植物营养与肥料学报 2015,21(2): 326 - 335 doi: 10.11674/zwyf.2015.0206
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响

习 斌[1], 翟丽梅[1], 刘 申[1], 刘宏斌[1], 杨 波[1], 任天志[2*]
(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部面源污染控制重点实验室, 北京 100081;
2 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要:【目的】氮、磷是农作物生长所必需的营养元素,对提高农作物产量和改善产品品质均有重要作用,但由于肥料不合理施用,农田土壤中养分大量盈余,在降雨或灌溉条件下易随水流失,导致水环境质量下降。因此,研究有机无机肥料配施对土壤氮、磷淋溶风险的影响,可为地下水环境质量保护提供依据。**【方法】**采用田间渗滤池法,对华北地区玉米季氮磷淋溶状况连续5年进行监测,具体施肥处理如下: 对照(不施用氮肥,PK)、单施化肥(NPK)、单施有机肥(与NPK处理等氮量,SW)、有机肥无机肥料配施(用猪粪中氮替代50% NPK处理中氮用量,SNP)。采集120 cm处淋溶水,测定氮、磷含量,研究在总氮投入量相同条件下,有机无机肥料配施对华北地区玉米产量及土壤剖面120 cm处氮磷淋溶的影响。**【结果】**1)有机无机肥料配施(SNP)处理,可以保证玉米较高产量,5年平均产量较单施化肥处理(NPK)提高10.3%。2)有机无机肥料配施可以显著减少总氮(TN)淋溶量,SNP处理较NPK处理减少71.4%;NPK处理淋溶水中 NO_3^--N浓度显著高于SNP处理,其平均浓度分别为54.93 mg/L、13.47 mg/L。3)在等氮量投入条件下,有机肥的投入带入了大量磷素,单施有机肥(SW)较NPK处理总磷(TP)淋溶量增加了0.6倍,分别为0.056 kg/hm^2、0.035 kg/hm^2;淋溶水中TP浓度分别为0.09 mg/L、0.066 mg/L。在氮磷养分淋溶损失中,NO_3^--N占淋溶水TN的80%以上,可溶性总磷(TDP)占淋溶水TP的70%左右。4)在监测淋溶水中,NPK处理 NO_3^--N平均浓度已超过我国地下水Ⅲ类水质量标准(GB/T 14848-9),SW处理TP平均浓度0.09 mg/L,也高于水体富营养化TP浓度(0.02 mg/L)的临界值,可对水体造成污染。**【结论】**在氮磷养分淋溶损失中,NO_3^--N占淋溶水TN的80%以上,TDP占淋溶水TP的70%左右。采用猪粪氮替代50%化肥氮素的有机无机肥料配施处理,5年玉米平均产量显著高于单施化肥处理,证明该施肥方法不仅可以确保产量,还可降低氮素淋溶,基本保证淋溶水中 NO_3^--N浓度低于地下水Ⅲ类水质量标准(GB/T 14848-9)。

关键词: 有机无机肥配施; 淋溶; 氮; 磷; 产量
中图分类号: X523 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)02-0326-10

Effects of combination of organic and inorganic fertilization on maize yield and soil nitrogen and phosphorus leaching

XI Bin[1], ZHAI Li-mei[1], LIU Shen[1], LIU Hong-bin[1], YANG Bo[1], REN Tian-zhi[2*]
(*1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Nonpoint Source Pollution Control, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 2 Institute of Agro-Environmental Protection, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China*)

Abstract:【Objectives】 Nitrogen (N) and phosphorus (P), two essential nutrients for plant growth, play important roles in increasing crop yields and improving the quality of agricultural products. However, unreasonable applications of N and P fertilizers cause surplus of nutrients in soil, and their losses alone with rainfall or irrigation would ultimately lead to the decrease of environmental water quality. In this study, a long-term field lysimeter study was carried out to investigate the possible effect of combined application of organic and inorganic fertilizers in alleviating the leaching of N and P from the soil, to provide scientific support for protection of groundwater quality. **【Methods】** The leaching of N and P had been monitored in the National Soil Fertility Long-term Experimental

收稿日期: 2014-02-19 **接受日期:** 2014-07-15
基金项目: 公益性行业(农业)科研专项 (20100314)资助。
作者简介: 习斌(1982—),男,河北石家庄人,博士研究生,主要从事农业面源污染防治研究。E-mail: xxiibbiinn@163.com
* 通信作者 E-mail: rentianzhi@caas.cn

Station in Changping City, Beijing for 5 consecutive years. The treatments include: control (no application of N fertilizer, PK), only chemical fertilizer (NPK), only organic fertilizer with the same N application rate as NPK treatment (SW), and combined organic and chemical fertilizer (replacing the 50% dosage of N fertilizer with pig manure). During the monitoring period, the leachate was collected at a soil depth of 120 cm and the concentrations of N and P in the leachate were measured to study influences of combined application of the organic and chemical fertilizers on maize yield and N and P leaching, under the same rate of N application to the field. **【Results】** 1) The combined application of 50% N in pig manure and 50% N in chemical fertilizer (SNP) ensures a high level of maize yield, the 5-year's average yield is 10.3% higher than NPK treatment. 2) Compared with the NPK treatment, the total N (TN) leaching was significantly reduced by 71.4% through the combined application of organic and inorganic fertilizers. The average concentration of NO_3^--N in leachate under the NPK treatment (54.93 mg/L) is significantly higher than that under the SNP treatment (13.47 mg/L). 3) Under the equal N application rate, the amount of P applied in pig manure treatment (SW) is much higher than that in the NPK treatment. As a result, the total P (TP) leaching under the SW treatment is 0.6 times higher than that under the NPK treatment. The average concentrations of TP in leachate of the SW and NPK treatments are 0.09 mg/L and 0.066 mg/L, respectively. The amount of NO_3^--N accounts for 80% of TN in leachate, and the dissolved form of P accounts for about 70% of TP. 4) The average concentration of NO_3^--N in leachate from the NPK treatment exceeds the threshold value for Class III of groundwater quality (GB/T 14848-9). Moreover, the concentration of TP in leachate from SW (0.09 mg/L) is higher than the threshold of TP (0.02 mg/L) for water eutrophication. **【Conclusions】** The amount of NO_3^--N accounts for 80% of total N in leachate, and total dissolved P accounts for about 70% of TP. The 5 years' average maize yield in the treatment of combined application of the organic and chemical fertilizers proves that this treatment can significantly increase the yield, at the same time, could basically guarantee the concentration of NO_3^--N in leachate at a level lower than the threshold value for Class III of groundwater quality (GB/T 14848-9).

