植物营养与肥料学报 2005,11(6):711 - 716
Plant Nutrition and Fertilizer Science

长期施肥条件下华北平原农田硝态氮淋失风险的研究

张云贵，刘宏斌，李志宏，林 葆，张夫道
（中国农业科学院土壤肥料研究所、农业部植物营养学重点开放实验室，北京 100081，China）

摘要： 利用河北辛集潮土(21 年)和北京昌平褐潮土(9 年)两个长期定位施肥试验研究了华北平原冬小麦夏玉米轮作体系下农田氮素平衡和硝态氮淋失风险。结果表明，单施氮肥的增产效果有限，昌平试验点甚至出现减产现象；而适量有机肥与氮磷或氮磷钾配施可显著提高作物产量，降低氮素盈余。单施氮肥时，辛集和昌平土壤硝态氮峰值分别达 20.7 和 30.0 mg/kg，出现在 160—200 cm 和 90—120 cm 土层；硝态氮累积量高且大部分集中在根区外土壤，硝态氮淋失风险大。氮磷或氮磷钾肥配施时，硝态氮峰值出现深度上移 30—40cm，根区和根区外土壤硝态氮累积量均大幅降低，淋失风险明显减弱；在氮磷或氮磷钾肥基础上适量施用有机肥时，硝态氮峰值出现深度进一步上移至根区土壤，深层土壤硝态氮累积量显著下降，淋失风险低。过量施用有机肥或过量施用氮肥时，深层土壤硝态氮累积量大幅增加，甚至超过单施氮肥处理，淋失风险大大增强。研究结果表明，氮磷钾肥与有机肥配合施用是提高作物产量、控制农田硝态氮淋失的重要途径。

关键词： 硝态氮；淋失；氮平衡；长期定位试验
中图分类号： S158.3　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1008-505X(2005)06-0711-07

Study of nitrate leaching potential from agricultural land in Northern China under long-term fertilization conditions

ZHANG Yun-gui, LIU Hong-bin, LI Zhi-hong, LIN Bao, ZHANG Fu-dao
(*Soil and Fertilizer Institute, CAAS, Key Lab. of Plant Nutrition, MOA, Beijing 100081, China*)

Abstract: N balance and the potential of nitrate leaching loss(PNLL) under winter wheat and summer maize rotation system in Northern China was studied with two long-term fertilization experiments, one is at fluvo-aquic soil in Xinji County of Hebei Province with 21 years and another is at brown fluvo-aquic soil in Changping District of Beijing City with 9 years. It was shown that crop yield was lowest under CK treatment and somewhat can be increased by P or PK fertilization. Single N application has little positive effect on crop yield which even brought on negative effect in Xinji experiment. As a result, N surplus was as high as 137 and 212 kg/ha per year under single N fertilization for Xinji and Changping respectively. Crop yield was remarkably increased under NP or NPK fertilization, but N surplus still remain at a lower level even though N uptake improved. When suitable amount of manure was applied combined with NP or NPK fertilizer, crop yield reach very high, but excessive manure application almost has no influence on crop yield, but N surplus can be as high as 227 and 231 kg/ha per year for the two experiments, even much higher than that of single N fertilization. The PNLL was most serious when only N fertilizer was applied in the two sites, as shown that the peak of nitrate content (PNC) occurred at 160—200cm and 120—160cm in soil profile and most of that was in the deep soil layer. When P or PK was applied with N fertilizer, the PNC went upwards for 30—40cm, also nitrate cumulation was sharply decreased both inside and outside the root zone, thus the PNLL was lowered down remarkably. When suitable amount of manure

收稿日期： 2004-09-08　　**修改稿收到日期：** 2005-03-05
基金项目： 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB121101)；国家科技攻关项目(2004BA520A13-8)；北京市自然科学基金项目(6052007)资助。
作者简介： 张云贵(1967—)，男，湖南汉寿人，助理研究员，主要从事施肥与环境研究。

was applied with NP or NPK fertilizer, the NPC went up to 0—90cm, nitrate cumulation outside the root zone was continuously lowered down, the PNLL was very weak. But when excessive manure or N fertilizer was applied, much more nitrate was accumulated in the deep soil layers and the PNLL became much stronger. Heavy soil texture could lower the PNLL. It can be inferred that balanced fertilization is not only an effective way for increasing crop yield, but also a practical measure to control nitrate leaching loss in field scale.

