

中国农田氮淋失相关因素分析及总氮淋失量估算^①

胡玉婷^{1,2}, 廖千家骅^{1,2}, 王书伟¹, 颜晓元^{1*}

(1 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; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 通过对我国近 10 年 382 组农田 N 素淋失数据进行统计分析, 发现水田的 NO_3^- -N 淋失量与土壤体积质量、有机质、全 N (TN)、黏粒含量百分比显著负相关, 与施 N 量、灌水量显著正相关; 旱地中 NO_3^- -N 淋失量与全 P (TP)、粉粒含量百分比、土层深度显著负相关, 与土壤中 TN 含量、砂粒百分比含量、施 N 量、降雨量、灌溉水量显著正相关。水田中总 N 表观淋失率平均值为 2.19%, 95% 的置信区间为 1.56% ~ 2.82%; 旱地中总 N 表观淋失率平均值为 4.35%, 95% 的置信区间 2.88% ~ 5.82%。根据 2008 年中国统计年鉴计算出 2007 年我国总 N 淋失量达到 0.644 Tg, 约占我国总施 N 量的 2.80%。

关键词: 总氮淋失; 硝态氮淋失; 水田; 旱地

中图分类号: S143

氮(N)素是重要的营养元素, 是人类提高粮食产量的巨大动力, 同时 N 素也是一种十分活跃的变价元素。施入土壤中的有机 N 肥和无机 N 肥通过一系列的化学变化和物理过程, 转化成可被作物吸收利用的铵根、硝酸根离子, 部分 N 素残留在土壤中, 大部分 N 素通过氨挥发、硝化和反硝化、淋洗、径流损失的形式进入大气和水体, 影响区域甚至全球的大气和水体环境。我国是世界上化学 N 肥用量最多的国家, 施 N 量从 1985 年的 1 204.9 万 t 到 2007 年的 2 297.2 万 t^[1], 但是 N 肥的利用率仅为 30%~41%^[2], 远远低于发达国家 N 肥利用率 (发达国家 N 肥利用率达到 50%~60%, 欧盟国家的 N 肥利用率高达 70%~80%)^[3], 其中 N 素淋失不但是造成 N 肥损失的一个重要途径, 降低了 N 肥利用率, 而且给水体环境带来严重影响。

硝酸盐淋失是 N 素淋失的主要形式, 国外从 20 世纪 80 年代就开始了农田土壤硝酸盐淋失的量化研究, 国内从 20 世纪 90 年代中期才开始土壤 N 素运移的研究^[4]。邢光熹等^[5]认为我国农田 N 淋失方面的研究很少, 数据不足, 对 N 的迁移很难做出可靠的评估, N 素淋失研究是我国 N 素循环研究中的薄弱环节^[6]。目前我国 N 淋失试验多采用田间微区试验、土柱试验的方法, 而对 N 素淋失试验中的淋失值、影响因

素进行综合数理统计分析的文章尚未见报道。因此对我国 N 素淋失的影响因素与 N 素淋失的淋失量、淋失率之间进行相关分析, 得到主要影响因素, 并对农田中总 N 淋失量和 NO_3^- -N 淋失量进行评估, 从统计学角度为我国的 N 素循环估算提供一个较为合理的参考。

1 数据收集与整理

本文通过对维普期刊网和中国期刊网的文献搜索, 共获得可利用的关于 N 素淋失的文献 54 篇。对来自这些文献资料的 382 组 N 素淋失试验的数据进行分析, 所获得的文献资料年限从 1991 年至 2009 年, N 素淋失试验地点包括北京市、福建、甘肃、河北、河南、湖南、吉林、江苏、江西、山东、陕西、上海、浙江、重庆市。

试验中种植作物包括水稻、小麦、玉米、油菜等。稻季由于经常灌水, 稻田土壤约有 3/4 的时间处于不同程度淹水或水分过饱和状态, 会对土壤的氧化还原性质及 N 的转化和损失产生影响。在淹水土壤中 N 的主要转化是氨化作用、反硝化作用和生物固 N 作用, 无机 N 几乎全以 NH_4^+ -N 形式存在^[7]。旱地土壤中大多是 NO_3^- -N, 存在明显的差异, 因此可以将农田分为水田和旱地两个部分分析。

^①基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.40721140018) 资助。

* 通讯作者 (yanxy@issas.ac.cn)