Key words: organic-inorganic fertilization; leaching; nitrogen; phosphorous; yield

氮、磷是农作物生长所必需的营养元素,对提高农作物产量和改善产品品质均有重要作用[1],但由于肥料不合理施用,农田土壤中养分大量盈余,在降雨或灌溉条件下易随水流失,导致水环境质量下降,目前已引起了人们的广泛关注[2-6]。研究表明,华北地区地下淋溶是农田土壤氮素的主要损失途径,化肥的过量施用已造成该区地下水硝酸盐含量超标[7-11]。一般认为,土壤有很强的磷固定能力,土壤磷素垂直向下淋溶的可能性不大[12],但近年研究报道指出,当磷素超过饱和吸附点时,易产生淋溶损失,且过量磷肥投入和不合理灌溉方式,极大的增加了磷素流失风险,特别是在有机肥用量较大设施菜田[13-14]。我国大部分地区土壤磷素水平从 20 世纪 80 年代的 10 mg/kg 提高到了现在的 20 mg/kg 以上,并有进一步提高的趋势[15]。李书田等[16]对全国农田磷素收支平衡进行了统计,华北地区农田磷盈余量最高,达到 P 85.2 kg/hm^2,因此农田磷素淋溶风险,同样不可忽视。

肥料品种和施肥方式是影响农田氮、磷流失的重要因素[17-20]。在农业生产过程中,普遍存在重化肥,轻有机肥的现象[21],大量有机肥因得不到有效利用和妥善处理,使得有机肥这一重要养分资源转变为重要污染源[22-23]。研究表明,有机无机肥料配施能够降低农田氮素淋溶[24],还可有效提高氮肥、磷肥的利用率[25-26]。现阶段,关于有机无机肥料配施研究多关注于对作物产量的影响,对氮、磷流失的研究也多仅考虑了氮素淋溶损失,而忽略了磷素的淋溶,并且多以盆栽和土柱模拟试验为主,缺乏较长期的田间试验验证[24,27-29]。本研究采用渗滤池长期定位监测试验,研究有机无机肥料配施对土壤氮、磷淋溶风险的影响,以期为地下水环境质量保护提供依据。

1　材料与方法

1.1　试验地基本情况

试验点位于北京市昌平区农业部昌平褐潮土生态环境重点野外科学观测试验站(40°13′N,116°15′E)。土壤母质为黄土性物质,属褐潮土,粘粒含量

10.2%。年均降雨量530 mm,年蒸发量1065 mm,年均温度13℃,有效积温2386℃,无霜期210 d,极端天气通常为春季干旱和夏季暴雨。当地地下水水位在4 m左右,水位较浅主要由于试验田周边有一条河。试验监测期内降雨量分布见图1。

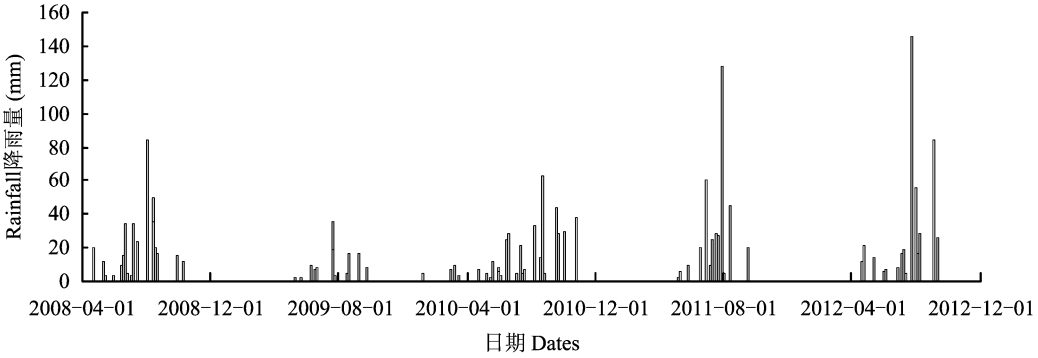

图1 监测期降雨量

Fig. 1 Daily rainfall record during the experimental period

渗滤池长2.0 m,宽1.0 m,深1.5 m。为保证试验顺利进行,试验前六个月,将所有渗滤池的土壤按照20 cm分层挖出、混匀;渗滤池底部铺设0.2 m厚砾石和粗沙,并用0.15 mm尼龙网布覆盖;然后将混匀后的土壤分层回填、灌水、压实;渗滤池土层底部距表层1.2 m,在渗漏池底部留有出水口,收集淋溶水。试验开始前种植一季玉米,但不施用任何肥料,进行匀地试验,2007年10月开始布置正式试验。试验前土壤的基本化学性状见表1,该渗滤池土壤比较贫瘠,主要是由于近10年未种植作物和施用肥料。

表1 供试土壤基本理化性状

Table 1 Basic chemical properties of the soil before seeding of the field experiment in 2007

土层深度(cm) Soil depth	有机质 OM (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	全钾 Total K (g/kg)	速效磷 Olsen-P (mg/kg)	速效钾 Avail.-K (mg/kg)	pH (5∶1)
0—20	6.56	0.757	0.67	14.76	5.95	79	8.26
20—50	6.21	0.583	0.69	15.07	1.84	68	8.54
50—80	4.92	0.292	0.62	14.08	1.31	62	8.45
80—120	2.30	0.488	0.64	16.10	2.59	89	8.52

