DOI:10.13758/j.cnki.tr.2000.04.005

农田氮、磷的流失与水体富营养化①

司友斌 王慎强 陈怀满②
(中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

摘 要 农田氮、磷的流失,不仅造成化肥的利用率降低,农业生产成本上升,还对水环境造成污染,引起水体富营养化。本文讨论了农田氮磷流失对水体富营养化的贡献、农田氮磷流失途径及影响因素,提出了减少农田氮磷流失、控制水体富营养化的措施。

关键词 农田氮素;农田磷素;淋溶作用;水体富营养化

肥料提供了植物生长必需的营养元素,对保持作物高产稳产起了重要的作用,但是由施肥不当或过量施肥带来的环境污染问题也越来越突出,其中农田氮磷流失引起的水体富营养化问题目前已受到人们的普遍关注。

1 水体富营养化的表现及形成原因

水体富营养化通常是指湖泊、水库和海湾等封闭性或半封闭性的水体,以及某些滞留(流速<1 米/分钟)河流水体内的氮、磷和碳等营养元素的富集,导致某些特征性藻类(主要是蓝藻、绿藻等)的异常增殖,致使水体透明度下降,溶解氧降低,水生生物随之大批死亡,水味变得腥臭难闻。引起水体富营养化起关键作用的元素是氮和磷。研究表明,对于湖泊、水库等封闭性水域,当水体内无机态总氮含量大于 0.2mg/L, PO_4^{3-} —P 的浓度达到 0.02mg/L 时,就有可能引起藻华(Algae Bloms)现象的发生。

据对我国 25 个湖泊的调查,水体全氮无一例外超过了富营养化指标,全磷只有 2 个湖泊(大理洱海和新疆博斯腾湖)低于 0.02mg/L 的临界指标,其余 92%的湖泊皆超过了这个标准,比国际上一般标准高出 10 倍或 10 倍以上(表 1)。

表 1 我国 25 个湖泊中的全 N 全 P 浓度(mg/L)及所占比例[1]

	全 N				全 P			
	<0.2	>1.0	>2.0	>5.0	<0.02	>0.1	>0.2	>0.5
湖泊数	0	21	13	5	2	16	12	6
%	0	84	52	20	8	64	48	24

另外,我国的 22 个湖泊调查表明,除 1 个属贫营养湖外,其余 63.3%的湖泊是营养湖。如滇池、巢湖、甘棠湖(九江)、西湖、东湖、玄武湖、蘑菇湖(石河子)、于桥水库(天津)等早已是富营养湖泊[1]。

水体富营养物质氮、磷的来源主要有城镇生活污水、含氮含磷的工业废水和农田氮磷肥。其中,农田氮、磷的流失是引起水体富营养化的重要原因[2,3]。

① 国家自然科学重大基金资助项目(39790100)
② 通讯联系人

在美国,对非点源污染进行了鉴别和测量,发现农业是一个主要的非点状污染源,农田径流是全国 64%受到污染河流和 57%受到污染湖泊的主要污染源[4];瑞士雨水径流中氮、磷含量相当于工业废水和城市污水中这类污染物量的总和[5]。

我国五大淡水湖之一—巢湖,从 60 年代始至 80 年代,由于湖水的富营养化,导致湖内 100 多种水藻大量繁殖。巢湖目前主要受到氮、磷营养盐与有机物的污染,总氮、总磷严重超标。1997 年巢湖西半湖水体总氮、总磷分别为 4.14mg/L 和 0.310mg/L,分别超过 Ⅲ类水标准 3.14 倍和 5.2 倍,劣于 Ⅴ 类水标准[6]。造成巢湖严重污染的原因,除了沿湖城市排放的大量工业废水和生活污水,与农业非点源污染量越来越大有很大关系。巢湖沿湖四周均是农田,是安徽省的重要产粮区。近年来,农民施用化肥量平均每公顷 1200kg,比 10 年前增加 8 倍,因肥料结构和施肥方法不当造成化肥大量流失,成为巢湖水质总氮、总磷超标的重要原因[7]。

我国第三大淡水湖—太湖,目前 97%面积的水体已呈中~富营养化状态。富营养化使太湖近几年大面积爆发蓝藻,数次大规模地影响到自来水厂取水。太湖水富营养化主要由沿湖的工农业排污引起。据研究,进入太湖的污染物中,总氮排放量最多的是太湖流域的农业非点源污染,总磷排放量最多的是来自城镇居民。苏南太湖流域是我国农业最发达的地区之一,农业集约化程度较高,是高投入、高产出区,全区面积仅占全国的 0.4%,而化肥消费量占全国的 1.3%[8]。