作者简介: 胡玉婷 (1984—), 女, 安徽淮南人, 硕士研究生, 主要从事农田氮循环方面的研究。E-mail: 123yuting@163.com

由于土壤带负电荷,所以施入农田的 N 肥转化成 NH_4^+ 和 NO_3^- 后,根据同种电荷相斥、异种电荷相吸的原理, NH_4^+ 易被土壤吸附, NO_3^- 则是 N 素淋失的主要形式。农田中发生 N 素淋失必须满足两个基本条件:①土壤中有大量残留硝酸盐;②存在水分运动,使 NO_3^- -N 能随水下流^[8]。促进或阻碍这两个条件之一的任何因素都影响 N 素淋洗的发生与否及其程度。

相关试验研究表明影响 N 素淋失的因素很多,包括灌溉和降水量^[9-11]、N 肥施用量^[12-14]、土壤基本性质^[15]、作物种类^[16]、耕作方式^[17]等。为了最大限度地挖掘影响 N 素淋失的影响因素,本文收集了每个试验中测得的土壤 pH、体积质量 (g/cm^3)、有机质 (%)、TN (%)、TP (%)、TK (%)、土壤砂粒百分比、粉粒百分比、黏粒百分比、每季作物施 N 量 (kg/hm^2)、降雨量 (mm)、灌溉水量 (mm) 和土层深度 (cm)。由于受每篇文献中试验的条件、目的、方法的限制,收集的影响 N 素淋失的因素有很多缺失值,如土壤基本性质和每季作物生长期内的降雨量、灌溉水量等。即使通过中国科学院南京土壤研究所中国土壤数据库^[18]对土壤基本性质进行部分补充,并假定同一地区试验的土壤性质和降雨量数据相同,数据仍有部分缺失。

目前,测定农田 N 淋洗损失量采用的方法有:①渗漏计法;②用安装在不同土层的多孔管收集土壤溶液;③通过地下排水瓦管监测流速和 NO_3^- -N 浓度;④监测流域内的 NO_3^- -N 浓度和溪流速率;⑤采集地下水样^[19]。这些方法基于 N 素渗滤液浓度和体积数量的测定,两者的乘积就是 N 素淋失总量。另外还有利用土壤 N 素质量平衡法计算 N 素淋失量,这种方法要求其他的 N 素去向值必须精确,在试验中较少采用这种算法。

本文收集的 N 淋失值包括每季作物的总 N 和 NO_3^- -N 淋失量 (kg/hm^2)、淋失率 (%) 和表观淋失率 (%)。其中,总 N 主要包括 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和有机 N,有的研究中则仅是 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 之和。一般认为,N 素被土壤水淋滤至根系活动层之下的数量称之为淋失量^[20],总 N 的淋失率 = 每季总 N 的淋失量/每季作物施 N 量 $\times 100\%$,总 N 的表观淋失率 = (每季总 N 的淋失量 - 对照的总 N 淋失量) / 每季作物施 N 量 $\times 100\%$; NO_3^- -N 的淋失率 = 每季

NO_3^- -N 的淋失量/每季作物施 N 量 $\times 100\%$, NO_3^- -N 的表观淋失率 = (每季 NO_3^- -N 的淋失量 - 对照的 NO_3^- -N 淋失量) / 每季作物施 N 量 $\times 100\%$ 。缺失的数据可以通过换算公式进行部分补充: NO_3^- -N 淋失量 (kg/hm^2) = NO_3^- -N 浓度 (mg/L) $\times$ 渗漏水量 (mm) / 100。即使如此,部分文献仍然存在缺失值。

农田 N 素输入包括肥料 N、生物固 N、种子带入 N 和前茬秸秆还田返还土壤中的 N、大气沉降所带入的 N、灌溉水引入的 N 等,其中肥料 N 来自包括化肥和有机肥混施带入的 N 量。就目前收集数据显示,试验过程中约有 75% 的作物都施用了尿素,可见尿素在我国农业生产中占有相当重要的比重;有机肥一般只作为基肥施用,且在农田生态系统中施用面积很少,分析中未考虑不同 N 肥来源对 N 素淋失造成的影响,且施 N 量单指肥料 N。部分非典型数据在分析过程中予以剔除。如李晓欣等^[21-22]在中科院栾城生态试验站试验的结果,整个小麦生长季施肥量为 N 400 kg/hm^2 时通过 180 cm 深度界面完全进入下层土壤的下渗水量为 21 mm, NO_3^- -N 淋失量为 110 kg/hm^2 ,计算得到 NO_3^- -N 淋失浓度平均值为 523.8 mg/L , NO_3^- -N 淋失浓度很高,远远超过国家饮用水卫生标准 (NO_3^- -N 浓度 $\leq 20 \text{ mg}/\text{L}$),主要是由于冬小麦生长初期大水量灌溉造成。在节水灌溉中,喷灌没有明显的 NO_3^- -N 淋失,甚至淋失量出现负值^[23]。大棚种植蔬菜,每季施 N 量可高达 1 000 kg/hm^2 ^[24],土壤水和地下水的 NO_3^- -N 年平均浓度可超过 169 mg/L ^[25],蔬菜和果园施肥量大,管理更加复杂,因此本文不包括蔬菜大棚和果园中 N 肥的淋失。利用 Excel 2003 和 SPSS13.0 统计软件对所得数据进行分析,由于样本量较少,进行相关分析时采用检验功效较低的 Spearman 秩相关系数表示。水田和旱地中 NO_3^- -N 与总 N 淋失量、淋失率、表观淋失率之间的数据分布用箱线图表示,并且进行描述性统计,由于缺失数据较多,采用仅当要分析的变量值缺失时才剔除该数据的方法。

