第 11 卷 第 4 期
1999 年 12 月

湖 泊 科 学
JOURNAL OF LAKE SCIENCES

Vol. 11, No. 4
Dec., 1999

农业非点源磷污染对水体富营养化的影响及对策*

高 超 张桃林
(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

提 要 富营养化是当今的水污染治理难题, 而农业非点源磷污染与水体富营养化的发生有着密切的关系, 目前农田生态系统中广泛存在的磷素投入过量和由此导致的土壤磷素积累加剧了磷素向水体的流失. 本文根据国内外最新研究成果, 分析了农田土壤磷素流失对水体富营养化的影响, 指出了减轻农业非点源磷污染的重要性, 对目前所采用的农业非点源磷污染重点控制区的确定方法和一些主要防治措施的效果进行了评述.

关键词 富营养化 农业非点源污染 土壤磷素流失 控制对策
分类号 X52

人类活动导致的水体加速富营养化现象是当今世界的水污染难题, 已成为世人关注的主要环境问题之一, 为解决这一难题, 各国都在控制营养物质的来源(主要是氮磷)上投入了大量的人财物力. 我国湖泊富营养化的问题也日益严重, 太湖、巢湖和滇池等富营养化严重的湖泊被定为国家水污染防治重点, 采取了"关、停、并、转、迁"重污染企业和流域内禁用含磷洗涤剂等一系列治理措施. 然而, 水体富营养化的影响因素很多, 其营养物质的来源也十分复杂. 在发达国家, 最初的治理重点是放在城市污水等点源污染上的, 但取得的成效却非常有限, 水体中营养物质富集而导致的富营养化现象却并未因此而有显著的减少[1-3]. 因此, 在过去的十多年里, 非点源污染的研究和治理日益受到重视. 大量的研究结果表明, 农业非点源磷污染对水环境的恶化有着十分显著的贡献, 富营养化现象的发生与农田土壤的磷素流失有着密切的关系[4-9].

1 农田土壤磷素流失对水体富营养化的影响

在影响初级生产力的众多营养物质中, 磷往往是淡水生态系统中最重要的限制因素[6,8,9]. 七十年代以来, 国内外的大量研究成果证明, 当发生磷富集时, 水体中的藻类能够利用大气中的碳和氮而使其初级生产力显著地提高, 而在缺磷的状态下添加碳、氮等营养元素, 水体的初级生产力却没有明显的变化[8-11]. 即使对于一些氮是限制因素的富营养化水体, 如果采取措施削减磷的输入, 使磷成为限制因素, 也可以起到改善水质的作用[12]. 因此, 要防治水体的富营养化, 最关键的是要对磷的来源加以控制.

进入水体的磷素根据其来源可分为点源和非点源两种, 点源污染主要是集中从排污口排

* 中国科学院重大基金(KZ95T-04-01)资助项目.
收稿日期: 1999-05-17; 收到修改稿日期: 1999-07-29. 高超, 男, 1962 年生, 博士研究生.

入水体的工业废水和生活污水;非点源污染则是由大范围分散污染造成的,主要包括农业非点源污染、林地和草地的养分流失、城市径流和固体废弃物的淋溶污染等.近年来尽管人们对点源污染的识别和治理能力越来越强,而农田养分的投入和农田土壤养分的积累却在不断增加,非点源污染所占的负荷越来越大,非点源磷对富营养化的贡献也愈显突出,这在发达国家表现得更为明显.在欧美等发达国家,由于基本实现了对工业和城镇生活污水等点源污染的有效治理,非点源的营养物质已成为水环境的最大污染源[2,4,13],而来自农田的氮、磷在非点源污染中占有最大份额[2,14],水体中的总磷与流域内农业用地的比例呈正相关关系[6,7,15].Toner 等在爱尔兰进行的调查表明,大多数的富营养湖泊的流域内不存在明显的点源污染[4];丹麦内陆湖泊的总磷含量在 80 年代有所降低,但这并没有使水质明显改善,因为其它来源的磷(主要是农田排磷)仍足以使许多湖泊中磷浓度超过 $100\mu g\cdot L^{-1}$ 这一危险浓度[1].其中农业非点源磷占河流中磷来源的一半以上,农业用地为主的流域内非点源磷年发生量($0.29kg\cdot hm^{-2}$)相当于自然流域($0.07kg\cdot hm^{-2}$)的 4 倍[5].据估计,在欧洲一些国家的地表水体中,农业排磷所占的污染负荷比约为 24% - 71%[16].美国环保署在提交给国会的报告中指出,大量的农田养分流失是造成内陆湖泊富营养化的主要原因,1990 年的调查显示,57% 的湖泊受到农田养分流失的严重影响.