过量施肥、施肥结构不合理、农田排水直接进入河流等一系列因素,加剧了水体富营养化的发生。由水体富营养化引起的水质恶化、水源紧缺、生态环境破坏,严重制约着国民经济的健康持续发展。因此,减少农田氮磷流失,控制水环境污染成为世界各国学者所面临的最重要研究课题之一。

2　农田氮、磷流失对水体富营养化的贡献

2.1　农田氮素的流失

各种形态的氮肥施入土壤后,在微生物作用下,通过硝化作用形成 NO_3^--N,因土壤胶体对 NO_3^- 的吸附甚微,易于遭雨水或灌溉水淋洗而进入地下水或通过径流、侵蚀等汇入地表水,对水源造成污染;土壤颗粒和土壤胶体对 NH_4^+ 具有很强的吸附作用,使得大部分的可交换态铵得以保存在土壤中,但是,当土壤对 NH_4^+ 的吸附量达到最大值时,亦即土壤对 NH_4^+ 的吸附达到饱和时,在入渗水流的作用下 NH_4^+ 还是可能被淋失出土体。

在土壤—作物系统中,氮素的作物利用率仅为 20~35%,大部分被土壤吸附,逐渐供作物吸收利用,有 5~10%挥发到大气中。随降水径流和渗漏排出农田的氮素中有 20~25%是当季施用的氮素化肥[9]。就地表水(湖泊等)硝态氮的污染而论,氮素化肥占了 50%以上[10]。

研究表明,瑞典西海岸的拉霍尔姆湾,由河流输运的氮 60%来自农业,瑞典最南端的谢夫灵厄流域,来自农业的氮占此流域总输入氮量的 84~87%[11]。我国苏南太湖流域,农业面源氮素对地表水的污染负荷量高达 2.55×10^4t/a,占氮素化肥施用量的 16.8%[12]。

2.2　农田磷素的流失

磷肥施到土壤后易被固定,应用 ^{32}P 示踪研究石灰性土壤磷素的形态及有效性表明,水

溶性磷肥施入土壤后，有效性随时间的延长而降低，在两个月内有 2/3 变成不可提取态磷（Olsen 法），其主要形态是 Ca_8—P、Al—P、Fe—P 型磷酸盐[13]。磷在土壤中扩散移动极弱，$H_2PO_4^-$ 离子在土壤中的扩散系数为 0.0005～0.001$cm^2S^{-1}\times10^{-5}$，相当于 NO_3^- 离子扩散系数的千万分之一或万分之一。磷在土壤中迁移一般主要集中在表土层，较难穿透较厚的土层[14,15]。据英国洛桑试验站进行的 100 多年的研究结果表明：磷的移动每年不超过 0.1～0.5mm，它只能从施肥点向外移动 1～3cm 的距离[16]。

作物对磷肥的利用率很低，通常情况下当季作物只有 5～15%，加上后效一般也不超过 25%，所以约占施肥总量 75～90%的磷滞留在土壤中[17]。长期而过量地施用磷肥，常导致农田耕层土壤处于富磷状态，从而可通过径流等途径加速磷向水体迁移的速度[18]。

据估计全世界每年大约有 300～400 万吨 P_2O_5 从土壤迁移到水体中[19]，美国每年由化肥和土壤进入水生态系统的磷达 0.45 亿公斤左右[20]，日本水田磷的排出负荷量为 0.3～8.4kg/（hm^2a）[21]，我国广东东江流域农田的磷素流失量为 1.16kg/（hm^2a）[22]，四川涪陵地区农田磷流失量为 1.17kg/（hm^2a）[23]，陕西黄土高原侵蚀最严重的地区府谷县、米脂县农田中磷流失量分别为 9.9kg/（hm^2a）和 8.7kg/（hm^2a）[24]。张水铭等采用封闭体系和磷素平衡法对农田排水磷负荷量进行的实验表明，在雨水较丰富的 1987 年苏南太湖地区排出磷负荷总量 440t/a，平均耕地排出 537g/（hm^2a），在旱地排水中固体物质的含磷量占总磷量的 78.7%[25]。

2.3 农田氮、磷流失的途径

氮、磷肥料等通常通过农田排水和地表径流的方式进入地表水体造成污染。

美国对连续 5 年的小麦田排水中氮的流失观察表明：每公顷施用 48.8kg、96kg 和 144kg 氮，在生长旺季排水中的氮量分别是不施肥的 4.8、9.6、12.7 倍；甚至在冬季休闲时，也是不施肥的 1.07～1.62 倍[26]。在我国北方地区引水漫灌仍很普遍，从而使得灌田区回水携带着农田中氮、磷进入地表水体。例如吴岳在宁夏青铜峡县的调查中发现，以漫灌方式在春季灌头水以后和初冬灌冬水时，硝态氮大量随田间渗滤水排出，经计算排出的氮量占施肥量的 1/3 以上，磷占 58.7%[27]。