Key words: nitrate; leaching loss; N balance; long-term experiment

化肥在世界粮食总产中的贡献为30%～40%，我国为35%左右[1]。尽管化肥在粮食增产方面取得了巨大成就，但同时也带来了一系列的环境问题，尤以氮肥施用的环境问题最为突出。不论国内还是国外，氮肥均占化肥消耗总量的60%以上，我国达65%[2]。氮肥的大量施用，在提高作物产量的同时，也降低了氮肥利用率，增加了环境风险。近年来因农田不合理施肥造成土壤硝态氮淋溶而引起地下水污染已成为一个全球关注的问题。北京市冬小麦夏玉米轮作地块4 m土体硝态氮累积总量平均为459 kg/hm^2，保护地菜田更高达1230 kg/hm^2[3]。欧美发达国家地下水硝态氮超标率大多在3%～15%之间[4-6]，而我国的一些地区甚至超过50%[7]。

长期定位试验是评价施肥环境效应的重要手段。我国在上个世纪70年末80年代初设立了一批长期肥料定位试验，但以往研究多集中于长期施肥与作物产量及土壤肥力的相互关系[1,8-10]，有关长期施肥条件下农田土壤无机氮的积累及其环境安全方面的研究还相对较少，仅在西北黄土高原有所涉及。华北地区耕地面积占全国的27.9%，粮食产量占全国的26.4%，是我国重要的粮食生产基地。因此，借助长期定位施肥试验研究华北平原农田土壤无机氮的空间分布与累积特征，阐明不同施肥方式下氮素的淋失风险及控制对策，为该区农业的可持续发展提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

河北辛集长期定位试验[10]始于1980年，至取样时已有21年历史。供试土壤为轻壤质潮土，小区面积133.3 m^2。试验选取其中的CK、N、P、NP、NPM、NPM'6个处理。冬小麦氮肥用量为N 180 kg/hm^2，基施2/3，返青追施1/3；磷肥用量为P_2O_5 150 kg/hm^2，隔年基施；有机肥全部基施，M、M'用量分别为37.5和75 t/hm^2(有机肥含氮量3.40 g/kg，以鲜基表示)。夏玉米各处理施氮量均为120 kg/hm^2，拔节追施70%，大喇叭口期追施30%，不施其它肥料。

北京昌平长期定位试验[8-9]始于1991年，至取样时已有9年历史。供试土壤为褐潮土，小区面积200m^2。试验选取其中的CK、PK、N、NP、NPK、N'PK、NPKM、NPKM'8个处理采集深层土壤样品。冬小麦化肥用量为N 150 kg/hm^2、N'195 kg/hm^2、P_2O_5 75 kg/hm^2、K_2O 37.5 kg/hm^2，有机肥用量M、M'分别为22.5 t/hm^{2}和33.75 t/hm^2(有机肥含氮量为3.07 g/kg，以鲜基表示)，化肥和有机肥均作基肥施用。夏玉米化肥用量与冬小麦相同，但不施有机肥。

两个试验点均采用冬小麦—夏玉米轮作模式。土壤均偏碱性，肥力较低，磷、钾养分含量不足。试验前耕层土壤性状见表1。

表1 试验前耕层土壤基础养分状况

Table 1 Nutrients content in the 0—20cm soil layer at the beginning of experiments

试验点 Site	有机质 OM (g/kg)	全氮 TN (g/kg)	速效磷 Olsen-P (mg/kg)	速效钾 NH_4Ac-K (mg/kg)	pH
河北辛集 Xinji, Hebei	11.2	0.6	4.0	87.0	7.8
北京昌平 Changping, Beijing	12.3	0.8	11.2	78.6	8.8