1.2 试验方案

试验设置4个处理,3次重复,分别为对照处理(不施用氮肥,PK)、单施化肥(NPK)、单施有机肥处理(与NPK处理等氮量,SW)、有机肥无机肥料配施(用猪粪中氮替代50% NPK处理中氮用量,SNP)。参照当地玉米种植推荐用量,N为240 kg/hm^2,P_2O_5为120 kg/hm^2,K_2O为180 kg/hm^2。氮肥为尿素、磷肥为过磷酸钙、钾肥为硫酸钾,有机肥为腐熟后风干猪粪。猪粪年均用量为11800 kg/hm^2,由猪粪带入的总磷量平均为542.6 kg/hm^2。施用猪粪处理钾肥不足的由化肥钾补齐,有机肥磷不做限制。过磷酸钙、硫酸钾、有机肥和62.5%的尿素均作为底肥一次性施入,剩余37.5%的尿素在玉米大喇叭口期作为追肥施用。每年玉米播种后灌水10～30 mm,大喇叭口期灌水5 mm,其余时期无灌溉。玉米品种为当地农户普遍种植的京单28,种植密度每个小区种植12棵玉米,相当于60000株/hm^2。试验始于2007年10月冬小麦,从2008年6月至2012年9月均为玉米单作。

1.3 样品采集与测定方法

淋溶水样采集:从2011年开始监测淋溶水,每次获得淋溶水后,先量其体积并取样500 mL,测定

其中总磷(TP)、可溶性总磷(TDP)、总氮(TN)、可溶性总氮(TDN)、NO_3^--N、NH_4^+-N。降雨、灌溉水样采集:采集每次降雨、灌溉水样,测试指标同淋溶水样;土壤样品采集:每季玉米收获后采集 0—20 cm 土壤样品(5 点混合),测定有效磷(Olsen-P)。植株样品采集:作物收获后,记录作物产量,并分秸秆和籽粒采集样品,用于测定全氮、全磷含量。

测定方法:淋溶水、降雨、灌溉水等水样中总磷(TP)、可溶性总磷(TDP)、总氮(TN)、可溶性总氮(TDN)测定方法参照《土壤和农业化学分析法》[30];铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N),采用连续流动注射分析仪(AA3)测定[11]。土壤 Olsen-P、植株中氮、磷含量采用农化分析常规方法进行测定[30]。

1.4　计算方法

表观淋溶率(%) = 淋溶量 ×100/肥料施用量

数据处理采用 SPSS11.0 软件进行统计分析,作图采用 SigmaPlot 8.0。

2　结果与分析

2.1　玉米产量

连续 5 年的监测结果表明(表 2),单施化肥(NPK)、有机无机肥料配施(SNP)和单施有机肥(SW)处理玉米产量显著高于对照(PK)处理,平均增产 80.8% ~ 108.6%,这可能与试验小区基础土壤肥力水平较低有关(表 1)。SNP 较 NPK 处理 5 年平均增产 0.45 t/hm^2,增产率为 10.3%。从不同年份玉米产量变化趋势可以看出(表 2),2008 年种植作物初期,NPK 处理显著($P < 0.05$)高于 SW、SNP 处理,之后 3 年三个产量差异不显著,但 SNP 处理产量最高,并且 2012 年显著($P < 0.05$)高于 NPK 处理;SW 处理产量 5 年处于增产趋势,平均产量略低于 NPK 处理,但两者间无显著差异。由此可以看出,在等氮量条件下,5 年施用期限内有机肥替代 50% 化肥氮(SNP)用量以及单施有机肥(SW)条件下,作物表现出整体增产趋势。

表 2　不同施肥处理的玉米产量(t/hm^2)

Table 2　Maize yields of different fertilization treatments

处理 Treatment	2008	2009	2010	2011	2012	平均 Avarege	增产率(%) Increase
PK	4.00 ±0.25 d	3.38 ±0.42 b	5.38 ±0.89 b	4.03 ±0.36 b	5.26 ±0.03 c	4.41	—
NPK	9.84 ±0.12 a	7.30 ±0.65 a	7.64 ±0.62 a	9.37 ±0.41 a	9.58 ±0.16 b	8.75	98.30
SW	6.09 ±0.31 c	7.14 ±1.22 a	7.87 ±1.11 a	8.81 ±0.68 a	9.95 ±0.18 ab	7.97	80.75
SNP	9.17 ±0.24 b	8.71 ±0.16 a	8.36 ±0.86 a	9.62 ±0.22 a	10.14 ±0.35 a	9.20	108.60

注(Note):同列数值后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column are significantly different at 5% level.

2.2　淋溶水中氮、磷浓度变化特征

图 2 表明,NPK 处理淋溶液中总氮平均浓度为 60.1 mg/L,在 2011 年 7 月 25 日和 2012 年 8 月 1 日分别出现一次峰值,达到 95.0 mg/L 和 60.9 mg/L。这一现象可能由于2011 年6 月30 日进行了追肥,并且在 7 月连续出现 6 次降雨,土壤水处于饱和状态,氮素向下运移造成;之后在 2011 年 7 月 30 日虽然降雨量达到 127 mm,但土壤经过前期的淋溶,总氮浓度较之前有所下降,表明在前次连续降雨条件下,已将土壤大部分氮素淋出 1.2 m 深土体;2012 年淋溶水总氮浓度的变化特征与 2011 年表现类似。上述化肥氮素淋溶特征表明,在选择追肥时期时,应考虑雨季时间,尽量避开降雨时段进行施肥,减少总氮淋溶损失。在整个淋溶产生期内,SNP 处理淋溶水中总氮年均浓度为 15.6 mg/L,SW 处理为 5.9 mg/L,均显著($P < 0.05$)低于 NPK 处理。PK 处理的总氮平均浓度最低,为 1.7 mg/L。上述结果表明,在等氮条件下,与单施化肥相比,采用部分有机肥替代化肥,可以显著($P < 0.05$)降低淋溶水中总氮浓度。

图 3 表明,各处理 NO_3^--N 浓度动态变化趋势与总氮变化趋势相同。参照地下水质量标准(GB/T 14848-9),2011 和 2012 年 NPK 处理 120 cm 处淋溶水 NO_3^--N 浓度超过 Ⅴ 类水(大于 30 mg/L)的次数分别为 7 次和 3 次,其中 2011 年产生的淋溶水 NO_3^--N 平均浓度为 79.30 mg/L,全部超过 Ⅴ 类水;2012 年平均浓度为 37.60 mg/L。2011 和 2012 年 SNP 处理淋溶水 NO_3^--N 平均浓度分别为 17.60 mg/L、13.2 mg/L,显著($P < 0.05$)低于 NPK 处理,