2 相关因素分析及讨论

水田和旱地中 N 素淋失与土壤 pH、体积质量、有机质、TN、TP、TK、砂粒、粉粒、黏粒、施 N 量、降水量、灌溉水量、土层深度等影响因素之间的相关性见表 1。

表 1 水田、旱地中 NO_3^- -N 淋失量、淋失率、表观淋失率与主要影响因素之间的相关关系

Table 1 Correlations between nitrogen leaching and influencing factors in paddy field and upland field

项目			pH	体积质量	有机质	TN	TP	TK	砂粒	粉粒	黏粒	施 N 量	降水量	灌水量	土层深度
水田	NO_3^- -N 淋	相关系数	0.198	-0.408*	-0.367**	-0.506**	0.046	-0.569	0.222	0.035	-0.329*	0.339**	-0.122	0.912**	-0.219
	失量	样本量	78	33	78	78	52	10	40	44	50	78	34	12	51
	NO_3^- -N 淋	相关系数	0.070	-0.470*	-0.436**	-0.591**	-0.231	-0.426	0.413*	-0.082	-0.109	-0.234	-0.025	0.638	-0.160
	失率	样本量	64	26	64	64	44	10	33	37	40	64	27	8	43
	NO_3^- -N 表	相关系数	0.585**	-0.496*	-0.529**	-0.402*	-0.258	-	0.504*	-0.504*	0.504*	-0.017	0.391	-0.103	0.024
	观淋失率	样本量	34	17	34	34	25	5	21	21	21	34	14	5	24
	总 N 淋	相关系数	0.175	-0.013	0.419**	0.114	0.316**	0.775**	-0.673**	0.150	0.214*	0.469**	0.272*	0.759**	-0.043
	失量	样本量	107	39	107	107	95	49	76	89	95	108	66	37	57
	总 N 淋	相关系数	0.115	-0.012	0.376**	0.059	0.185	0.787**	-0.646**	0.074	0.208	0.170	0.167	0.735**	-0.031
	失率	样本量	86	27	86	86	77	41	61	72	75	87	51	29	47
	总 N 表观	相关系数	0.368*	0.226	-0.059	0.024	-0.680**	-	0.758**	-0.841**	0.712**	0.157	-0.265	0.051	-0.091
	淋失率	样本量	33	24	33	33	32	8	23	29	29	33	17	5	25
旱地	NO_3^- -N 淋	相关系数	-0.134	0.005	0.128	0.259**	-0.277**	-0.125	0.300**	-0.108	-0.219**	0.340**	0.219**	0.196*	-0.225**
	失量	样本量	194	149	196	169	166	128	80	90	183	199	161	126	190
	NO_3^- -N 淋	相关系数	-0.193*	0.037	0.123	0.294**	-0.337**	-0.176	0.266*	-0.064	-0.233**	0.085	0.226**	0.247**	-0.327**
	失率	样本量	172	135	174	153	150	120	66	76	163	177	147	114	169
	NO_3^- -N 表	相关系数	-0.580**	0.045	0.033	0.053	-0.663**	0.498*	-0.482**	-0.201	0.175	0.185	0.351*	-0.332	-0.425**
	观淋失率	样本量	52	27	52	40	40	20	32	32	44	52	36	16	47
	总 N 淋	相关系数	-0.477**	-0.484	-0.484**	-0.433**	-0.271	-0.249	-	-0.572**	-0.160	0.448**	0.753**	-	-0.086
	失量	样本量	63	14	48	51	32	16	5	21	48	63	43	5	55
	总 N 淋	相关系数	-0.664**	-0.534	-0.606**	-0.521**	-0.465*	-0.633*	-	-0.481	0.075	-0.248	0.755**	-	-0.265
	失率	样本量	52	12	40	43	27	14	4	17	40	52	36	4	47
	总 N 表观	相关系数	-0.284	-	-0.284	-0.284	0.284	-	-	-0.284	-0.284	-0.177	0.246	-	-0.707
	淋失率	样本量	10	4	10	10	10	4	4	10	10	10	9	4	5