1.2 采样与土壤质地判定

每个小区取3个样点混合。辛集试验点采样时间为2000年9月10日玉米收获前，取样深度为600 cm；昌平试验点采样时间为1999年10月2日玉米收获后，取样深度为300 cm。

采用手感鉴定法判定土壤质地(表2)看出，两个试验点土壤质地均较粘重。其中，辛集试验点0—250 cm土壤剖面各层次的土壤质地以重壤—粘

土为主，250—600cm 土壤均为砂土；昌平试验点与之类似，0—120cm 土壤为重壤—粘土，120—200cm 为中壤，200—300cm 为粘土。

辛集试验点土壤容重为：0—30cm 1.33 g/cm^3，30—60cm 为 1.45 g/cm^3，60cm 以下按 1.42 g/cm^3 计。昌平试验点土壤容重为：0—30cm 1.31 g/cm^3，30—60cm 为 1.48 g/cm^3，60cm 以下按 1.44 g/cm^3 计。

1.3 测定方法

称取 12.00g 过 2mm 筛的新鲜土壤样品于 180 mL 的塑料瓶中，加入 100mL 0.01mol/L 的 $CaCl_2$ 溶液，振荡 1 h，过滤，滤液冷冻保存[3]。测定前解冻，采用连续流动分析仪法（TRACCS-2000 Continuous Flow Analytical，CFA）测定滤液中的硝态氮（NO_3^--N）和铵态氮（NH_4^+-N）含量。

表 2　试验点土壤机械组成

Table 2　Soil textures of each sampled layer at the two experiments

试验点 Site	土壤剖面深度 Depth of soil profile(cm)								
	0—30	30—60	60—90	90—120	120—160	160—200	200—250	250—300	300—600
辛集 Xinji	重壤 Heavy loam	粘土 Clay	重壤 Heavy loam	中壤 Loam	重壤 Heavy loam	粘土 Clay	重壤 Heavy loam	砂土 Sandy	砂土 Sandy
昌平 Changping	重壤 Heavy loam	重壤 Heavy loam	粘土 Clay	粘土 Clay	重壤 Heavy loam	中壤 Loam	粘土 Clay	粘土 Clay	

2 结果与分析

2.1 长期施肥对作物产量和氮素吸收的影响

氮素盈余是衡量农田硝态氮淋失风险的一个重要指标。氮素盈余水平高，硝态氮淋失风险也相对较强。从表 3 可以看出，对照处理（CK）产量最低，吸氮量最少，辛集试验点氮素收支基本平衡，而昌平试验点为负值，即出现亏缺。单施磷肥（P）或单施磷钾肥（PK）可以在一定程度上提高作物产量，增加作物吸氮量，因此进一步加剧了氮素亏缺。相比之下，单施氮肥（N）的增产效果有限，辛集试验点甚至还出现了减产现象，作物吸氮量也仅有小幅增加，两个点氮素盈余分别高达 137 kg/hm^2 和 212 kg/hm^2。与单施氮肥（N）相比，氮磷配施或氮磷钾配施时作物产量和氮素利用能力显著增加，氮素盈余下降，其中辛集氮素盈余仅 28 kg/hm^2，昌平试验点为 135～136 kg/hm^2。在氮磷或氮磷钾肥基础上适量施用有机肥时产量和吸氮量仍有较大幅度增加，两个试验点和吸氮量达到或接近最高产量，其中产量增加 15.0% 和 11.1%，吸氮量增加 23.2% 和 18.1%，氮素盈余仍明显低于单施氮肥处理。过量施用有机肥时，辛集试验点产量和吸氮量无明显变化，昌平试验

表 3　冬小麦—夏玉米轮作体系中年平均氮素收支状况

Table 3　N balance under different fertilization in winter wheat and summer maize rotation system