目前我国对工业和生活污水的治理尚处于起步阶段,非点源污染的贡献仍然占有较大的比重,农业非点源磷的负荷主要决定于流域内的气候、水文、土地利用和人口密度等因素.如在滇池的入湖总磷中,农业非点源磷占 28%,而在南四湖这一比例高达 68%[17],

2 农田土壤磷素积累与土壤磷素流失

由于普遍存在的磷素投入量大大高于其带出量[4,18],农田生态系统中的磷素盈余使得土壤中的总磷和有效磷的水平不断上升[6,19,20].据分析,每年 20 - 45 $kg\cdot hm^{-2}$ 的磷素盈余量,使得过去 40 年间欧洲农田土壤中磷素的积累量一般都达到了 800 - 1500 $kg\cdot hm^{-2}$[21].美国威斯康星州土壤速效磷的水平 20 年间提高了 40%[6];爱尔兰耕作土壤中的总磷平均含量在过去的 40 年间增加了 5 倍,速效磷增加了 8 倍[4].根据中国科学院台站网络"八五"期间对我国农业土壤磷素平衡状况的研究,我国农田土壤的磷素水平于 70 年代中期开始由赤字转为盈余,分布于全国各地的典型地区农田土壤的磷素收入均超过支出的 1 倍以上.据计算,从 1949 - 1992 年,我国累计施入农田的磷肥有 $7880.9\times10^4t(P_2O_5)$,其中大约有 $6000\times10^4t(P_2O_5)$ 积累在土壤中[22].北京地区农田土壤磷素在 80 年代积累明显,近年来速效磷平均含量以每年 $1mg\cdot kg^{-1}$ 的速度增长[20].

土壤磷素的积累必然导致径流中磷浓度的提高,不同土壤条件、耕作制度和管理水平下的模拟实验和实测结果都已经证明土壤尤其是表层土壤的速效磷水平与径流中的各种形态的磷含量呈显著相关关系[6,23,24],尽管这一相关性的大小受土壤类型和管理水平等多种因素的影响.有些研究者还籍此建立了模型,根据表土中有效磷的含量预测随径流流失的磷的数量[24],取得了较好的实际效果.

农田土壤流失的磷分为溶解态磷(DP, Dissolved P)和颗粒态磷(PP, Particulate P),区分这两种形态磷的标准方法是用 $0.45\mu m$ 的滤纸过滤.溶解态磷主要以正磷酸盐形式存在,可为藻类直接吸收利用;颗粒态磷包括含磷矿物、含磷有机质和被吸附在土壤颗粒上的磷,可成为

溶解态磷的潜在补给源.

土壤中颗粒态磷的流失是一个复杂的过程,受到与降雨事件、土壤性质及管理水平等密切相关的径流和侵蚀过程的影响,在侵蚀过程中,粘土和有机胶体等含磷量较高的细粒部分更易被剥离和搬运,从而导致径流泥沙中的磷含量高于被侵蚀土壤中的含磷量,即所谓的磷富集现象.一般来说,草地和林地径流中的磷以溶解态磷为主,农田土壤流失总磷中颗粒态磷占主要部分(75% - 95%),但水土保持耕作法与常规耕作法相比,总磷显著减少,溶解态磷数量可超过颗粒态磷[7].