注：* 表示显著相关 ($p < 0.05$)，** 表示极显著相关 ($p < 0.01$)。

水田中 NO_3^- -N 和总 N 的淋失量、淋失率、表观淋失率与淋失土层深度没有显著相关性，因为在试验过程中收集渗漏水量的土层深度在 80 cm 左右。 NO_3^- -N 淋失量与土壤体积质量、有机质、TN、黏粒含量显著负相关，与施 N 量、灌水量显著正相关。因为在淹水状态下的厌氧环境抑制了自养硝化细菌的活性，土壤硝化作用很弱^[26]。施 N 量和灌水量为 N 素运移提供了充分条件。 NO_3^- -N 淋失量与降雨量无显著相关性，可能是因为水田往往灌溉充分，降雨量不是影响 NO_3^- -N 浓度与淋洗水量的主要因素。土壤 pH、TP、TK、砂粒、粉粒百分比与 NO_3^- -N 淋失量无显著相关性，而 NO_3^- -N 淋失率和表观淋失率与砂粒百分比显著相关， NO_3^- -N 和总 N 的表观淋失率与土壤的 pH 显著正相关，水田土壤 pH 偏酸性和中性，取值范围在 4.77~7.8 之间。总 N 淋失量与有机质、TP、TK、黏粒、施 N 量、降雨量、灌溉水量显著正相关，与砂粒含量显著负相关。

旱地中 NO_3^- -N 的淋失量随着土层深度的增加而逐渐减少，随水分下移的 NO_3^- -N 量减少。土壤基本性质、人为管理方式对 NO_3^- -N 淋失量大小起着举足轻重的作用。 NO_3^- -N 淋失量与土壤中 TN 含量、砂粒百分比、施 N 量、降雨量、灌溉水量显著正相关，与 TP、粉粒百分比、土层深度显著负相关。因为土壤 NO_3^- -N 供出量与土壤有机质含量表现出很好的相关性，土壤有机质含量的增加促进了化肥 N 素的硝化^[27]。土壤 TP 含量增加能减少 N 素的淋失，可能与作物生长较好对 N 素的利用率提高有关。 NO_3^- -N 淋失率与各影响因素间的关系与 NO_3^- -N 淋失量与各因素之间的关系相近，土壤含 N 量越多淋失率越高，砂粒含量多淋失率高，黏粒含量多淋失率低，施 N 量、降水量和灌溉水量对 N 素淋失具有显著的相关性。

无论水田还是旱地，N 素淋失是一个复杂的综合过程，仅仅用这些简单的影响因素进行相关分析，很多现象难以解释。但是所得结果可以为更好地研究 N

素淋失提供较好的研究思路。影响 N 素淋失的因素除了以上几种外,还有耕作制度、施肥方式、施肥时间、灌溉时间等。这些影响因素基于试验条件的限制,难以从整体上进行分析讨论。水田中施 N 量和灌溉水量对 NO_3^- -N 和总 N 淋失量显著相关,进行线性回归分析,结果如图 1、图 2。旱地中 NO_3^- -N 和总 N 淋失量与施 N 量和降雨量显著正相关,线性回归分析结果如图 3、图 4。 NO_3^- -N 淋失量与灌溉水量之间的关系如图 5。有相关研究表明灌水能明显影响土壤 NO_3^- -N 累积量,高灌水条件下土壤 NO_3^- -N 累积量变化比低灌水量时大, NO_3^- -N 大量累积是 N 素淋失必要条件之一,随着灌水量的增加,淋失量也逐渐增加^[28]。喷灌与地面灌溉相比,没有明显的水分渗漏发生, NO_3^- -N 最大累积淋失量只有地面灌溉条件下的 3%^[23]。不同灌溉方式下,节水灌溉下稻田渗漏液