辛集 Xinji					昌平 Changping				
处理 Treatment	施氮量 N rate	产量 Yield	吸氮量 N uptake	氮平衡 N balance	处理 Treatment	施氮量 N rate	产量 Yield	吸氮量 N uptake	氮平衡 N balance
	(kg/hm^2)					(kg/hm^2)			
CK	120	5645 a	117 a	3 b	CK	0	2766 a	58 a	-58 a
P	120	7560 b	174 b	-54 a	PK	0	3696 ab	71 ab	-71 a
N	300	5636 a	163 b	137 c	N	300	3439 b	88 b	212 c
NP	300	8682 c	272 c	28 b	NP	300	6952 c	164 c	136 b
NPM	428	9987 d	335 d	93 b	NPKM	369	8587 de	196 e	173 b
NPM'	555	10637 de	328 d	227 d	NPKM'	404	7832 d	172 c	231 c
					NPK	300	7727 d	166 c	135 b
					N'PK	390	8104 de	181 cd	209 c

注：辛集为 1979—2000 年试验数据的平均[10]；昌平数据为 1991—1999 年试验数据的平均[8-9]。

Note: Data of Xinji[10] and Changping[8-9] was annually averaged from 1979 to 2000 and 1991 to 1999, respectively.

点产量和吸氮量均明显下降，两个点氮素盈余分别高达 227 kg/hm² 和 231 kg/hm²，大大超过单施氮肥处理。即使在磷钾肥配施的条件下，过量施用氮肥对提高作物产量和吸氮量的作用也较小，而氮素盈余却显著增加，昌平试验点达 209 kg/hm²，与单施氮肥时相当。总起来看，在氮磷或氮磷钾肥基础上适量施用有机肥可以在保证作物高产的条件下，维持较低的氮素盈余。

2.2 土壤剖面中硝态氮的分布规律

试验结果表明，施肥对土壤硝态氮的含量及其空间分布有着显著影响。虽然不同施肥处理下硝态氮均随土壤剖面的加深而下降，但不同处理土壤硝态氮含量及峰值出现深度均存在明显差异。

辛集试验点中(图 1a)，单施磷肥处理(P)土壤硝态氮含量最低，通体不超过 4 mg/kg。对照处理(CK)硝态氮含量略高于单施磷肥处理，60—250cm 土层表现尤为明显。单施氮肥时土壤剖面硝态氮含量较高，峰值出现在 160—200cm 土层，达 20.7 mg/kg，在 250—350cm 土层仍高达 8 mg/kg，350cm 以下土层才降至 1～3mg/kg。氮磷配施(NP)时硝态氮峰值上移至 120—160cm 土层，峰值虽然较高，但下降迅速，250 cm 以下土层即降至 1～3mg/kg。在氮磷化肥基础上施用适量有机肥(NPM)时，土壤剖面硝态氮含量显著降低，峰值(22.7mg/kg)进一步上移到 30—60cm 土层，90cm 以下土层几乎与单施磷肥和对照相当；过量施用有机肥(NPM')时，土壤剖面硝态氮峰值虽然不高(11.0 mg/kg)，但出现层次较深(160—200cm)，且 350cm 以下土层仍达 3～7 mg/kg，甚至大大高于单施氮肥处理。

昌平试验点中(图 1b)，CK 和 PK 两个处理土壤硝态氮含量通体很低，不超过 3 mg/kg。单施氮肥时硝态氮含量较高，0—200cm 各个土层均在 10 mg/kg 以上，在 30—60cm 和 90—120cm 处出现两个峰，分别为 30.0 和 22.1 mg/kg。NP 和 NPK 处理可显著降低土壤硝态氮含量，NPK 的效果更为明显，硝态氮峰值低，出现层次浅(60—90cm 土层)，120cm 以下土层硝态氮含量即降至 0～3mg/kg。过量施用氮肥(N'PK)时硝态氮含量明显高于适量施氮处理(NPK)，其中 0—200cm 土层几乎均在 10 mg/kg 以上。施用有机肥大大增加了 0—60cm 土壤中的硝态氮含量，降低了 90cm 以下土层含量，过量施用有机肥时(NPKM')0—60cm 土壤硝态氮含量也更高。从图 1b 还看出，昌平试验点各个处理 200—300cm 土层硝态氮含量极低，即便在过量施用氮肥(N'PK)时也不足 2mg/kg，表明粘土对硝态氮淋溶有一定的阻碍能力。