天然降水和不适当的灌溉形成的地表径流，将农田氮素、农田磷素转移带入到地表水体中，造成土壤氮、磷的大量损失。地表径流引起的氮、磷损失分为两种，一是土壤全氮（沉积氮）、全磷（沉积磷）的损失，二是土壤可溶性氮（溶解氮）、可溶性磷（溶解磷）的损失。研究表明，美国因地表径流损失的农田氮素每年为 450 万吨，前苏联因地表径流造成土壤全氮损失每年达 300 万吨，溶解氮损失每年达 46 万吨[5]。我国全年流失土壤达 50 亿吨，带走的氮、磷、钾等养分约相当于全国一年的化肥施用总量[28]。

据张夫道研究[29]，1979 年京津地区排污流入渤海的铵态氮为 8720t，五氧化二磷 638t，因化肥流失进入渤海的氮为 8000t，与污水氮接近。1988～1989 年西湖流域非点源调查结果发现，对入湖口河流水质影响的非点源中，氮、磷的单位面积负荷均以水田最高，旱田次之。水田面积仅占整个流域面积的 3.9%，但产生氮负荷量却占 16%（5.94t/km^2a），磷负荷量占 17.5%（0.45t/km^2a）[30]。在湖泊富营养化中，肥料（包括有机肥）通过地表径流进入湖水中的氮占入湖总氮量的 10%左右；由肥料流失的磷占入湖总磷量的 4～10%，其中有机肥占 3～7%，化肥占 1～3%[31]。

3　影响农田氮、磷流失的因素

农田氮、磷的损失程度取决于当地的降雨情况(降雨强度、降雨时间和降雨分布)、施肥状况(种类、时间、数量)、地形地貌特点、植被覆盖条件、土壤条件和人为管理措施等多种因素。

农田氮、磷流失量与径流量、以及降雨对地表的侵蚀能力成正相关,氮、磷输出速率基本上随降雨径流过程呈递减变化,变化曲线呈偏态分布,但氮、磷累积输出量基本呈线性上升趋势(图 1、图 2)。

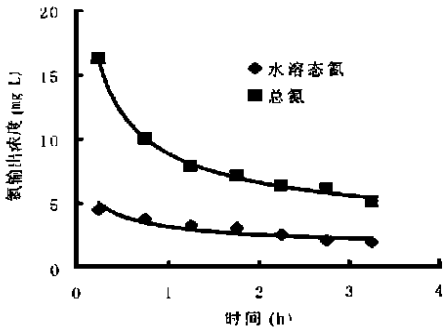

图 1　天然降雨径流氮输出浓度曲线[32]

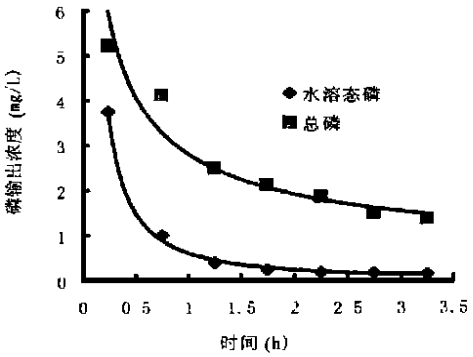

图 2　天然降雨径流磷输出浓度曲线[32]

降雨条件和施肥状况对农田氮肥的径流损失有很大的影响,施肥后 1～5 天内发生降雨 12.8cm 所引起的农田氮素的损失量几乎占施入氮肥 10～20%,而且与肥料的种类有关,例如尿素的地表径流损失在相似条件下比硝酸铵形态的氮要少一半[33]。

耕地上氮的损失量与施氮量密切相关,每增施 1kg/hm^2 的氮素,通过径流损失的氮即增加 0.56～0.72kg/hm^2,其中肥料氮流失所占比重也随施氮量而增加,即每增施 1kg/hm^2 的氮素,肥料氮的流失增加 0.086～0.091%。土壤氮淋溶量与施肥量呈近似直线的正相关($r=0.9847$, $Y=16.222+0.136X$)(表 2)。

表 2　不同土壤和施肥量对氮素淋溶和径流流失的影响[34]

