

农田土壤磷素非点源污染研究进展^{*}

张乃明, 洪 波, 张玉娟

(云南农业大学资源与环境学院, 云南 昆明 650201)

摘要: 磷是引起水体富营养化的敏感因素, 本文综述了农田土壤磷素迁移、监测及磷素非点源污染防治技术的研究现状, 并结合国内的实际提出了农田磷素非点源污染领域今后的研究重点。

关键词: 磷素; 非点源污染; 富营养化; 农田

中图分类号: X 53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004 - 390X(2004)04 - 0453 - 04

Study Progress of Phosphorus Non-point Source Pollution in Farmland

ZHANG Nai-ming, HONG Bo, ZHANG Yu-juan

(College of Resources and Environment Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: The loss of farmland phosphorus contributes greatly to the eutrophication. Based on a large number of literatures, the article reviewed the migration and transferring of phosphorus in soil, its monitoring and the control techniques of phosphorus non-point source pollution, its research prospects in agricultural phosphorus non-point source pollution was advanced.

Key words: phosphorus; non-point source pollution; eutrophication; farmland

化学肥料的生产与使用, 对世界农业的发展起了划时代的推动作用。正如联合国粮农组织 (FAO) 所说, 总结百年来粮食大幅度增产的诸多因素中, 化肥所起的作用占 50% 左右。但单位面积产量也不可能随着肥料用量增加而无限地按比例增加。盲目地过量地增施化肥, 致使作物对肥料吸收利用率降低, 不仅造成经济上的浪费, 影响作物的品质, 而且污染环境。由化肥施用不当引起的环境问题已引起各国科学家的重视, 特别是水体的富营养化现象更为突出^[1,2]。

地表水富营养化现象一般在湖泊、水库及一些流速缓慢的河流中发生, 尤以湖泊中出现最多。具体表现为过量营养物质 (主要是氮、磷) 汇入水体引起浮游生物藻类大量繁殖, 水中溶解氧降低, 水体

浑浊, 水色变深, 恶臭, 水质恶化。大多数情况下, 富营养化的主要限制因子都是磷。一般当水体中的总磷浓度 $> 0.02 \text{ mg/L}$, 总氮浓度达 $0.2 \sim 0.5 \text{ mg/L}$ 以上时, 即被视为富营养化水体。磷在农业环境中的流失量虽然不大, 但当水体中含氮充分时, 磷浓度达到 0.015 mg/L , 就可能引起“水华”现象发生。大面积农田中流失的磷量汇集到相对小面积的承受水面时, 这种流失量就不可忽视了^[1]。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 0.02 mg/L 的临界指标, 其余的湖泊皆超过了这个临界指标^[2]。水体富营养化物质 (氮、磷) 的来源除了城市污水, 工业废水等点源污染外, 大部分与农田土壤侵蚀、地表径流等非点

^{*} 收稿日期: 2004 - 02 - 16

基金项目: 云南省科技厅应用基础研究项目 (1999C0011G)

作者简介: 张乃明 (1963 -), 男, 山西长治人, 教授, 主要从农业环境保护方面的教学科研工作。

源输入有关。因此,了解农田土壤磷素非点源污染研究进展,对富营养化湖泊水体治理具有重要意义。

1 农田土壤磷素污染研究现状

1.1 磷在农田土壤中的迁移

磷肥施入土壤后,只有极小部分在土壤中呈离子态的磷酸盐才能被作物吸收,其余绝大部分很快与土壤组分作用。依据土壤的性质和组成不同,有的被吸附在土壤中带正电荷的铁、铝氧化物胶体表面;有的被土壤粘粒局部带正电荷的边缘吸附;有的与铁、铝或钙盐发生化学作用形成不溶性磷酸盐化合物;有的与土壤有机质结合成有机结合态磷,降低了磷在土壤中的移动性。据英国洛桑试验站的资料,磷在土壤剖面中向下移动的速度每年不超过 0.1~0.2 mm。由于土壤对磷有强烈的吸附固定作用,它对作物的有效性就很低,磷也因而不易被雨水、灌溉水淋溶损失,但当施用大量磷肥后,紧接着一场大雨或者随即灌水,还是有相当数量的磷随水流失。更值得注意的是在水土流失、土壤侵蚀严重的地区,大暴雨就会引起农田耕层土壤的大量流失。这种地表径流,侵蚀冲刷带走的耕层土壤中含有丰富的磷酸盐化合物,其最终归宿往往是湖泊、水库和河流,构成磷素的非点源污染的主要来源。据 WADDELL and BOWER 估计,施用的磷肥约 5% 扩散到大气中,土壤吸附固定 55%~75%,植物吸收 7%~15%,被径流带入地表水 5%~10%,沥滤到根区以下的土壤或地下水 <1%^[4]。

