150 kg hm⁻²,配施 P、K 肥,不但可以保持作物合理的产量,氮肥利用率达到 60%上下,而且连续 14 a 试验未发现 NO₃⁻ 向土壤耕层以下迁移,N₂O 排放系数远低于世界农田平均水平,对环境的影响很小。在等 N、P、K 量下,1/2 以有机肥施用,可以基本保持与化肥相同的产量,且土壤全 N 含量大幅度提高。但如果全部施以有机肥,虽然土壤全 N 增加幅度进一步增大,但产量显著下降,且年际间变化增大。因此,为保证粮食安全,以有机肥取代全部化肥是不可取的。

参考文献

- [1] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, *et al.* Nitrogen cycles: Past, present, and future. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2): 153 ~ 226
- [2] Anonym. Fertilized to death. *Nature*, 2003, 425: 894 ~ 895
- [3] IFA/FAO. Global Estimates of Gaseous Emissions of NH₃, NO and N₂O from Agricultural Land. Rome: FAO, 2001
- [4] 朱兆良,文启孝主编. 中国土壤氮素. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992. Zhu Z L, Wen Q X. eds. Nitrogen in Soil of China (In Chinese). Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992
- [5] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策. *土壤与环境*, 2000, 9: 1 ~ 6. Zhu Z L. Loss of fertilizer N from plant-soil systems and strategies and techniques for its reduction (In Chinese). *Soil and Environmental Science*, 2000, 9: 1 ~ 6
- [6] 钦绳武,顾益初,朱兆良. 潮土肥力演变与施肥作用的长期定位试验初报. *土壤学报*, 1998, 35(3): 367 ~ 375. Qin S W, Gu Y C, Zhu Z L. A preliminary report on long-term stationary experiment on fertility evolution of Fluvo-Aquic soil and the effect of fertilization (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(3): 367 ~ 375
- [7] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴. 北京: 农业出版社, 1991 ~ 2004. Office for Agricultural Yearbook of China. Agricultural Yearbook of China (In Chinese). Beijing: Agricultural Press, 1991 ~ 2004
- [8] 李贵宝,张水旺. 应用¹⁵N示踪技术研究河南主要土类冬小麦对氮素的利用. *核农学报*, 1997, 11: 243 ~ 246. Li G B, Zhang S W. Studies on the utilization of nitrogen by winter wheat in major soils of Henan Province (In Chinese). *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 1997, 11: 243 ~ 246
- [9] 李贵桐,李保国,陈德立. 大面积冬小麦夏玉米农田土壤的氮挥发. *华北农学报*, 2002, 17: 76 ~ 81. Li G T, Li B G, Chen D L. Ammonia volatilization from large field planted with winter wheat and summer maize (In Chinese). *Acta Agriculturae Boreali Sinica*, 2002, 17: 76 ~ 81
- [10] Zhang S L, Cai G X, Wang X Z, *et al.* Losses of urea-nitrogen applied to maize grown on a calcareous fluvo aquic soil in North China. *Pedosphere*, 1992, 2: 171 ~ 178
- [11] Sakurai T, Fujita S-I, Hayami H, *et al.* A study of atmospheric ammonia by means of modeling analysis in the Kanto region of Japan. *Atmospheric Environment*, 2005, 39: 203 ~ 210
- [12] Meng L, Ding W X, Cai Z C. Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N₂O emissions, soil quality and crop production in a sandy loam soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37: 2 037 ~ 2 045
- [13] Xing G X. N₂O emission from cropland in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 52: 249 ~ 254
- [14] IPCC (International Panel on Climate Change). Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997
- [15] Akiyama H, Yagi K, Yan X Y. Direct N₂O emissions from rice paddy fields: Summary of available data. *Global Biogeochem. Cycl.*, 2005, 19 (1): art. no. CB1005

CROP YIELD, N USE EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL IMPACT OF A LONG TERM FERTILIZATION EXPERIMENT IN FLUVOR AQUIC SOIL IN NORTH CHINA

Cai Zucong Qin Shenwu

(State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract Crop yield, N use efficiency, and environmental impact of a 14-year fertilization experiment with winter wheat and summer maize, carried out in fluvor aquatic soil in North China, were analyzed. The results show that Treatment NPK (150 kg hm⁻² chemical N fertilizer per crop plus a set rate of P and K fertilizer) has always been the highest in yield of either winter wheat or maize with the smallest annual variation. The average yield of winter wheat (over 14 years) and maize (over 13 years) was 5 261 kg hm⁻² and 7 633 kg hm⁻², respectively. Treatment 1/2OM (i. e. half of N from chemical fertilizer and the other half from organic manure) was slightly lower than Treatment NPK in average yield of the crops, but in Treatment OM (only organic manure applied at the same rates of N, P, K as those in Treatment NPK), the yields of winter wheat and maize on average were 22 % and 16 % lower than those in Treatment NPK, respectively, and varied significantly from year to year. The treatment showed a rising trend with the time in yield ($p < 0.05$). The averaged N use efficiency was 60 % for winter wheat and 61 % for maize in Treatment NPK, 51 % and 56 % in Treatment 1/2OM, and 34 % and 43 % in Treatment OM, respectively. Total N in the surface soil (0 ~ 20 cm) was increasing in all the above treatments, which were in the order of OM > 1/2OM > NPK. The amount of N recovered by the plants plus N residue in surface soil (0 ~ 20 cm) accounted for 69 %, 75 % and 69 %, respectively in NPK, 1/2OM, and OM. There was no evidence of downwards movement of NO₃⁻ to subsoil and the N₂O emission factors were less than 0.24 % in all the three treatments. In contrast, NO₃⁻ content increased with the depth of soil profile to 100 cm in Treatment NK, of which the crop yields were not significantly different from those in CK (without fertilization) and the N use efficiency was almost equal to zero, but its N₂O emission factor was lower than those in Treatment NPK. These results indicate that in the investigated soil with winter wheat and maize crop in rotation, crop yields could be maintained at a high level by application of chemical N fertilizer at a rate of 150 kg hm⁻² and P and K fertilizers at a reasonable rate per crop season. In this case negative environmental impact was negligible.

Key words Long-term experiment; Winter wheat; Maize; N use efficiency; Environmental impact