农田排水中的总磷含量一般在 0.01 - 1 $mg \cdot L^{-1}$,溶解态磷不超过 0.5$mg \cdot L^{-1}$,农田土壤中磷的流失量只占化肥施用量的 2%左右,一般都低于 1 $kg \cdot hm^{-2} a^{-1}$[23],从农学意义上讲,这一流失量对农业经济的影响并不大,但由此而产生的环境质量问题却不容忽视.根据 Archer 等[5]的分析,引起水体富营养化的磷浓度阈值按 0.05$mg \cdot L^{-1}$计算,那么对于径流深度为 200mm 的流域来说,磷年流失量只要达到 0.1$kg \cdot hm^{-2}$就足以导致受纳水体的富营养化.

3　农业非点源磷污染重点控制区的确定

虽然大量的实验结果表明土壤磷素水平与农田磷流失数量存在显著的相关关系,但目前还难以在较大区域内建立土壤磷素水平与磷素流失量之间的较为准确的对应关系,以便制定相应的农田土壤磷素上限值,作为控制农田生态系统磷素投入的依据.首先,目前所采用的土壤磷素尤其是有效磷的各种测定方法,主要是用来衡量土壤对作物的供磷能力,而不是主要用来研究其环境行为和评价其潜在流失强度的,因而不能简单地根据现有资料来判断特定地区土壤磷素水平是否已经达到了严重危害地表水环境质量和程度.虽然目前已经提出了多种面向环境的土壤磷素测定方法[25],但是离实用还有一定的距离.更为重要的是,由于磷素的流失受土壤、地形、气候、水文、土地利用状况和管理水平等众多因素的影响,是一种时空差异性非常显著的过程,仅仅依据土壤磷水平来评价特定地区土壤磷素潜在流失强度并不能反映问题的实质.

Lemunyon 等[26]提出的磷指数系统(PIS, Phosphorus Indexing System)是在综合考虑了土壤磷素水平、磷肥施用量及施用方法等源因子和土壤侵蚀、径流强度等传输因子的基础上建立起来的,Sharpley[27]又对该方法进行了完善.该方法首先将影响土壤磷素流失的主要因素根据其对土壤磷素流失的贡献大小赋与相应的权重,并将各因素划分为若干个等级,每个等级指定相应的分值(表 1).对于特定的区域,可根据表 1 逐项计算并进行累加得出区域内各土地单元(一般以流域为单位)的磷潜在流失强度指数(为一无量纲的值),然后根据这一指数值进行土壤磷素流失强度分级(表 2),强度高和很高的单元就是农业非点源磷污染的重点控制区.

Sharpley[27]将 30 个小流域的 PIS 计算值与总磷流失量实际监测值进行了比较,结果发现二者的相关性很好($\gamma^2 = 0.7$),说明用 PIS 系统进行区域性的磷流失强度评估并由此进行农业非点源磷污染的重点控制区的辨识工作是行之有效的.

该方法的特点是比较全面地考察了导致土壤磷素流失的主要因素,且不使用复杂的数学模型和计算方法,简便有效,并可充分发挥 GIS 技术在连接空间和属性数据方面的强大功能,在目前条件下不失为一种较为实用的评价方法.

表1 根据点位特征评估磷潜在流失强度的磷素指数系统(PIS)[27]*

Tab.1 The P indexing systems for rating the potential P loss in runoff from site characteristics

点位特征(权重)	磷潜在流失强度值				
	无(0)	低(1)	中(2)	高(4)	很高(8)
土壤侵失强度(1.5)	<10	10-100	100-500	500-5000	>5000
径流深度(0.5)	<0.1	0.1-1.0	1-5	5-10	>10
土壤速效磷水平(1.0)	<10	10-20	20-40	40-65	>65
化学磷肥施用量(0.75)	不施用	1-15	16-45	46-75	>75
化学磷肥施用方法(0.5)	不施用	施入5cm以下土层	开始耕种前拌施	耕种前三个月以上拌施或耕种前三个月内面施	耕种前三个月以上面施
有机磷肥施用量(0.5)	不施用	1-15	16-30	31-45	>45
有机磷肥施用方法(1.0)	不施用	施入5cm以下土层	开始耕种前拌施	耕种前三个月以上拌施或耕种前三个月内面施	耕种前三个月以上面施