磷随地表径流的流失从形态上分为颗粒态和溶解态两部分,其中颗粒态由不同粒径的团聚体组成,而施肥对磷在土壤团聚体中的分布和富集作用影响很大。径流对磷的富集作用可用富集系数(Enrichment Ratio, ER)表示: $ER = [\text{沉积物含磷量}] / [\text{土壤含磷量}]$ 。对于特定的土壤来说,富集系数与沉积物的累积流失量有关。晏维金等的研究^[5]发现,在特定的土壤和降雨径流条件下,磷流失主要通过地表径流途径,流失的颗粒态磷以 0.25 mm 以下的颗粒物为主,流失的磷中 80% 以上是颗粒态形式的磷,而颗粒态磷中 60%~90% 随 0.1 mm 以下的颗粒物流失;不同粒径团聚体对磷的富集机理和富集系数不同,0.1 mm 粒径团聚体对磷的富集可能是由于粘土的吸附作用,而 0.045~0.1 mm 团聚体对磷的富集作用较差,富集系数小于 1,沉积物对磷的平均富集系数为 1.49;通过实验建立了

沉积物富集系数与其累积流失量的相关经验模型,可用于预测颗粒态磷流失。

影响磷素流失的因素很多,如土壤质地、土壤性质、磷肥施用量及施用方式等,但农业输入给水体的磷几乎全部是和水土流失分不开的,并且植被类型—土地利用类型在很大程度上左右了氮、磷营养元素的流失量。

郇伦^[6]等以于桥水库流域为例,通过人工降雨模拟实验与天然降雨径流过程监测,得出磷随径流过程的输出特征:总磷、水溶态磷的输出浓度随降雨径流过程减小,总磷输出浓度递减规律呈抛物线型,递减速度快,水溶态磷输出浓度呈非线性分布,与总磷比较,其递减变化幅度小;磷输出速率基本上随降雨径流过程呈递减变化,磷累积输出量呈线性上升趋势。

单宝庆等^[7]以人工降雨的方法,对巢湖边旱作表层土壤在降雨后所产生的磷迁移过程进行了研究,结果表明:在两种雨强值(70 mm 和 35 mm) 90 min 内模拟的降雨过程中,供试的土壤产生表面径流和土壤内部壤中流两种径流模式。降雨强度大,表面径流和壤中流始流时间早,水流量和浓度相应高,累积输出也多。相同雨强下,农田作物的覆盖作用能促进壤中流,减缓表面流,但对始流时间的影响不大。裸露土壤的总磷浓度曲线呈波浪状递减,作物覆盖土壤则呈均匀缓慢的递减趋势。在中到大雨条件下,壤中累积输出的径流量都低于表面流,差幅决定于土壤表层界面特征,表面径流中的磷迁移量是壤中流的 3~4 倍。磷污染物输出方式以悬浮态总磷为主(78.5%~94.9%),溶解性磷和正磷酸盐所占比例很低^[7~8]。

土壤有效磷含量受多种因素的影响,一般土壤全磷量愈多,有效磷也增多,两者间成一定的相关性;质地粘重土较砂质土全磷量高,有效磷以 pH 6~7 范围最高,有机质多的土壤,因其分解过程释放有机磷,又促进无机磷溶解,故使磷有效性增高;溶于土壤溶液中的磷,借助于固相—液相、液相—液相间的平衡体系而扩散,但由此作用可溶性磷移动的距离很小,扩散系数也仅为 $1.0 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$;施氮肥,可促进磷的溶解和释放,使植株吸收磷提高。施硫肥可增加含磷灰石类型土壤磷利用率;土壤渍水还原可致磷酸铁、铝类化合物溶解而增加有效磷量^[11]。这说明合理施肥可提高磷肥利用率,减少磷素流失非点源源磷污染负荷。