土壤	施氮量 (kg/hm^2)	氮淋溶		径流流失氮	
		总量 (kg/hm^2)	其中肥料 (%)	总量 (kg/hm^2)	其中肥料 (%)
砂壤土	80	23.1	16.3	110.2	28.3
	160	43.2	18.1	135.7	49.3
	450	76.5	30.2	312.5	64.7
壤土	80	24.3	4.3	93.2	33.3
	160	16.8	5.6	145.0	44.4
	450	42.6	21.0	361.0	68.4

张水铭等研究苏南太湖地区农业面源磷的污染表明,农田排水中的磷浓度与磷肥用量和施用方法有密切关系,农田排出水和渗漏水的全磷浓度及土壤速效磷含量与磷肥用量呈极显著正相关,稻田施磷量愈多,水体中磷的污染也愈严重;在稻麦两熟制中,水稻施磷在排水中的磷浓度显然高于小麦施同量磷肥的处理[25]。

土壤氮、磷淋溶量还与土壤性质有关,如土壤氮淋溶量与土壤粘粒(< 16μm)含量呈负相关的对数关系($Y=113.21-27.623\ln X$, $R^2=0.9976$)[17]。邬伦等的研究表明,土壤氮、磷流失量与植被、地形条件有很大关系,一般盆地大于丘陵,丘陵大于山地;在丘陵、山地中,

以中等坡度(20 ℃左右)氮、磷流失量最大[32]。

4 控制农田氮磷流失的措施和方法

4.1 经济合理施肥,严防过量施肥

应根据作物种类、需肥习性和现状水平,结合土壤肥力特点,做到适时适量、科学合理施肥。土壤专家给出了本地区作物施肥量,生产中要严格按标准施肥。

4.2 改进施肥方法,提高肥料利用率

农田生态系统中肥料利用率的高低是决定农田氮、磷流失量的一个重要因素。提高肥料利用率,不仅可以提高经济效益,而且可以减轻对水环境的污染。具体措施:

(1) 氮肥:按作物生育期需要分次施用,深施,施用缓效氮肥。同时,使用硝化抑制剂、脲酶抑制剂对降低土壤中 NO_3^--N 的含量都有较好的效果。

(2) 磷肥:集中施于农作物根系主要分布层;与有机肥混合施用。总的原则是减少土壤固定,提高磷肥的利用率。

(3) 重视钾肥投入,大力推广优化配方施肥。缺钾限制了氮素、磷素利用率的提高。多施钾肥和复合肥使投肥结构合理化,提高肥料利用率。

4.3 加强水肥管理,实施控水灌溉

减少田面水的排出是降低农田氮、磷流失的关键。大水漫灌、田埂渗漏使氮磷肥料还没有来得及被作物吸收或被土壤固定就被水冲跑了,使灌溉回归水中溶有大量化肥等物质,污染了地表水,恶化了水质。通过加强田间水浆管理,采用浅水勤灌,干湿交替,减少排水量,可有效地降低农田氮、磷排出负荷。

4.4 采用适宜的土地利用方式,防止土壤溶出和侵蚀。

从宏观角度看,农业面源污染主要来源于土壤的溶出和侵蚀。科学地进行农业土地区划,采用适宜的土地利用方式是控制农业面源污染的首要环节。如从环境角度考虑,将不宜植稻区改植旱作,可大大减少土壤氮、磷损失。在一些面源污染的敏感区推行合理的轮作制度,则农业面源污染可大为减轻。另外少耕或免耕、丘陵地区营造梯田、保持良好植被等措施均应大力推广。

4.5 人工湿地在农业面源污染控制中的应用

由漂浮植物池、沉水植物池、挺水植物池以及草滤带组成的人工湿地,对氮、磷、泥砂以及有机物有较好的吸收、吸附以及物理沉降作用,可以控制农田径流污染,具有工艺简洁,运行管理方便,生态效益显著,投资少等优点,是控制农业面源污染的实用工程技术[35,36,37]。

4.6 种植香根草篱,减少泥砂入水

香根草技术(VGT)在水土保持、扩坡护堤、扩路工程、污染的植物修复等方面有可能成为 21 世纪世界范围的领先技术[38],在湖泊和河流的坡、岸周围种植香根草篱,利用 VGT 技术可减少 90%的土壤流失,减少 70%的雨水径流。