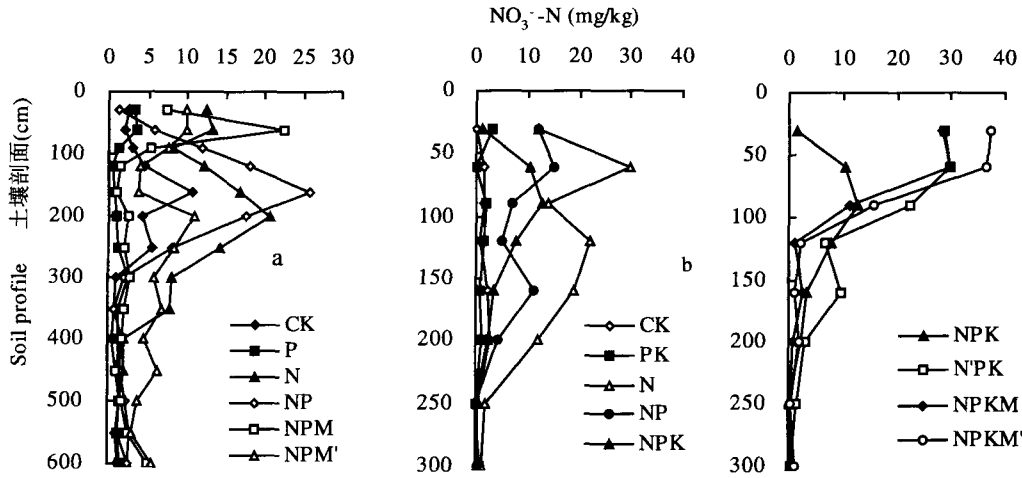

图 1 施肥对土壤剖面硝态氮含量的影响(a:辛集; b:昌平)

Fig.1 NO_3^- - N content in soil profiles under different fertilization (a:Xinji; b: Changping)

2.3 土壤剖面硝态氮的累积量

对于冬小麦和夏玉米来说，90%以上的根系集中在 0—90cm 土层，仅有少量根系可下扎到 200cm，深层的少量根系以吸收水分为主，对养分的利用很少，因此深层土壤硝态氮很难被作物吸收利用，通常将 0—90cm 土壤称为根区土壤，90cm 以下为根区外土壤。综合两个试验点的结果可以看出(图 2)，不施氮肥时，土壤硝态氮累积量极低，淋溶风险很轻，比较而言，单施磷肥或单施磷钾肥处理土壤硝态氮累积量低于对照处理，且 0—90cm 根区土壤硝态氮

的所占比例较高，淋溶风险更低。辛集试验点 P 和 CK 两个处理 0—600 cm 土层累积量分别为 135.0 kg/hm² 和 226.9 kg/hm²，前者根区土壤占 26.5%，后者仅占 14.7%（图 2a）；昌平试验点 PK 和 CK 两个处理 0—300 cm 土层累积量分别仅为 46.9 kg/hm² 和 49.8 kg/hm²，前者根区土壤占 44.6%，后者仅占 28.8%（图 2b）。

单施氮肥时土壤硝态氮累积量最高，且大部分集中在根区外土壤，硝态氮淋溶风险很强。辛集试验点中，单施氮肥时 0—600cm 土壤剖面硝态氮累积量达 694.1 kg/hm²，90—600 cm 根区外土壤占 79.3%，200—600cm 深层土壤仍达 40.8%；昌平试验点 0—300cm 土壤累积量达 539.4 kg/hm²，根区外土壤占 55.0%。

与单施氮肥（N）相比，NP 或 NPK 配施可有效降低土壤剖面硝态氮累积量，特别是深层土壤累积量。辛集试验点（图 2a）中，NP 处理 0—600cm 土壤累积量为 565.5 kg/hm²，比单施氮肥时降低 18.5%，其中 200—600 cm 深层土壤为 157.3 kg/hm²，较单施氮肥降低 44.5%。昌平试验点中，NP 和 NPK 配施时 0—300cm 土壤硝态氮分别降低 51.7% 和 67.2%，90—300cm 根区外土壤分别降低 61.0% 和 76.5%。深层土壤剖面硝态氮累积量少，表明来源于上层土壤的硝态氮淋失量少，淋失风险减弱。适量施用有机肥（NPM）可增加根区土壤硝态氮累积量，提高土壤供氮水平，减少根区外土壤硝态氮累积量，降低硝态氮淋失风险。辛集试验点中，与 NP 相比，NPM 处理根区土壤硝态氮增加 82.6%，而 90—600 cm 根区外土壤硝态氮却降低 69.7%。