1.2 农田磷素监测

通过对土壤中磷素含量、形态的测定,一方面可以评价土壤对作物的供磷能力,这有利于根据土壤磷素状况和作物的生长需求将有限的磷肥资源投向最需要的地方;另一方面也为控制磷素流失造成的面源污染提供规划和评价的依据。其中后者即面向环境的土壤磷素测定与表征方法越来越受到人们的重视。这类测定项目主要包括以下5个部分^[12]:(1)易解吸磷(RDP)是土样在蒸馏水或稀的电解质溶液作用下,从土壤固相部分进入液相部分的磷的数量。POTE^[13~14]等人在研究土壤磷素水平与径流中磷含量的关系时发现,与常规的土壤磷素测定方法相比,RDP与径流中的磷含量相关性最好,且不受降雨强度、坡度和季节变化等因素的影响。(2)藻类有效磷(BAP)是指可直接为藻类所吸收利用的磷,也就是与水体富营养化的发生关系最密切的那部分磷。测定土壤和水系沉积物中的BAP可更准确地评估农业非点源磷污染对受纳水体的影响。(3)土壤最大吸磷量和磷吸持指数:土壤中活性磷的行为主要受吸持和解吸过程的控制,而Langmuir方程在一定浓度范围内能够较好地描述土壤对磷的吸持特征^[15~16]但实际应用性差。BACH^[17]等经过对多种不同类型土壤的实验研究,发现土壤的磷吸持指数SI(Sorption Index)与土壤最大吸磷量 X_m 之间存在着非常显著的相关关系,因此可将SI值作为 X_m 的替代指标来表征土壤的固磷能力。高超等^[18]以SI为评价指标,对太湖流域农田土壤中磷向水体释放风险进行了评价,认为SI值30左右为一临界值,SI大于此值的土壤对施磷具有较大的缓冲能力,而SI低于此值的土壤对施磷非常敏感,磷流失量将随施磷量的增加而呈直线上升趋势。(4)磷零点吸持平衡浓度(EPC_0)是土壤溶液中的磷在达到吸持与解吸的动态平衡时的浓度。 EPC_0 主要用来表征土壤的固磷能力, EPC_0 越小,土壤固磷能力越大。(5)磷吸持饱和度(DPSS)^[19]可视为磷的土壤环境容量,用以评估土壤的固磷能力。 $DPSS = Pe/Psc \times 100\%$, Pe 为土壤可提取态P的含量, Psc 为土壤对P的吸持容量。

1.3 农田磷素非点源污染防治

防治源污染的措施可归纳为两类:一是对污染源的控制;二是对污染物迁移途径即汇的方面的控制。磷素非点源污染控制也不例外。

1.3.1 施肥管理

施肥时养分数量及比例与作物需求相匹配可提高化肥的利用率;磷肥采取集中施也可提高利用率降低磷污染。此外依靠作物、秸秆、牲畜及人粪便、豆科植物、有机绿肥,特别是微生物型肥料以替代化肥。可以培肥地力、改善土壤、恢复土壤自身的良性生态系统,同时,由于微生物型肥料的活性菌体固氮、解磷、解钾作用及菌体活性与土壤中可利用的氮、磷、钾浓度之间的调控作用,使土壤中的供肥机制稳定而持久,最终降低磷的流失量。

1.3.2 合理灌溉

不同灌溉方式土壤养分流失情况不同,一般按下列顺序递增:喷灌<淹灌<沟灌^[20]。张水铭等采用封闭体系和磷素平衡方法研究苏南太湖地区农业面源中磷的排出负荷量和减少磷排出负荷量的措施,结果表明:农田各种水体中磷的浓度,田面水>地表排出水>灌溉水>渗漏水。这是由于灌溉水进入农田后,经过蒸发浓缩,以及土壤中磷素向水层释放作用等过程,使得田面水中磷的浓度升高,特别是施用磷肥后几天内,田面水中磷的浓度可高过3 mg/L,甚至更高。所以加强田间水浆管理,采用浅水勤灌,干湿灌溉,减少排水量,可有效达到降低稻田磷污染负荷量^[21]。

1.3.3 改进栽培与耕作制度

多数情况下土壤侵蚀是由于直行耕作而不是沿土地的自然等高线耕作引起的。在中等坡度的土地上进行等高线耕作,可以减少土壤损失达50%以上。通过研究不同农作物对氮、磷吸收特征和互补性,采取不同作物的间作套种、轮作等方式,可充分提高土壤中养分利用率,减少损失。传统的农作方法是在收获以后去除作物残茬,这使土地在整个冬季处于裸露状态并容易受到侵蚀。虽然农田径流产生量与农田耕作方式并无明显的相关关系,但农田泥沙和养分流失在传统耕作农田中明显高于免耕农田^[4]。SHARPLEY研究了磷在农田中流失的敏感性,发现按以下顺序降低:传统耕作小麦田、免耕小麦田、草地过滤带^[22]。