参 考 文 献

1 金相灿等. 中国湖泊富营养化. 北京: 中国环境科学出版社, 1992

2 Dag O. Hessen et al. 氮流失对淡水和海洋受体富营养化的重要意义. AMBIO—人类环境杂志. 1997, 26

(5): 306～313
3 M. M. Abrams et al. J. Environ. Qual. 1995, 24(1): 132～138
4 F. J. 史蒂文森等著, 闵九康等译. 农业土壤中氮. 北京: 科学出版社, 1989
5 世界资源研究所、联合国环境规划署、联合国开发计划署编. 世界资源报告(1992～1993). 北京: 中国环境科学出版社, 1993
6 党啸. 巢湖流域水环境问题的观察与思考. 环境保护, 1998, (9): 38～40
7 杨佑兴. 倾听巢湖诉说. 中国环境报, 1996. 9. 10
8 吕耀. 苏南太湖流域农业非点源污染及农业持续发展战略. 环境科学动态, 1998(2): 1～4
9 韦鹤平主编. 环境系统工程. 上海: 同济大学出版社, 1993, 183 页
10 朱荫湄. 施肥与地面水富营养化. 施肥与环境学术讨论会论文集, 中国农业科技出版社, 1994, 40～44
11 Lena B Vought et al. 河边过渡带养分的持留. AMBIO—人类环境杂志, 1994, 3(6): 342～347
12 马立珊, 张水铭, 张桂英. 苏南太湖水系农业面源污染及其控制对策研究. 环境科学学报, 1997, 17(1): 39～47
13 冯固, 杨茂成等. 用^{32}P 示踪研究石灰性土壤中磷素的形态及其有效性变化. 土壤学报, 1990, 33(3): 301～307
14 王超. 磷肥污染物在非饱和土壤中迁移特性研究. 南京大学学报(自然科学版), 1997, 33 卷, 专辑, 253～255
15 隋红建, 杨帮杰. 入渗条件下土壤中磷离子迁移的数值模拟. 环境科学学报, 1996, 16(3): 302～307
16 Cook, G. W. Ann. Agron. 1996, 27: 503～536
17 王庆仁, 李继云. 论合理施肥与土壤环境的可持续性发展. 环境科学进展, 1999, 7(2): 116～123
18 徐明岗等. 土壤磷扩散规律及其能量特征的研究. Ⅱ. 施肥量及水肥温相互作用对磷扩散的影响. 土壤学报, 1998, 35(1): 55～65
19 刘怀旭主编. 土壤肥料. 合肥: 安徽科学出版社, 1987: 202～230
20 彭近新. 水质富营养化与防治. 北京: 中国环境科学出版社, 1988: 191
21 田渊俊雄, 高村义亲著. 集水域ガうの窒素ツソの流出. 东京大学出版会, 1985: 75～129
22 李定强等. 广东省东江流域典型小流域非点源污染物流失规律研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(3): 12～18
23 陈西平, 黄时达. 涪陵地区农田径流污染负荷定量化研究. 环境科学, 1991, 12(3): 75～79
24 余存祖等. 水土流失区农田物质循环与改善途径. 中国水土保持. 1987, 58(5): 13
25 张水铭, 马杏法, 汪祖强. 农田排水中磷素对苏南太湖水系的污染. 环境科学, 1993, 14(6): 24～29
26 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国肥料. 上海: 上海科学技术出版社, 1994, 104～108
27 吴岳. 灌溉条件下氮磷钾随水流失污染水体的试验初报. 农业环境保护, 1986, 5(5): 42～43
28 张世贤. 三张图表说喜忧—中国面临的严峻挑战与机遇. 中国农村, 1996, (5): 6～9
29 张夫道. 化肥污染的趋势与对策. 环境科学, 1985, 6(6): 54～58
30 焦荔. USLE 模型及营养物流失方程在西湖非点源污染调查中的应用. 环境污染与防治, 1991, 13(6): 5～8, 17
31 徐谦. 我国化肥和农药非点源污染状况综述. 农村生态环境, 1996, 12(2): 39～43
32 邬伦, 李佩武. 降雨—产流过程与氮、磷流失特征研究. 环境科学学报, 1996, 16(1): 111
33 冯绍元, 黄冠华. 试论水环境中的氮污染行为. 灌溉排水, 1997, 16(2): 34～36
34 孙彭立等. 氮素化肥的环境污染. 环境污染与防治, 1995, 17(1): 38～41
35 J. E. Reuter et al. J. Environ. Mang. 1992, 36(1): 35～53
36 刘文群. 人工湿地在农业面源污染控制中的应用研究. 环境科学研究, 1997, 10(4): 15～19
37 杨昌凤等. 模拟人工湿地去除富营养化湖水中藻类. 水处理技术, 1993, 19(3): 158～161
38 徐礼煜. 香根草研究与发展. 北京: 中国农业科技出版社, 1996, 1～191