昌平试验点（图 2b）的结果与辛集类似。过量施用有机肥（NPM'或 NPKM'）促进了硝态氮向深层土壤的淋溶和累积，大大增强了淋失风险。辛集试验点中，200—600 cm 深层土壤硝态氮累积量达 320.2 kg/hm²，甚至比单施氮肥还高 13.0%，远远高于 NP 和 NPM 处理。昌平试验点过量施用有机肥时，虽然 90—200 cm 土壤硝态氮仍较低，但 200—300 cm 土壤已明显高于 NPK 和 NPKM 处理，接近于 N 和 NPK 处理，加之根区土壤硝态氮过高，预计随着试验时间延长，淋失风险将更强。即使在配施磷钾肥条件下，过量施用氮肥仍可大大增强硝态氮淋失风险。昌平试验点氮肥用量从 150 kg/hm²（NPK）增加到 195 kg/km²（N'PK）时，0—300cm 土壤硝态氮增加了 160.1%，其中 0—90cm 和 90—300cm 土壤分别增加了 220.9% 和 66.2%。

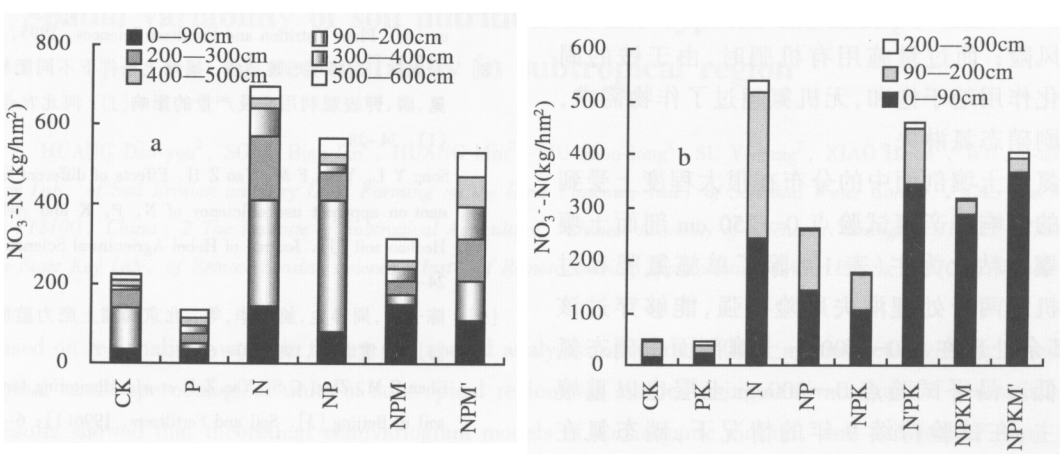

图 2　施肥对土壤剖面硝态氮累积量的影响（a：辛集；b：昌平）

Fig.2　NO_3^- – N accumulation in soil profiles under different fertilization（a：Xinji；b：Changping）

3　讨论

近年来，地下水硝态氮污染已成为全球关注的热点问题。研究表明，氮肥的不合理施用是地下水硝态氮污染的主要原因[11]，在不合理施用氮肥及过量灌水条件下，硝态氮在土壤剖面中大量累积并向下淋溶，从而污染地下水。长期定位施肥试验是研究土壤硝态氮淋失风险的一个有效手段，硝态氮在土壤剖面中的含量及其空间分布特征是表征硝态氮淋失风险的重要指标。土壤剖面硝态氮淋洗峰越深，深层土壤硝态氮累积量越高，表明农田硝态氮淋失风险越强。