* 表中所用单位:土壤侵蚀强度为 $kg \cdot hm^{-2}$;径流深度为 cm;土壤速效磷(Mehlich-3)水平为 $mg \cdot kg^{-1}$;磷施用量为 $kg \cdot hm^{-2}$.

4 控制农业非点源磷污染的主要措施

农业非点源污染无法采取集中治理的方法加以解决,但可以根据特点采取针对性的措施减轻其危害.减少农田土壤磷素流失的措施可归纳为两个主要方面,即控制磷素向农田生态系统的投入(养分管理)和减少磷素从农田生态系统的输出(土地管理)[6,28-31].

4.1 养分管理

养分管理的目的是控制土壤养分投入的数量,改善养分投入的方法,使土壤中的养分水平保持在既能满足作物生长的需求,又不致于对环境产生显著的危害.实现养分的收支平衡和优化肥料施用方法是养分管理的两个关键方面[22].

表2 土壤磷素流失强度分级

Tab.2 Site vulnerability to P loss as a function of total index values

土壤磷流失强度	PIS值分级
低	<10
中等	10-18
高	19-36
很高	>36

实现养分的收支平衡的目的在于减少磷素盈余,避免土壤磷素的过量积累.为此,必须掌握研究区主要农田生态系统的磷素收支状况,以此作为确定磷肥施用量的依据.对于已存在严重水体富营养化问题的流域,施入的磷肥量原则上不应超过作物所带走的磷的数量.在确定有机肥施用量时,不仅要考虑作物对氮的需求,还要考虑作物对磷的需求.

施用于农田土壤中的化肥磷流失受施用量、施用时间、磷肥品种和施用方法的影响,与产流强度和地面覆盖状况也有很大的关系,因此优化肥料施用方法是减少土壤磷素流失的有效措施.应根据作物生长发育需要及其特点确定合适的施用量和施用时间,尽量采用埋施方法.此外还应根据当地气候特点安排施肥时间,避免在大的降雨事件发生前施肥.

4.2 土地管理

减轻农田生态系统的土壤流失即可减少土壤中的磷尤其是颗粒态磷的流失,因而所有水土保持措施均可起到减少磷流失的作用,应大力提倡,只是在应用中要注意到水土保持耕作法

有时可能会增加溶解态磷的流失和硝态氮对地下水的污染[6],这就要求深入分析当地的实际情况,抓住该地区农业非点源污染的主要问题.

非点源污染的发生、运移和转化与景观格局之间有着十分密切的关系,通过对景观要素的优化组合或引入新的成份,调整或构建新的景观格局,增加景观的异质性和稳定性,可以显著地降低非点源污染的发生和由此产生的危害,同时还可以创造出优于原有景观生态系统的经济和生态效益,形成的新的高效、和谐的人工—自然景观.如 Stoorvogel[32] 和傅伯杰等[33] 的研究都表明,不同土地利用结构对农田土壤养分的分布和平衡有着显著影响,对土地资源进行优化配置,可以起到提高水土保持能力和减少养分流失的效果.目前在国外已经广泛采用的一些方法如在河岸和湖滨建立的绿化区、缓冲带等,可使经过的径流降低流速,导致悬浮的污染物发生沉淀,并增加溶解态的污染物被土壤吸附或被植物吸收的机会,不仅可以去除营养物质,还可为野生动物提供理想生境[29,34,35].在一些重点保护的水体设置前置库(或称预贮存库),让含有污染物质的入湖水预先经过一个或若干个前置库,污水在其中停留,可延长滞留时间,充分利用一定气温和光照下的生物净化作用和水力滞留的物化作用,削减进入水体中的污染负荷.尹澄清等发现,我国南方地区农村广泛分布的多塘系统,除具备灌溉、饮用和发展水产养殖等多种功能外,还对减轻 N、P 等农业非点源污染负荷有非常显著的功效,一般可去除 90% 以上的过境营养物质[36].