NH_4^+ -N 及 NO_3^- -N 浓度较淹水灌溉高,但总渗漏量显著减少, N 的总淋失量较淹水灌溉条件少,节水灌溉下水稻对 N 素的吸收利用率高于淹水灌溉,且有利于 N 素养分向稻谷转移^[29]。另外,有文献表明,秸秆还田配施 N 肥可使 NO_3^- -N 淋失加剧,低 N 处理的 N 素淋失率也极显著高于相应高 N 处理^[30]。施 N 肥、过量施用有机肥、过量施用 N 肥时土壤 NO_3^- -N 淋失风险均很强,其次为 N、P 或 N、P、K 配施处理,而适量有机肥与 N、P (K) 配合施用土壤 NO_3^- -N 淋失风险很弱, N、P、K 肥与有机肥配合施用是提高作物产量、控制农田 NO_3^- -N 淋失的重要途径^[31]。N 素淋失不是单一的物理过程,各种影响因素互相作用,施肥和水分管理相结合,有助于减少 N 素淋失量,减少对地下水的污染,提高 N 肥利用率。

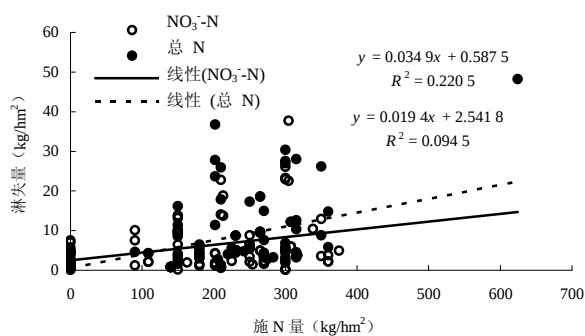


图 1 水田 NO_3^- -N 淋失量、总 N 淋失量与施 N 量之间的线性关系

Fig. 1 Linear relationships between nitrate leaching, total nitrogen leaching and nitrogen application rate in paddy field

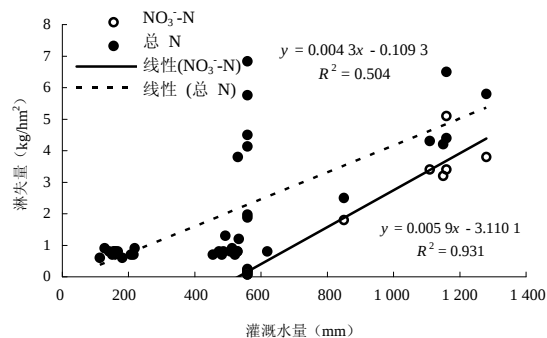


图 2 水田 NO_3^- -N 淋失量、总 N 淋失量与灌溉水量之间的线性关系

Fig. 2 Linear relationships between nitrate leaching, total nitrogen leaching and irrigation in paddy field

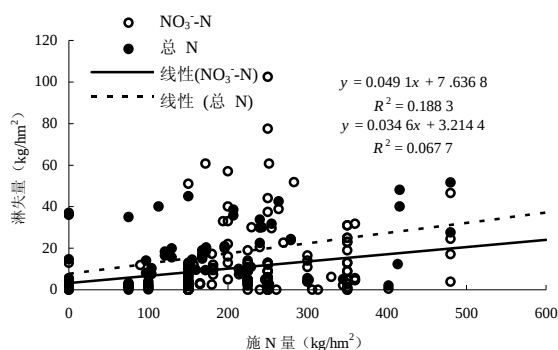


图 3 旱地 NO_3^- -N 淋失量、总 N 淋失量与施 N 量之间的线性关系

Fig. 3 Linear relationships between nitrate leaching, total nitrogen leaching and nitrogen application rate in upland field

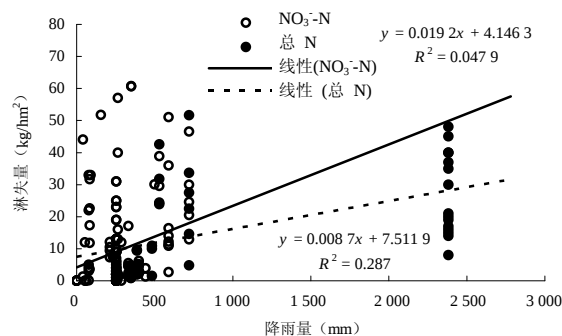


图 4 旱地 NO_3^- -N 淋失量、总 N 淋失量与降雨量之间的线性关系

Fig. 4 Relationships between nitrate leaching, total nitrogen leaching and rainfall in upland field