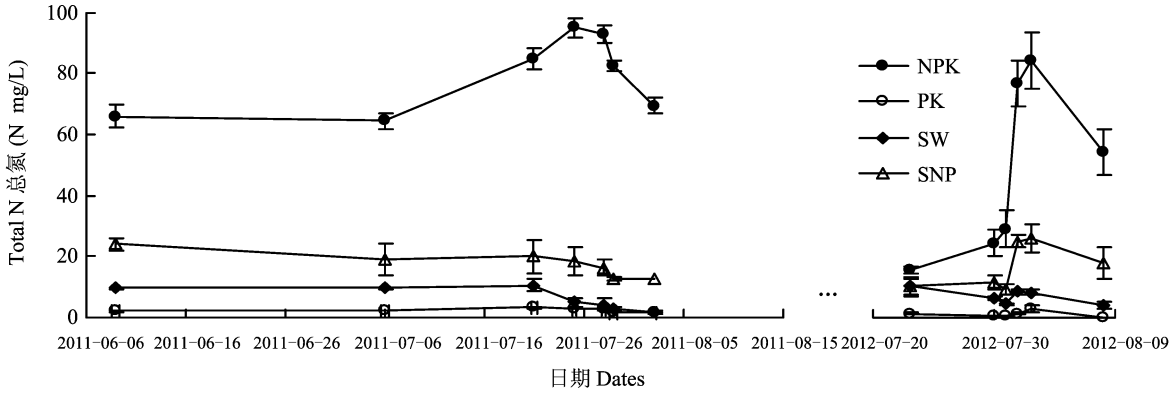

图2 作物生长期淋溶水中总氮动态变化

Fig. 2 Dynamics of total nitrogen (TN) concentration in leachate during the cropping seasons

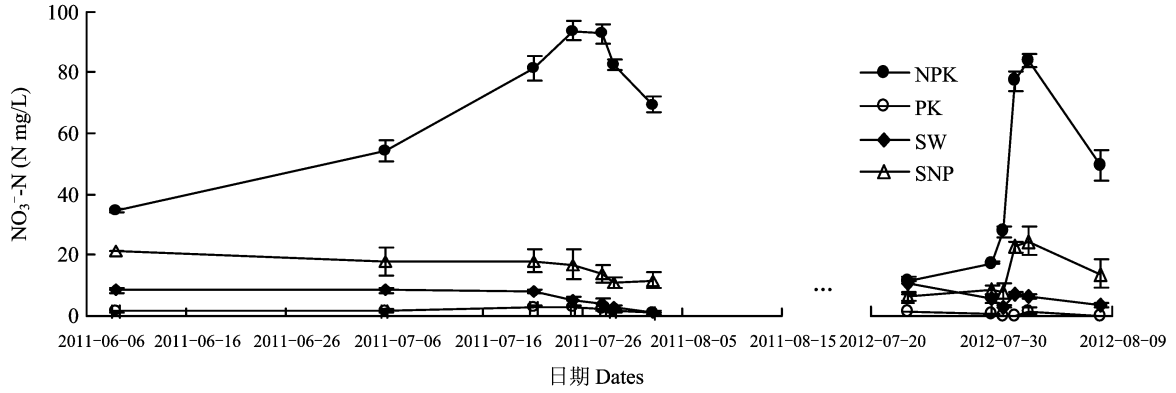

图3 作物生长期淋溶水中 NO_3^--N 动态变化

Fig. 3 Dynamics of NO_3^--N concentration in leachate during the cropping seasons

其中2011年有1次淋溶水在Ⅳ类水(20～30 mg/L)范围,其他次数产生的淋溶水均好于Ⅳ类水。单施有机肥处理(SW)淋溶水 NO_3^--N 浓度显著($P<0.05$)低于NPK和SNP处理,2011和2012年平均浓度分别为6.23和5.58 mg/L,在监测期内淋溶水水质好于地下水Ⅲ类水(5～20 mg/L)。对照(PK)处理,2011和2012年 NO_3^--N 平均浓度分别为2.01和0.53 mg/L,为地下水标准Ⅰ至Ⅱ类水。上述结果表明,在等氮量肥料施用情况下,单施化肥可以显著提高淋溶水中 NO_3^--N 浓度,有机无机配施可以显著($P<0.05$)降低淋溶水中 NO_3^--N 的浓度。

图4显示,各处理2011和2012年TP平均浓度大小为:SW > SNP > PK > NPK,平均浓度分别为0.091、0.071、0.066和0.064 mg/L,均高于地表水Ⅲ类水对TP浓度(0.05 mg/L)要求。在每年前几次产生的淋溶水中,处理间TP浓度差异较大,但均以施用有机肥处理(SW)淋溶水中TP浓度最高,其中,2011年TP浓度最高值为第二次产生的淋溶水0.154 mg/L,2012年同样为第二次最高为0.137 mg/L,显著($P<0.05$)高于其他处理,在之后产生淋溶水中TP浓度各处理间差异不显著。

2.3 氮、磷淋溶量

本研究对2011和2012年淋溶量和降雨量相关关系进行了分析,玉米生长期内降雨量分别为390和524 mm,分别采集到淋溶水7次和6次,淋溶量分别为78和92 mm。由图5可知,在降雨量低于30 mm时,如果不出现连续降雨,一般不产生淋溶。相对降雨来说,淋溶水具有一定的滞后性,一般在降雨后2～5天在土层1.2 m处仍有淋溶产生。

对比各处理总氮淋溶量(表3),NPK处理TN淋溶量显著($P<0.05$)高于其他处理,2011、2012年分别达61.38 kg/hm^{2}和31.49 kg/hm^2;SNP处理可以