1.3.4 植被过滤带和草地、河岸缓冲带建设

在农田和水体之间建立合理的草地或林地过滤带,可大大降低水体中的氮、磷的含量。农田与水体之间存在的植被缓冲带有将农田与水体隔开的作用,当地下水从农田流向水体时,植被缓冲带起到两种效应:一是对地表径流起到滞缓作用,调节入河洪峰流量;二是有效地减少地表和地下径流

中固体颗粒和养分含量^[23]。PETERJOHN 和 CORRELL 调查发现,磷在岸边植被带的截留率为 80%,而在农田的截留率为 41%^[24]。

1.3.5 湿地景观设计

农田中增加一些湿地面积,可有效地控制养分流入水体。有 150 个人工塘的巢湖小流域,水塘仅占不到 5%的面积,但可截留该区径流中 90%的养分^[25]。在滇池流域处理农田径流废水中就使用了人工湿地工程技术措施,由漂浮植物池、挺水植物池以及草滤带组成的人工湿地,在正常运行情况下,面源主要污染物去除 TN 率达到 60%。且工程具有投资少,效益好,运行管理方便以及抗面源污染负荷冲击能力强等优点,具有较好推广应用前景^[26]。

1.3.6 改变土地用途

从宏观角度看,农业非点源污染主要来源于土地的溶出和侵蚀,科学地进行农业土地区划,采取适宜的土地利用方式是控制农业面源污染的首要环节^[27]。有时解决高侵蚀区径流的唯一办法是将土地从耕作中解脱出来,种植永久性植被,例如将坡度大于 25° 的坡耕地退耕还林还草。LEVARON^[28]研究了不同土地利用方式控制的流域养分流失比较(见表 1),说明农用的氮、磷流失量远大于草地和林地。

表 1 不同土地利用方式控制的流域氮、磷流失比较

Tab. 1 Comparisons of nitrate and phosphorus loss in the different land utilization condition

参数	kg/hm ²		
	农田控制流	草地控制流域	林地用地流域
TN	13.80	5.95	2.74
TP	4.16	0.68	0.63
正磷酸盐	1.20	0.32	0.15
N/P 比	1.50	3.95	1.96

2 展望

磷作为水体富营养化的主要限制性元素,在解决水环境污染问题中越来越受到人们的重视。有学者对磷在土壤中的迁移机理进行了研究,并针对其污染特点提出了一些解决的方法。但是磷素非点(面)源污染问题仍比较突出,水体富营养化治理仍然是一大难题。笔者认为,从长远的角度来说,

治理磷素面源污染的关键是发展生态农业,从而实现磷素在生物、土壤、水体和大气的良性循环。但在目前应着重抓好以下几个方面的研究工作:

(1) 针对我国土地辽阔,各地自然条件迥异的特点,着重进行各地小流域磷素污染的研究。对影响小流域磷素污染的主要因素(如地形、土质、土地利用方式、降雨、生物产量)进行综合研究,开发实用模型,以确定在不减少粮食产量的前提下使污染最轻的措施。当然这项研究任务很艰巨,需要多学科的配合进行联合攻关。

(2) 加快农业非点源污染防治科研成果的集成应用推广转化。将各地已经取得的研究成果尽快落实到农业生产中去,这需要政府部门从政策和宣传教育上给予配合,研究制定相关的政策法律,规范和调控农民的生产活动。

(3) 磷素非点源污染应从源头抓起,通过开发研制控制磷肥新品种新技术及配套施用技术,筛选磷高效的作物品种资源,提高磷肥有效利用率,从根本上降低磷的污染负荷。

[参 考 文 献]

- [1] 何增耀. 农业环境科学概论[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1991.
- [2] 王庆仁. 论合理施肥与土壤环境的可持续发展[J]. 环境科学进展, 1999, 7(2): 116 - 123.
- [3] 张乃明, 余杨. 滇池流域农田土壤径流磷污染负荷影响因素[J]. 环境科学, 2003, 24(3): 155 - 157.
- [4] 朱莉·斯托弗. 水危机—寻找解决水污染的方案[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [5] 晏维金. 模拟降雨条件下沉积物对磷的富集机理[J]. 环境科学学报, 2000, 20(3): 332 - 337.
- [6] 郭伦. 降雨—产流过程与氮、磷流失特征研究[J]. 环境科学学报, 1996, 16(1): 111 - 115.
- [7] 单保庆. 降雨—径流过程中土壤表层 P 迁移过程的模拟研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(1): 7 - 12.
- [8] 单保庆. 小流域磷污染物非点源输出的人工降雨模拟研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(1): 33 - 37.
- [9] 盛学斌. 关于土壤 P 素研究的现状与趋向[J]. 环境科学进展, 1995, 3(2): 13 - 21.
- [10] 赵晓齐. 有机肥对土壤 P 素吸附的影响[J]. 土壤学报, 1991, 28(1): 7 - 13.