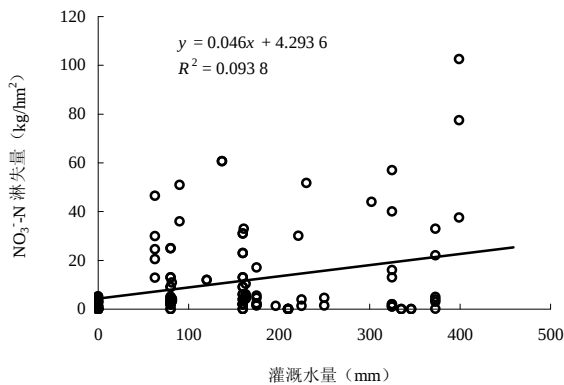
图5 旱地 NO_3^- -N 淋失量与灌溉水量之间的线性关系

Fig. 5 Relationships between nitrate leaching and irrigation in upland field

3 全国氮素淋失量估算

我国土壤类型多样, 降雨分布不均, 各个地区管理和种植形式也存在较大差异, 水田和旱地中 NO_3^- -N 和总 N 的淋失量、淋失率和表观淋失率的分布结果见图 6、图 7, 描述性统计结果如表 2。水田中 NO_3^- -N 平均淋失量为 6.26 kg/hm^2 , 95% 的置信区间为 $4.64 \sim 7.81 \text{ kg/hm}^2$, 总 N 平均表观淋失率为 2.19% (95% 的置信区间为 1.56% ~ 2.82%)。旱地中 NO_3^- -N 平均淋失量为 10.02 kg/hm^2 (95% 的置信区间为 $7.97 \sim 12.08 \text{ kg/hm}^2$), 总 N 平均表观淋失率为 4.35% (95% 的置信区间为 2.88% ~ 5.82%)。朱兆良^[32]估算全国化肥 N 的淋失量可能相当于化肥 N 消费量的 2% 左右 (未包括土壤 N 和有机肥料 N 的淋失量), 本文统计得出的水田和旱地中总 N 的表观淋失率与此略有差异。

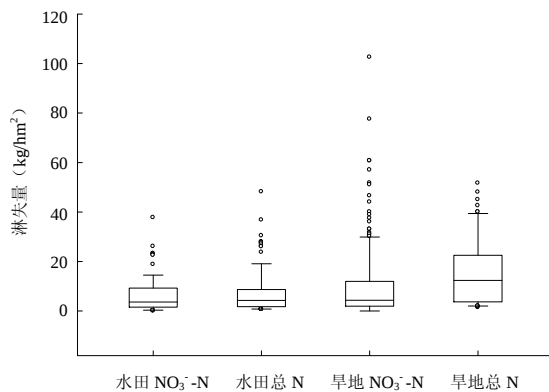
图 6 水田和旱地中 NO_3^- -N 与总 N 淋失量箱式图

Fig. 6 Box plot of amount of nitrate leaching and total nitrogen leaching in paddy field and upland field

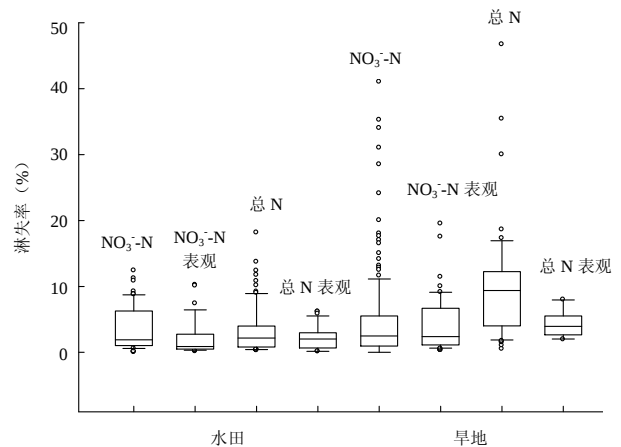
图 7 水田和旱地中 NO_3^- -N 和总 N 淋失率、表观淋失率箱式图

Fig. 7 Box plot of leaching rate and apparent leaching rate of nitrate and total nitrogen in paddy field and upland field

表 2 水田和旱地土壤中 N 素淋失描述性统计结果

Table 2 Descriptive statistics of nitrogen losses via leaching in paddy field and upland field

项目		95% 置信区间	
		下限	上限
水田	NO ₃ ⁻ -N 淋失量 (kg/hm ²)	4.64	7.87
	NO ₃ ⁻ -N 淋失率 (%)	2.54	4.15
	NO ₃ ⁻ -N 表观淋失率 (%)	1.10	2.96
	总 N 淋失量 (kg/hm ²)	5.62	8.96
	总 N 淋失率 (%)	2.63	4.15
	总 N 表观淋失率 (%)	1.56	2.82
旱地	NO ₃ ⁻ -N 淋失量 (kg/hm ²)	7.97	12.08
	NO ₃ ⁻ -N 淋失率 (%)	3.75	5.71
	NO ₃ ⁻ -N 表观淋失率 (%)	2.84	5.13
	总 N 淋失量 (kg/hm ²)	12.51	19.50
	总 N 淋失率 (%)	7.63	12.32
	总 N 表观淋失率 (%)	2.88	5.82