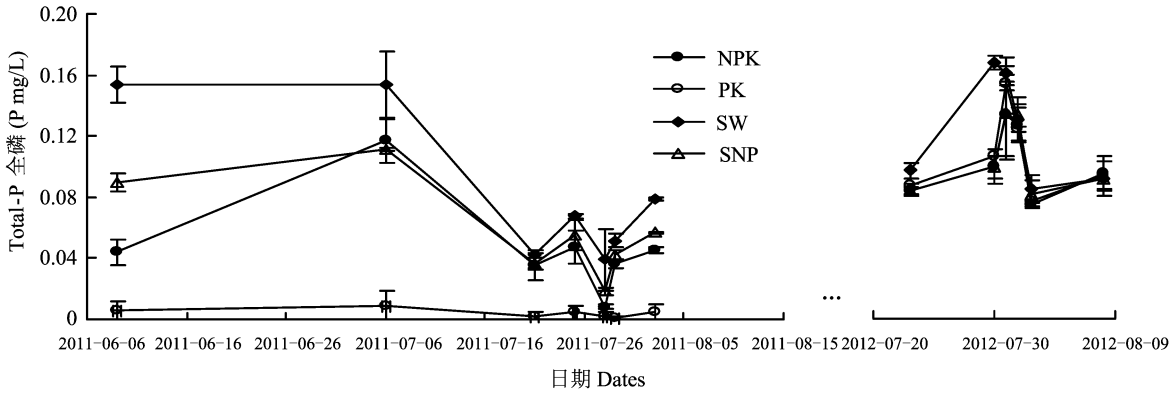

图 4　作物生长期淋溶水中总磷动态变化

Fig. 4　Dynamics of total phosphorus (TP) concentration in leachate during the cropping seasons

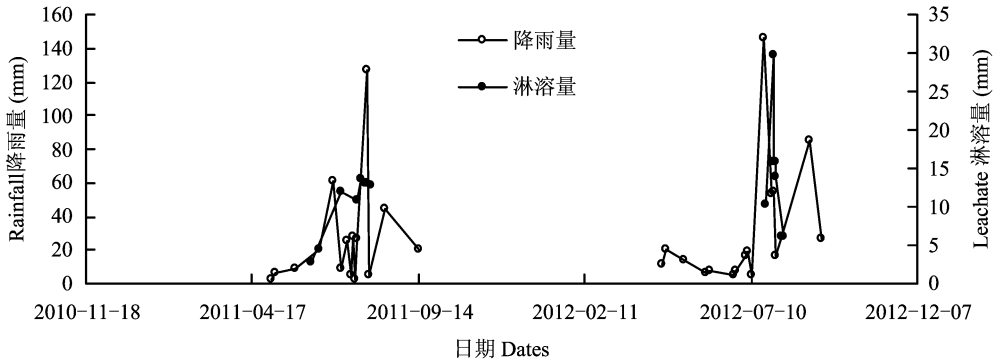

图 5　降雨量与淋溶量关系

Fig. 5　The relationship between rainfall and leaching amount

表 3　不同施肥处理下不同形态氮素的淋溶量

Table 3　Amounts and forms of the leaching N under different fertilization treatments

年份 Year	处理 Treatment	全氮 TN	可溶性总氮 TDN	NO_3^--N	NH_4^+-N	TDN /TN	NO_3^--N /TN	NH_4^+-N /TN	表观淋溶率 Apparent N leaching ratio
		(kg/hm^2)				(%)			(%)
2011	PK	1.97 d	1.83 d	1.68 d	0.15 a	92.89	85.28	7.61	
	NPK	61.38 a	59.04 a	58.95 a	0.09 b	96.19	96.04	0.15	25.57
	SW	4.10 c	3.72 c	3.62 c	0.10 b	90.73	88.29	2.44	1.71
	SNP	13.68 b	12.42 b	12.33 b	0.09 b	90.79	90.13	0.66	5.70
2012	PK	0.76 d	0.76 d	0.46 d	0.20 c	100.00	60.53	26.32	
	NPK	31.49 a	28.91 a	28.13 a	0.22 c	91.81	89.33	0.70	13.12
	SW	4.88 c	4.46 c	4.05 c	0.25 a	91.39	82.99	5.12	2.03
	SNP	12.88 b	11.24 b	10.53 b	0.24 ab	87.27	81.75	1.86	5.37

注(Note): TN—Total nitrogen; TDN—Total dissolved nitrogen. 同一年内,同列数值后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column and year are significantly different at 5% level.

显著($P<0.05$)减少TN淋溶,2年分别较NPK处理减少了47.70 kg/hm^{2}和18.62 kg/hm^2,淋溶率分别降低77.71%和59.13%;SW处理TN淋溶量显著($P<0.05$)低于NPK和SNP处理,2年TN淋溶量分别为4.10 kg/hm^{2}和4.88 kg/hm^2,较NPK处理淋溶率降低93.32%和84.50%。在田间试验的第5年(2012年),NPK、SNP和SW三个处理TN表观淋溶率分别为13.12%、5.37%和2.03%,以NPK处理TN淋溶损失量最高,SW处理最低。以上研究结果表明,在等氮量投入条件下,采用有机肥氮替代50%和100%用量的化肥氮,可以显著降低氮素的淋溶风险($P<0.05$)。

施用氮肥的NPK、SNP和SW处理间可溶性总氮(TDN)淋溶量存在显著性($P<0.05$)差异(表3),淋溶量大小顺序如下:NPK > SNP > SW。不同处理间NO_3^--N淋溶量存在显著($P<0.05$)差异,其中,SNP、SW处理NO_3^--N淋溶量较NPK处理减少62.5%~93.8%。NH_4^+-N淋溶量处理间差异不显著($P<0.05$),但施用有机肥处理相对单施化肥增加了NH_4^+-N的淋溶量。在施氮肥处理中,淋溶水中TDN占TN淋溶比例为87.27%~96.19%,NO_3^--N占TN比例为81.75%~96.04%,NH_4^+-N占TN比例为0.66%~5.12%。以上研究结果表明,氮素淋溶以NO_3^--N形态为主,施用化肥氮显著($P<0.05$)增加了NO_3^--N淋溶,采用有机无机肥料配施,可以显著($P<0.05$)减少NO_3^--N淋溶损失。