综合辛集、昌平两个长期定位试验的研究结果，在华北地区冬小麦—夏玉米轮作种植制度下，单施

氮肥时土壤硝态氮累积量最高，且大部分集中在根区外土壤，硝态氮峰值出现最深，达160—200cm和90—120cm土层；而氮磷或氮磷钾配施时，硝态氮峰值上移30—40cm，根区和根区外土壤硝态氮累积量均明显降低；适量施用有机肥时硝态氮淋洗峰进一步上移到根区土壤，深层土壤硝态氮累积量也显著降低；而过量施用有机肥时，深层土壤硝态氮累积量明显增加，接近甚至超过单施氮肥处理；即使在配施磷钾肥条件下，过量施用氮肥仍可促进硝态氮向下淋溶，增强硝态氮淋失风险。总的来看，单施氮肥、过量施用有机肥、过量施用氮肥时土壤硝态氮淋失风险均很强，其次为氮磷或氮磷钾配施处理，而适量有机肥与氮磷(钾)配合施用时土壤硝态氮淋失风险很弱，这与不同处理氮素盈余高低的顺序基本类似。杨学云等[12]、郭胜利等[13]、叶优良等[14]利用长期施肥试验在我国西北旱地土壤上的研究也得到了类似结果。这也表明，平衡施肥是提高作物产量与降低环境风险的双重保障。缺磷、缺钾土壤上施用磷、钾肥能够减轻硝态氮淋失风险的原因在于，磷、钾肥促进了作物生长和对氮素的利用能力，提高氮肥利用率[15-16]。适量施用有机肥可以协调土壤养分供应能力，促进氮素吸收，增加土壤碳库，提高微生物活性，增强对铵的固定及反硝化作用，降低了硝态氮淋失风险；而过量施用有机肥时，由于铵的固定和反硝化作用趋于饱和，无机氮超过了作物需求，同样会加剧硝态氮淋失。

硝态氮在土壤剖面中的分布在很大程度上受到土壤质地的影响。辛集试验点0—250 cm剖面土壤质地以重壤—粘土为主(表1)，除了单施氮肥和过量施用有机肥两个处理淋失风险很强，能够穿过该区以外，其余处理在250—600cm土壤剖面中硝态氮含量均很低。昌平试验点0—300cm土层也以重壤和粘土为主，在试验持续9年的情况下，硝态氮在200—300cm土层中累积的量仍很低。因此，土壤质地粘重可以在一定程度上阻止硝态氮向下淋溶，这与杨学云等在陕西的研究结果类似[12]。这也意味着在发展蔬菜、花卉等氮肥用量高、淋失风险强的作物时，应充分考虑土壤质地的因素。

华北平原冬小麦—夏玉米轮作制度下，不合理施肥现象较为普遍。部分地区氮肥平均用量已在450kg/hm^{2}以上[11]，超过昌平试验点中过量施氮肥处理(390 kg/hm^2)，加之长期忽视钾肥施用，土壤缺钾问题日益严重，预测华北平原农田硝态氮淋失较为普遍，特别是在沙土地区将更为突出。在当前有机肥难以推广的情况下，控氮增钾，推广平衡施肥技术，将成为控制农田硝态氮淋失的一条有效途径。

参考文献：

[1] 林葆，林继雄，李家康. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化[J]. 植物营养与肥料学报，1994(试刊)：6-18.
Lin B, Lin J X, Li J K. The changes of crop yield and soil fertility with long - term fertilizer application [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1994 (Trail): 6-18.

[2] FAO. FAOSTAT [DB/OL]. www.fao.org, 1999.

[3] 刘宏斌，李志宏，张云贵，等. 北京市农田土壤硝态氮的分布与累积特征[J]. 中国农业科学，2004，37(5)：692-698.
Liu H B, Li Z H, Zhang Y G *et al*. Characteristics of nitrate distribution and accumulation in soil profiles under main agro-land use types in Beijing [J]. Scientia Agriculturara Sinica, 2004, 37(5): 692-698.

[4] Power J E. Nitrate contamination of ground-water in north America [J]. Agriculture, Ecosystem and Environment, 1989, 26: 165-187.