根据 2008 年中国统计年鉴^[1], 我国 N 肥施用量为 22.97 Tg , 农作物总播种面积为 15346.4 万 hm^2 , 水稻播种面积为 2891.9 万 hm^2 , 小麦、玉米、豆类、薯类和油料旱作物的播种面积为 8437.7 万 hm^2 , 分别占播种总面积的 18.84% 和 54.98%, 假定全国农田单位面积施 N 量均相等, 根据统计分析得到的水田总 N 平均表观淋失率为 2.19%, 旱地总 N 平均表观淋失率为 4.35%, 经过计算得到全国每年总 N 淋失量达到 0.644 Tg , 占施 N 量的 2.80%。

4 小结

通过对农田生态系统中 N 素淋失量、淋失率和表

观淋失率与土壤 pH、体积质量、有机质、TN、TP、TK、土壤砂粒百分比、粉粒百分比、黏粒百分比、每季作物施 N 量、降雨量、灌溉水量、采样土层深度等影响因素的相关分析,发现施 N 量、降雨量、灌溉水量是 N 素淋失的重要影响因素,同时也是目前研究较多的影响因素。

水田中 NO_3^- -N 平均淋失量为 6.26 kg/hm^2 , 95% 的置信区间为 $4.64 \sim 7.81 \text{ kg/hm}^2$, 总 N 平均表观淋失率为 2.19% (95% 置信区间为 1.56% ~ 2.82%)。旱地中 NO_3^- -N 平均淋失量为 10.02 kg/hm^2 (95% 的置信区间为 $7.97 \sim 12.08 \text{ kg/hm}^2$), 总 N 平均表观淋失率为 4.35% (95% 的置信区间为 2.88% ~ 5.82%)。结合 2007 年 N 肥施用量和作物种植面积得到全国 N 素淋失量为 0.644 Tg , 占施 N 量的 2.80%。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 (2008). 北京: 中国统计出版社, 2008
- [2] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992: 213-249
- [3] 安徽土壤肥料信息网. <http://www.ahtfw.com/oldsite/hydt/dis.asp?id=2389>
- [4] 胡克林, 李保国, 黄元仿, 程德立, White RE. 农田尺度下土体硝酸盐淋失的随机模拟及其风险性评价. 土壤学报, 2005, 42(6): 909-915
- [5] Xing GX, Zhu ZL. An assessment of N loss from agricultural fields to the environment in China. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, 57: 67-73
- [6] 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: 212-249
- [7] 朱鹤健. 水稻土. 北京: 农业出版社, 1985
- [8] 沈善敏. 中国土壤肥力. 北京: 中国农业出版社, 1998: 66-76, 160-206, 450-474
- [9] 范丙全, 胡春芳, 平建立. 灌溉施肥对壤质潮土硝态氮淋溶的影响. 植物营养与肥料学报, 1998, 4 (1): 16-21
- [10] 黄元仿, 李韵珠. 不同灌水条件下土壤氮素淋洗渗漏的研究 // 徐明岗主编. 第五届全国青年土壤学工作者学术讨论会论文集—现代土壤科学研究. 北京: 中国农业出版社, 1994: 243-247
- [11] 彭琳, 彭祥林, 卢宗藩. (土娄)土旱地土壤硝态氮季节性变化与夏季休闲的培肥增产作用. 土壤学报, 1981, 18(3): 212-222
- [12] Bergstrom L, Brink N. Effects of differentiated applications of fertilizer N leaching losses and distribution of inorganic N in soil. Plant and Soil, 1986, 93(3): 333-345
- [13] Owens LB, Edwards WM, Vankeuren RW. Groundwater nitrate levels under fertilized grass and grass-legume. Journal of Environmental Quality, 1994, 23(4): 752-758
- [14] 汪德水主编. 旱地农田肥水关系原理与调控技术. 北京: 中国农业出版社, 1995: 341-345
- [15] 余贵芬, 毛知耘, 石孝均, 刘洪斌. 氮素在紫色土中的移动和淋失研究. 西南农业大学学报, 1999, 21(3): 228-232
- [16] Bijay S, Rana DS, Sekhon GS. Some loss measures of reducing leaching of nitrates beyond potential rooting zone. Plant and Soil, 1978, 49: 633-639
- [17] 胡立峰, 胡春胜, 安忠民, 张爱军, 陈阜. 不同土壤耕作法对作物产量及土壤硝态氮淋失的影响. 水土保持学报, 2005, 19(6): 186-189
- [18] 中国科学院南京土壤研究所中国土壤数据库. <http://www.soil.csdb.cn/stdc.htm>
- [19] 陈明昌, 张强, 杨晋玲, 雷震宇. 农业生态系统中氮素循环研究综述. 山西农业科学, 1993, 21(4): 53-59