磷素淋溶结果表明(表4),各处理TP淋溶量变幅为0.035~0.96 kg/hm^2,其中SW处理TP淋溶量最高,显著($P<0.05$)高于NPK,与SNP处理相比差异不显著($P<0.05$);SNP处理略高于NPK处理,但差异不显著($P<0.05$)。淋溶水中TP以TDP为主,2011年和2012年TDP占TP平均比例分别为51.50%和87.40%。不同处理间磷素表观淋溶率在0.03%~0.16%之间。由此可以看出,在等氮量投入条件下,与施用化肥处理相比,采用有机肥替代50%或100%的化肥氮,提高了磷素淋溶风险。

表4 不同施肥处理下磷素淋溶量

Table 4 Amounts of the leaching P under different fertilization treatments

年份 Year	处理 Treatment	全磷 TP (kg/hm^2)	可溶性总磷 TDP (kg/hm^2)	TDP/TP (%)	表观淋溶率(%) Apparent P leaching ratio
2011	PK	0.040 b	0.020 b	50.00	0.03
	NPK	0.035 b	0.018 b	51.43	0.03
	SW	0.056 a	0.027 a	48.21	0.16
	SNP	0.045 ab	0.024 ab	53.33	0.06
2012	PK	0.081 b	0.072 b	88.89	0.07
	NPK	0.078 b	0.066 b	84.62	0.07
	SW	0.096 a	0.088 a	91.67	0.03
	SNP	0.087 ab	0.074 b	85.06	0.04

注(Note):TP—Total phosphorus; TDP—Total dissolved phosphorus. 同一年内,同列数值后不同字母表示差异达5%显著水平 Values followed by different letters in the same column and year are significantly different at 5% level.

3 讨论

化肥的肥效较快,易被作物吸收利用,而有机肥分解缓慢,具有长效性,但不能满足作物生长前期的养分需求,一定比例的有机无机肥料配施,可以满足作物生长并获得较高的产量[31]。本研究中,试验初期(2008年)单施化肥处理(NPK)产量显著($P<0.05$)高于单施有机肥(SW)、有机无机肥料配施(SNP)处理;2009~2011年三个处理间玉米产量无显著差异,但均以SNP处理玉米产量最高;2012年SNP处理玉米产量显著高于NPK处理($P<0.05$),与上述有机肥和化肥的肥效特征对作物产量影响结果类似。单施有机肥处理5年玉米产量一直处于增产状态,同样表明有机肥肥效的缓效性[31],但作物产量略低于有机无机肥料配施处理。在2008年,采用猪粪氮替代50%的化肥

氮,当年玉米产量小于等氮量投入的化肥处理,表明在有机肥氮替代化肥氮比例上需要进一步研究。其他研究也表明,有机无机肥料配施可协调养分平衡供应,满足作物生育期对养分的需求,提高作物产量,同时可减少化肥用量[24,32],提高养分利用率[33-34]。

施肥和降雨均是影响农田土壤氮素淋溶的重要原因[28]。化肥虽然肥效较快,但养分易随淋溶进入地下水,特别是在出现连续降雨或雨量较大的时期,2011 年 NO_3^--N 平均浓度为 79.3 mg/L,约为 2012 年 NO_3^--N 的 2.1 倍,分析其原因,在 2011 年 6 月 30 日玉米大喇叭口期进行了追肥,而在追肥前后 15 日内累积降雨量达 90 mm,并且出现单次降雨量超过 60 mm 的时期,造成了化肥氮损失,而 2012 年追肥时期前后 15 日内降雨量为 43 mm,期间最大降雨量为 16 mm,降雨有可能是造成 2011 年 NO_3^--N 浓度和淋溶量显著高于 2012 年的主要因素。因此,在华北地区,应注意肥料的施用时期,尤其应避开暴雨时期。肥料类型是影响氮素淋溶的重要因素之一[35],在本研究中,总氮投入量相同条件下,单施化肥显著增加了氮素淋溶量,而有机无机肥料配施则显著低于等氮量条件下的化肥处理,表观淋溶率降低 7.75 ~ 19.87 个百分点,土壤氮素淋溶损失以 NO_3^--N 为主,占淋溶水中 TN 的中 80% 以上,这与已有研究结果一致[24,27-28,31]。施用有机肥降低土壤氮淋溶主要是由于有机肥矿化分解过程中微生物消耗了土壤部分氮素,使得矿质氮被固持,土壤中硝态氮累积量降低[36-37]。

土壤有很强的磷固定能力,而磷肥主要施用在耕层,含磷量很低的下层土壤是一个吸持磷素的巨大的容量库,所以一般认为磷沿土壤剖面垂直向下淋溶的可能性不大或淋溶并不重要[38-40]。但土壤磷素大量累积,在降雨或灌溉量较大时,极易产生淋溶[41]。本研究中表明,单施有机肥处理,年平均带入总磷量为 542.6 kg/hm^2,导致土壤中磷的大量累积,2012 年玉米收获后 SW 处理土壤 Olsen-P 含量达 130 mg/kg,淋溶液中单施有机肥处理(SW)淋溶水 TP 浓度显著($P<0.05$)高于化肥磷施用处理(NPK、PK),并且高于水体富营养化 TP 浓度(0.02 mg/L)的临界值[42]。因此,在考虑有机无机肥料配施过程,如果仅从作物需氮量角度考虑有机肥和化肥配比,很可能造成土壤中磷的大量累积,引起磷淋溶的环境风险,因此,在农业生产过程中,应根据作物需磷量合理控制有机肥磷的带入量。

4　结论

本研究中,采用猪粪氮替代 50% 化肥氮素的有机无机肥料配施处理,5 年玉米平均产量较单施化肥处理(NPK)增加 0.45 t/hm^2,增幅达 10.3%,而在降低氮素淋溶方面,基本可以保证淋溶水中 NO_3^--N 浓度低于地下水Ⅲ类水质量标准(GB/T 14848-9)。在氮磷养分淋溶损失中,NO_3^--N 占淋溶水 TN 的 80% 以上,TDP 占淋溶水 TP 的 70% 左右。在等氮量条件下,有机肥的施用,给农田带入了大量磷素,土壤磷含量显著累积,相对于 NPK 处理增加了磷素淋溶风险。因此,为减少氮、磷养分淋溶损失,在有机肥替代部分化肥施用过程中,应同时考虑有机肥磷带入量。

参 考 文 献:

[1] 吕殿青, 同延安, 孙本华. 氮肥施用对环境污染影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 8-15.
Lü D Q, Tong Y A, Sun B H. Study on effect of nitrogen fertilizer use on environment pollution[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(1): 8-15.