[5] Overgaard K. Trends in nitrate pollution of groundwater in Denmark [J]. Nordic Hydrology, 1989, 15(4,5): 177-184.

[6] Thorburn P J, Biggs J S, Weier K L *et al*. Nitrate in groundwaters of intensive agricultural areas in coastal Northeastern Australia [J]. Agricultue, Ecosystems and Enviornment, 2003, 94: 49-58.

[7] 张维理，田哲旭，张宁. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. 植物营养与肥料学报，1995，1(2)：80-87.
Zhang W L, Tian Z X, Zhang N *et al*. Investigation of nitrate pollution in ground water due to nitrogen fertilization in agriculture in north China [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Sciences, 1995, 1(2): 80-87.

[8] 宋永林，袁锋明，姚造华. 褐潮土条件下不同肥料配合对作物氮、磷、钾表观利用率及产量的影响[J]. 河北农业科学，2002，6(1)：24-28.
Song Y L, Yuan F M, Yao Z H. Effects of different fertilizer component on apparent use efficiency of N, P, K and yields of crops in Hechao soil [J]. Journal of Hebei Agricultural Science, 2002, 6(1): 24-28.

[9] 陈子明，周春生，姚造华，等. 北京褐潮土肥力监测研究的初报[J]. 土壤肥料，1996(1)：6-11.
Chen Z M, Zhou C S, Yao Z H *et al*. Monitoring fertility of Hechao soil in Beijing [J]. Soil and Fertilizers, 1996(1): 6-11.

[10] 林葆，林继雄，艾卫. 氮磷钾化肥定位试验结果[A]. 林葆，林继雄，李家康. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化[C]. 北京：中国农业科技出版社，1996. 166-171.
Lin B, Lin J X, Ai W. Site-position experiment results of N, P and K fertilizers application[A]. Lin B, Lin J X, Li J K. The changes of crop yield and soil fertility with long-term fertilizer application [C]. Beijing: Chinese Agricultural Scientech Press, 1996. 166-171.

[11] 刘宏斌. 施肥对北京市农田土壤硝态氮累积与地下水污染的影响[D]. 中国农业科学院博士学位论文，2002.
Liu H B. Influence of fertilization on NO_3^--N accumulation and pollution in soil and groundwater of beijing rural area [D]. Dissertation of phD, Chinese Agricultural Academic Science, 2002.

[下转第736页]

[上接第 716 页]

[12] 杨学云,张树兰,袁新民,等. 长期施肥对塿土硝态氮分布、累积和移动的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2001,7(2): 134-138.

Yang X Y, Zhang S L, Yuan X M *et al*. A long-term experiment on effect of organic manure and chemical fertilizer on distribution, accumulation and movement of NO_3^--N in soil [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science,2001, 7(2): 134-138.

[13] 郭胜利,党廷辉,郝明德. 黄土高原沟壑区不同施肥条件下土壤剖面中矿质氮的分布特征[J]. 干旱地区农业研究,2000,18(1): 22-27.

Guo S L, Dang T H, Hao M D. Mineral N distribution of soil profile in gully area of the loess plateau [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2000, 18(1): 22-27.

[14] 叶优良,包兴国,宋建兰,等. 长期施用不同肥料对小麦/玉米间作产量、氮吸收利用和土壤硝态氮累积的影响 [J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(2): 113-119.

Ye Y L, Bao X G, Song J L *et al*. Effect of long-term fertilizer application on yield, nitrogen uptake and soil NO_3^--N accumulation in wheat/maize intercropping [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(2): 113-119.

[15] 袁新民,同延安,杨学云,等. 施用磷肥对土壤硝态氮累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2000,6(4): 397-403.

Yuan X M, Tong Y A, Yang X Y *et al*. Effect of phosphate application on soil nitrate nitrogen accumulation [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(4): 397-403.

[16] Benbi D K, Biswas C R, Kalkat J S. Nitrate distribution and accumulation in an Ustochrept soil profile in a long-term fertilizer experiment [J]. Fertilizer Research, 1991, 28: 173-177.