- [20] 左海军, 张奇, 徐力刚. 农田氮素淋溶损失影响因素及防治对策研究. 环境污染与防治, 2008, 30(12): 83-89
- [21] 李晓欣, 胡春胜, Herbert SJ. 太行山前平原冬小麦生长季硝态氮的淋失研究. 中国生态农业学报, 2004, 12(3): 83-85
- [22] 李晓欣, 胡春胜, 张玉铭, 董文旭, 欧阳志云. 华北地区小麦-玉米种植制度下硝态氮淋失量研究. 干旱地区农业研究, 2006, 24(6): 7-10
- [23] 孙泽强, 康跃虎, 刘海军. 喷灌冬小麦农田土壤 NO_3^- -N 分布特征及作物吸氮规律. 干旱地区农业研究, 2007, 25(6): 136-143
- [24] 王晓春, 唐敏. 呈贡县大棚蔬菜施肥现状及经济效益分析. 现代农业科技, 2008(8): 14-15
- [25] 郭金芝, 金东日, 杜长青. 施肥对大棚蔬菜地土壤水及地下水硝酸盐和亚硝酸盐污染的研究. 延边大学学报(自然科学版), 2009, 35(2): 156-159
- [26] 郝晓晖. 长期施肥对亚热带稻田土壤有机碳氮及微生物学特性的影响(博士学位论文). 武汉: 华中农业大学, 2008: 99-104
- [27] 李伟, 关连珠, 颜丽, 陈顶成. 土壤有机质含量对化肥氮素转化的影响. 中国农学通报, 2005, 21(7): 255-257
- [28] 叶优良, 李隆, 张福锁, 孙建好, 刘生战. 灌溉对大麦/玉米带田土壤硝态氮累积和淋失的影响. 农业工程学报, 2004, 20(5): 105-109
- [29] 崔远来, 李远华, 吕国安, 沙宗尧. 不同水肥条件下水稻氮素运移与转化规律研究. 水科学进展, 2004, 15(3): 280-285
- [30] 李宗新, 董树亭, 王空军, 刘鹏, 张吉旺, 王庆成, 刘春晓. 不同施肥条件下玉米田土壤养分淋溶规律的原位研究. 应用生态学报, 2008, 19(1): 65-70

- [31] 张云贵, 刘宏斌, 李志宏, 林葆, 张夫道. 长期施肥条件下华北平原农田硝态氮淋失风险的研究. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 711-716
- [32] 朱兆良. 氮素管理与粮食生产和环境. 土壤学报, 2002, 39(增刊): 3-11

Statistical Analysis and Estimation of N Leaching from Agricultural Fields in China

HU Yu-ting^{1,2}, LIAO Qian-jiahua^{1,2}, WANG Shu-wei¹, YAN Xiao-yuan¹

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

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Statistical analysis of 382 data of nitrogen leaching in farmland of China was conducted to identify the major influencing factors. The results showed that nitrate leaching was closely related to total nitrogen leaching. The amount of nitrate leaching in paddy field was significantly negatively correlated with soil bulk density, organic matter content, TN, soil clay percentage, and positively correlated to nitrogen application rate and irrigation. The amount of nitrate leaching in upland was significantly negatively correlated with soil total phosphorus content, sand percentage, nitrogen application, rainfall, irrigation, and positively correlated with TN, silt percentage and soil depth. The average net rate of total nitrogen leaching was 2.19% (95% confidence interval of 1.56% ~ 2.82%) in paddy field and 4.35% (95% confidence interval of 2.88% ~ 5.82%) in upland. According to nitrogen fertilizer consumption data in China Statistical Yearbook 2007, it was estimated that total nitrogen leaching was up to 0.644 Tg, accounting for 2.80% of China's total nitrogen application.

Key words: Total nitrogen leaching, Nitrate leaching, Paddy field, Upland field