[2] 杨学云, 张树兰, 袁新民, 等. 长期施肥对土硝态氮分布、累积和移动的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(2): 134-138,188.
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, 188.

[3] Rodriguez M A, Continuo J, Martins F. Efficacy and limitations of triticale as a nitrogen catch crop in a Mediterranean environment[J]. European Journal of Agronomy, 2002, 17: 155-160.

[4] Hansen E M, Djurhuus J. Nitrate leaching as influenced by soil tillage and catch crop[J]. Soil & Tillage Research, 1997, 41: 203-219.

[5] 胡国臣, 张清敏, 王忠, 等. 地下水硝酸盐氮污染防治研究[J]. 农业环境保护, 1999, 18(5): 228-230.
Hu G C, Zhang Q M, Wang Z *et al*. Research on pollution control of nitrate in underground water[J]. Agro-environmental Protection, 1999, 18(5): 228-230.

[6] 张凤华, 刘建玲, 廖文华. 农田磷的环境风险及评价研究进展[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(4): 797-805.
Zhang F H, Liu J L, Liao W H. Environmental risk and assessment of agricultural phosphorus: A review[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(4): 797-805.

[7] 刘宏斌, 李志宏, 张云贵, 等. 北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(3):

405-413.
Liu H B, Li Z H, Zhang Y G *et al*. Nitrate contamination of groundwater and its affecting factors in rural areas of Beijing Plain [J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(3): 405-413.

[8] 刘宏斌，雷宝坤，张云贵，等. 北京市顺义区地下水硝态氮污染的现状与评价[J]. 植物营养与肥料学报 2001,7(4): 385-390.
Liu H B, Lei B K, Zhang Y G *et al*. Investigation and evaluation on nitrate pollution in groundwater of Shunyi District[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2001, 7(4): 385-390.

[9] 刘宏斌，张云贵，李志宏，等. 北京市平原农区深层地下水硝态氮污染状况研究[J]. 土壤学报，2005，42(3)：411-417.
Liu H B, Zhang Y G, Li Z H *et al*. Nitrate contamination of deep groundwater in rural plain areas of Beijing [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(3): 411-417.

[10] 刘宏斌. 施肥对北京市农田土壤硝态氮积累与地下水污染的影响[D]. 北京：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]. Beijing: PhD dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2002.

[11] 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 Agricultura Sinica, 2004, 37(5): 692-698.

[12] Sharpley A, Doug Beegle, Carl Bolster *et al*. Phosphorus indices: Why we need to take stock of how we are doing[J]. Journal of Environmental Quality, 2012, 41: 1711-1719.

[13] 吕福堂，张秀省，董洁，等. 日光温室土壤磷素累积淋移和形态组成变化研究[J]. 西北农业学报，2010，19(2)：203-206.
Lü F T, Zhang X S, Dong J *et al*. Study on the phosphorus accumulation, leaching and forms varying in greenhouse soil [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2010, 19(2): 203-206.

[14] 张经纬，曹文超，严正娟，等. 种植年限对设施菜田土壤剖面磷素累积特征的影响[J]. 农业环境科学学报，2012，31(5)：977-983.
Zhang J W, Cao W C, Yan Z J *et al*. Effects of cropping years on the characteristics of phosphorus accumulation in soil profiles under greenhouse vegetable production [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(5): 977-983.

[15] 李书田，金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. 中国农业科学，2011，44(20)：4207-4229.
Li S T, Jin J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(20): 4207-4229.

[16] 李红莉，张卫峰，张福锁，等. 中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析[J]. 植物营养与肥料学报，2010,16(5)：1136-1143.
Li H L, Zhang W F, Zhang F S *et al*. Chemical fertilizer use and efficiency change of main grain crops in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(5): 1136-1143.

[17] Sharpley A N. Rainfall frequency and nitrogen and phosphorus runoff from soil amended with poultry litter [J]. Journal of Environmental Quality, 1997, 26(4): 1127-1132.

[18] Schroeder P D, Radcliffe D E, Cabrera M L. Rainfall timing and poultry litter application rate effects on phosphorus loss in surface runoff[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33(6): 2201-2209.

[19] 商放泽，杨培岭，李云开，等. 不同施氮水平对深层包气带土壤氮素淋溶累积的影响[J]. 农业工程学报，2012，28(7)：103-110.
Shang F Z, Yang P L, Li Y K *et al*. Effects of different inorganic nitrogenous fertilizer application rates on soil nitrogen leaching and accumulation in deep vadose zone [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(7): 103-110.

[20] 孙向平，李国学，孟凡乔，等. 新疆伊犁垦区有机水稻生产养分平衡及氮素污染风险分析[J]. 农业工程学报，2011，27(增刊2)：158-162.
Sun X P, Li G X, Meng F Q *et al*. Nutrients balance and nitrogen pollution risk analysis for organic rice production in Yili reclamation area of Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(Supp. 2): 158-162.

[21] 张维理，武淑霞，冀宏杰，等. 中国农业面源污染估计及控制对策Ⅰ. 21世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学，2004，37(7)：1008-1017.
Zhang W L, Wu S X, Ji H J *et al*. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(7): 1008-1017.

[22] 高懋芳，邱建军，李长生，等. 应用 Manure-DNDC 模型模拟畜禽养殖氮素污染[J]. 农业工程学报，2012，28(9)：183-189.
Gao M F, Qiu J J, Li C S *et al*. Modelling nitrogen pollution from livestock breeding using Manure-DNDC model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(9): 183-189.

[23] 宁建凤，邹献中，杨少海，等. 有机无机氮肥配施对土壤氮淋失及油麦菜生长的影响[J]. 农业工程学报，2007，23(11)：95-100.
Ning J F, Zou X Z, Yang S H *et al*. Effects of combined application of organic and inorganic nitrogen fertilizer on the soil nitrogn leaching and the growth of leaf-used lettuce [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(11): 95-100.