我国地少人多,为保障粮食供给,农田生态系统的磷素投入在相当长的时间内还要呈上升趋势,农田土壤中的磷素还将进一步积累.通过优化景观格局,合理配置土地资源来提高土壤保持养分的能力,减轻农田土壤磷素流失,具有实用、高效和投资少的特点,有着广阔的应用前景.发达国家目前采取的各种行政、法律和经济的手段,鼓励和刺激农民运用更加有利于环境的耕作方法、施肥制度和土地利用方式,取得了显著成效,值得我们认真借鉴.

参 考 文 献

1 Kronvang B, G Δrtebjerg, R Grant, *et al*. Nationwide monitoring of nutrients and their ecological effects: state of the Danish aquatic environment. *Ambio*, 1993, **22**:176 - 187

2 Van der Molen D T, A Breeuwsma, P C M Boers. Agricultural nutrient losses to surface water in the Netherlands: impact, strategies, and perspectives. *J Environ Qual*, 1998, **27**:4 - 11

3 Edwards A C, P J A Withers. Soil phosphorus management and water quality: a UK perspective. *Soil Use and Management*, 1998, 14(supplemnet): 124 - 129

4 Foy R H, P J A Withers. The contribution of agricultural phosphorus to eutrophication. Proceedings No. 365 of the Fertilizer Society, 1995

5 Archer J R, M J Marks. Control of nutrient losses to water from agricultural in Europe. Proceedings No. 405 of the Fertilizer Society, 1997

6 Sharpley A N, S C Chapra, R Wedepohl, *et al*. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: issues and options. *J Environ Qual*, 1994, **23**:437 - 451

7 Sharpley A N, P J A Withers. The environmentally-sound management of agricultural phosphorus. *Fertilizer Research*, 1994, **39**:133 - 146

8 OECD. Eutrophication of waters: monitoring, assessment and control. Paris, 1982

9 Freedman B. The impacts of pollution and other stresses on ecosystem structure and function. San Diego: Academic Press Inc, 1989

10 Schindler D W. Eutrophication and recovery in experimental lakes: implication for lake management. *Science*, 1974, **184**: 897 - 899

11 Schindler D W. The evolution of phosphorus limitation in lakes. *Science*, 1977, **195**:260 - 262

12 Daniel T C, A N Sharpley, D R Edwards, *et al*. Minimizing surface water eutrophication from agriculture by phosphorus management. *J Soil & Water Conservation*, 1994, **49**:30 - 38

13 Parry R. Agricultural phosphorus and water quality: a U.S. Environmental protection agency perspective. *J Environ Qual*, 1998, **27**:258 - 261

14 Carpenter S R, N F Carcao, D L Correll, *et al*. Nonpoint of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 1998, **8**:559 - 568

15 Kronvang B, P Graesboll, S E Larsen, *et al*. Diffuse nutrient losses in Denmark. *Water Science and Technology*, 1996, **33**: 4 - 5, 81 - 88

16 Vighi M, G Chiaudani. Eutrophication in Europe: the role of agricultural activities. In: Hodgson E ed. Rev. Environ. Toxicol. Vol 3. Amsterdam: Elsevier, 1987.213 - 257

17 朱兆良.肥料与农业和环境.大自然探索,1998,**17**(4):25 - 28

18 鲁如坤,刘鸿翔,闻大中等.我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究(Ⅲ).全国和典型地区养分循环和平衡现状.土壤通报,1996,**27**(5):193 - 196