(下转第 465 页)

pCa,为了测定石灰位,用电位法测定 pH 值,又用化学法分析溶液中 Ca^{2+} 的浓度,再算出养分位。这种方法不仅麻烦费时,而且由于钙离子的活度系数无法精确计算以及液接电位的存在,不能得到精确的结果^[7]。后来发展了一种使用两支离子选择电极的方法,使快速精确测定石灰位成为可能^[7]。这种方法是用选择电极的方法测出钙电极、氢电极的电极电势,再通过计算得到石灰位。

既然,测出了电极电势,何必再进行计算呢?直接采用电极电势作为“养分位”的量度岂不更好!

总之,用广义氧化还原电极电势来衡量养料的有效度,具有物理意义明确、适应性强、便于测定的特点。若用广义氧化还原电极电势取代“养分位”

或许能对土壤化学的发展起到一定的推动作用。

参 考 文 献

- [1] 黄天栋. 化学与农学[M]. 北京:北京农业大学出版社,1988.
 - [2] 龚兆胜,赵正平. 广义氧化还原[J]. 化学通报,2002, 65(8):567-574.
 - [3] 杨苑臣,夏百根. 普通化学[M]. 北京:中国农业出版社,2002.
 - [4] 龚兆胜,赵正平. 广义氧化还原滴定[J]. 大学化学, 2004,17:2.
 - [5] 顾庆超,楼书聪,戴订平,等. 化学用表[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1979.
 - [6] 袁可能. 土壤化学[M]. 北京:农业出版社,1990.
 - [7] 于天仁. 土化学原理[M]. 北京:科学出版社,1987.
- =====
- (上接第456)
- [11] MAHAPATRA I C, W PATRICK J r. Inorganic phosphate transformation in waterlogged soil[J]. Soil Sci., 1969, 107:285-288.
 - [12] 高超. 面向环境的土壤磷素测定与表征方法研究进展[J]. 农业环境保护, 2000, 19(5):282-285.
 - [13] POTE D H. Relating extractable soil phosphorus losses in runoff[J]. Soil Sci. Am J, 1996, 60:855-859.
 - [14] POTE D H. Relationship between phosphorus levels in three Ultisols and phosphorus concentrations in runoff[J]. J Environ Qual., 1999, 28:170-175.
 - [15] SANYAL S K, DE DATTA S K. Chemistry of phosphorous transformations in soil[J]. Advances in Soil Science, 1991, 16:1-120.
 - [16] ABRAMS M M. Soil phosphorus as a potential nonpoint source for elevated stream phosphorus levels[J]. J Environ Qual, 1995, 24:132-138.
 - [17] BACHE B W, WILLIAMS E G. A phosphate sorption index for soils[J]. J Soil Science, 1971, 22(3):288-301.
 - [18] 高超. 农田土壤中的磷向水体释放的风险评价[J]. 环境科学学报, 2001, 21(3):344-348.
 - [19] SARPLEY A N. Determining environmentally sound soil phosphorus levels[J]. J Soil and Water Cons, 1996, 51(2):160-166.
 - [20] TROIANO J. Influence of amount and method of irrigation water application on leaching of Atrazine[J]. J. of Environ. Qual., 1993, 22:290-298.
 - [21] 张水铭. 农田排水中磷对苏南太湖水系的污染[J]. 环境科学, 1993, 14(6):24-29.
 - [22] SHARPLEY A. Identifying sites vulnerable to phosphorus loss in agricultural runoff[J]. J. of Environ. Qual., 1995, 24:947-951.
 - [23] 陈利顶. 农田生态系统管理与非点源污染控制[J]. 环境科学, 2000, 21(2):98-100.
 - [24] PETERJOHN W T, D L CORRELL. Nutrient dynamics in an agricultural watershed: observations on the role of a riparian forest[J]. Ecology, 1984, 65:1466-1475.
 - [25] YIN C. A multi-pond system as a protective zone for the management of lakes in China[J]. Hydrobiologia, 1993, 251:321-329.
 - [26] 刘文祥. 人工湿地在农业面源污染控制中的应用研究[J]. 环境科学研究, 1997, 10(4):15-19.
 - [27] 马立珊. 苏南太湖水系农业面源污染及其控制对策研究[J]. 环境科学学报, 1997, 17(1):39-49.
 - [28] LEVARON D. Mobility of agrochemicals through soil from two tillage systems[J]. J. of Environ. Qual., 1993, 22:155-161.