[24] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报，2008，45(5)：778-783.
Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 778-783.

[25] 曹志洪，朱永官，廖海秋，等. 苏南稻麦两熟制下土壤养分平衡与培肥的长期试验[J]. 土壤，1995，27(2)：60-63.

Cao Z H, Zhu Y G, Liao H Q *et al*. Study of soil nutrient balance and fertilization under long-term experiments in wheat-rice double cropping system of South Jiangsu[J]. Soils, 1995, 27(2): 60-63.

[26] Song C, Han X Z, Tang C. Changes in phosphorus fractions sorption and release in Udic Mollisols under different ecosystems [J]. Biology and Fertility of Soils, 2007, 44(1): 37-47.

[27] 廖义善，卓慕宁，李定强，等. 适当化肥配施有机肥减少稻田氮磷损失及提高产量[J]. 农业工程学报，2013，29(增刊1)：210-217.
Liao Y S, Zhuo M N, Li D Q *et al*. Formulated fertilization for reducing nitrogen and phosphorus losses from paddy fields and increasing rice yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(Supp.1): 210-217.

[28] 汪涛，朱波，况福虹，等. 有机-无机肥配施对紫色土坡耕地氮素淋失的影响[J]. 环境科学学报，2010，30(4)：781-788.
Wang T, Zhu B, Kuang F H *et al*. Effects of a combination of organic and inorganic fertilization on nitrogen leaching from purple soil with sloping cropland[J]. Acta Scientiae Circum stantiae, 2010, 30(4): 781-788.

[29] 庄远红，吴一群，李延. 有机无机磷肥配施对蔬菜地土壤磷素淋失的影响[J]. 土壤，2007，39(6)：905-909.
Zhuang Y H, Wu Y Q, Li Y. Effect of combined application of organic and inorganic fertilizers on phosphorus leaching in vegetable soils[J]. Soils, 2007, 39 (6): 905-909.

[30] 鲁如坤. 土壤和农业化学分析法[M]. 北京：中国农业科技出版社,2000.
Lu R K. The analytic method of soil and agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[31] 郝小雨，高伟，王玉军，等. 有机无机肥料配合施用对设施番茄产量、品质及土壤硝态氮淋失的影响[J]. 农业环境科学学报，2012，31(3)：538-547.
Hao X Y, Gao W, Wang Y J *et al*. Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on yield and quality of tomato and soil nitrate leaching loss under greenhouse condition [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(3): 538-547.

[32] 黄东风，王果，李卫华，等. 不同施肥模式对蔬菜生长、氮肥利用及菜地氮流失的影响[J]. 应用生态学报，2009，20(3)：631-638.
Huang D F, Wang G, Li W H *et al*. Effects of different fertilization modes on vegetable growth, fertilizer nitrogen utilization, and nitrogen loss from vegetable field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(3): 631-638.

[33] 吴成龙，沈其荣，夏昭远，等. 麦-稻轮作系统有机无机肥料配施协同氮素转化的机制研究Ⅰ. 小麦季^{15}N 去向分析[J]. 土壤学报，2010，47(5)：905-912.
Wu C L, Shen Q R, Xia Z Y *et al*. Mechanisms for the increased utilization of fertilizer N under integrated use of inorganic and organic fertilizers in a winter wheat-rice rotation system Ⅰ. Fate of fertilizer^{15}N during winter wheat growing stages[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(5): 905-912.

[34] 张玉平，荣湘民，刘强，等. 有机无机肥配施对旱地作物养分利用率及氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报，2013，27(3)：44-49.
Zhang Y P, Rong X M, Liu Q *et al*. Effects of combination of organic and inorganic fertilizer on crop nutrient utilization rate, nitrogen and phosphorus loss in dry land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(3): 44-49.

[35] 丁维军，陶林海，吴林，等. 新型缓释尿素对削减温室气体、NH_3 排放和淋溶作用的研究[J]. 环境科学学报，2013，33(10)：2840-2847.
Ding W J, Tao L H, Wu L *et al*. Effects of controlled release urea on greenhouse gases, NH_3 emissions and eluviation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(10): 2840-2847.

[36] 杨宪龙，路永莉，同延安，等. 施氮和秸秆还田对小麦-玉米轮作农田硝态氮淋溶的影响[J]. 土壤学报，2013，50(3)：564-573.
Yang X L, Lu Y L, Tong Y A *et al*. Effects of application of nitrogen fertilizer and incorporation of straw on nitrate leaching in farmland under wheat-maize rotation system [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(3): 564-573.

[37] 刘杏认，任建强，刘建玲. 不同氮水平下有机碳氮比对土壤硝态氮残留量的影响[J]. 干旱地区农业研究，2006，24(4)：31-32.
Liu X R, Ren J Q, Liu J L. Effect of the manure with different C/N under different doses of N fertilizer on the content of soil NO_3^--N[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(4): 31-32.

[38] Sims J T, Simard R R, Joern B C. Phosphorus loss in agricultural drainage: Historical perspective and current research[J]. Journal of Environmental Quality, 1998, 27: 277-293.

[39] deJager P C, Claassens A S. Long-term phosphorus desorption kinetics of an acid sand clay soil from Mpumalanga, South Africa[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2005, 36: 309-319.

[40] 章明奎，王丽平. 旱耕地土壤磷垂直迁移机理的研究[J]. 农业环境科学学报，2007，26(1)：282-285.
Zhang M K, Wang L P. Study on mechanisms of phosphorus downward transfer in arable soils [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(1): 282-285.

[41] 项大力，杨学云，孙本华，等. 灌溉水平对土磷素淋失的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2010,16(1)：112-117.
Xiang D L, Yang X Y, Sun B H *et al*. Impacts of irrigation regimes on phosphorus leaching in manural loessial soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(1): 112-117.

[42] 司友斌，王慎强，陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. 土壤，2000，4：188-193.
Si Y B, Wang S Q, Chen H M. The losing nitrogen, phosphorus from farmland and water eutrophication[J]. Soils, 2000, 4: 188-193.