19 Daniel T C, A N Sharple, J L Lemunyon. Agricultural phosphorus and eutrophication: a symposium overview. *J Environ Qual*, 1998, **27**:251 - 257

20 沈 汉.从农田土壤养分的10年演变看北京市今后施肥方向与策略.北京农业科学,1996,**14**(3):1 - 4

21 Behrenolt H, A Boekhold. Phosphorus saturation in soils and groundwaters. *Land Degradation and Rehabilitation*, 1993, **4** (4) 233 - 243

22 鲁如坤等.土壤 - 植物营养学:原理和施肥.北京:化学工业出版社,1998

23 Heckrath G, P C Brookes, P R Poultion, *et al*. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in theh Broadbalk experiment. *J Environ Qual*, **24**:904 - 910

24 Pote D H, T C Daniel, D J Nichols, *et al*. Relationship between phosphorus levels in three Ultisols and phosphorus concentrations in runoff. *J Environ Qual*, 1999, **28**:170 - 175

25 Sims J T. Phosphorus soil testing: innovation for water quality protection. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 1998, **29**(11 - 14):1471 - 1489

26 Lumunyon J L, R G Gilbert. The concept and need for a phosphorus assessment tool. *J Prod Agric*, 1993, **6**:483 - 496

27 Sharpley A N. Identifying sites vulnerable to phosphorus loss in agricultural runoff. *J Environ Qual*, 1995, **24**:947 - 951

28 高 超,张桃林.欧洲国家控制农业养分污染水环境的管理措施.农村生态环境,1999,**15**(2):50 - 53

29 Haycock N E, A D Muscutt. Landscape management strategies for the control of diffuse pollution. *Landscape and Urban Planning*, 1995, **31**:313 - 321

30 Ribaudo M O. Options for agricultural nonpoint source pollution control. *J Soil & Water Conserv*, 1992, **47**: 42 - 46

31 Withers P J A, S C Jarvis. Mitigation options for diffuse phosphorus loss to water. *Soil Use and Management*, 1998, **14** (supplement):186 - 192

32 Stoorvogel J J. Optimizing land use distribution to minimize nutrient depletion: a case study for the Atlantic zone of Costa Rica. *Geoderma*, 1993, **60**(1 - 4):277 - 292

33 傅伯杰,马克明,周华峰等.黄土丘陵区土地利用结构对土壤养分分布的影响.科学通报,1998,**43**(22):2444 - 2448

34 Jordan T E, D L Correll & D E Weller. Nutrient interception by a riparian forest receiving inputs from adjacent cropland. *J Environ Qual*, 1993, **22**:467 - 473

35 Line D E, R A Mclaughlin, D L Osmond, *et al*. Non-point sources. *Water Environment Research*, 1998, **70**(4): 895 - 912

36 Yin C, M Zhao, W Jin, *et al*. A multi-pond system as a protective zone for the management of lakes in China. *Hydrobiologia*, 1993, **251**:321 - 329

Contribution of Agricultural Phosphorus Losses to Eutrophication of Waters and Its Controlling Strategies

GAO Chao　　ZHANG Taolin

(*Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210008)

Abstract

Phosphorus from agricultural non-point sources has been identified as the main cause of freshwater eutrophication throughout the world and contributes a large share to the water quality deterioration. With excessive amount of phosphorus being input to the agro-ecosystem, the accumulation of P in cultivated soils has increased the potential for P loss in agricultural runoff and drainage. This paper attempts to summarize the research activities focused on the build-up of P in soil, the interaction of P with soils and its transport in surface and subsurface drainage. Phosphorus indexing system(PIS) used for identifying sites vulnerable to phosphorus loss in agricultural runoff is introduced. Widely practiced mitigation options include untrient budgeting, input management, soil conservation, land use management and the establishment of vegetated riparian zones, buffer strips and sedimentation ponds which have been proved to be very cost effective in a Chinese context.

Key Words　Eutrophication, non-point source pollution, loss of soil phosphorus, mitigation options