

农业面源污染影响因子及控制技术的研究现状与展望^①

陶春, 高明*, 徐畅, 慈恩

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 面源污染的严重性受到国内外普遍关注, 并已成为国际水环境问题研究的活跃领域。本文在简要介绍农业面源污染发生机理和特征的基础上, 首先综述了土地利用方式、农田耕作、田间水肥管理、地形地貌、气候水文特征和社会经济因素等农业面源污染影响因子的研究现状, 然后从人工湿地技术、前置库技术、缓冲带技术、水土保持技术、农田养分管理技术和农业生态工程技术等几个方面阐述了近年来国内外农业面源污染控制技术的最新研究进展, 并结合我国实际提出今后农业面源污染的研究重点。

关键词: 农业面源污染; 影响因子; 控制技术

中图分类号: S152.4

人类活动引起的水体富营养化现象是当今世界水污染治理的难题, 并已成为全球最重要的环境问题之一。从引起水体富营养化等水体污染现象的污染源类型看, 可分为点源污染与非点源污染。非点源污染一般来自农业、森林砍伐、矿业、建筑与城市等几个方面, 其中对水体危害最大、程度最重的仍数农业面源污染。

许多发达国家已证实农业面源污染是导致目前水质环境恶化的主要原因之一。研究发现^[1], 农业已经成为全美河流污染的第一污染源, 农业面源污染占污染总量的 46% ~ 56%。在欧洲、日本等国也发现农业面源污染对水环境污染的贡献率在 50% 以上^[2-5]。

在我国, 至 20 世纪 70 年代, 我国各大湖泊、重要水域的水体污染, 特别是水体的 N、P 富营养化问题出现急剧恶化。张宝文^[6]的研究发现, 目前我国化肥年使用总量达 4 124 万 t, 平均每公顷施用量达 400 kg, 远远超过发达国家为防止化肥对水体污染而设置的 225 kg/hm² 的安全上限。农药年施用量达 30 多万 t, 使全国 933.3 万 hm² 的耕地遭受不同程度的污染。可见, 我国农业面源污染的深度和广度已经远远超过发达国家, 且潜在的压力更是其他国家无法与之相比的。因此, 探索农业面源污染的影响因素, 开展其控制技术等方面的相关研究已经刻不容缓。

1 农业面源污染特征分析

1.1 农业面源污染的发生机理

面源污染的产生是由自然过程引发的, 并在人类活动影响下得以强化的过程。降雨径流过程是造成面源污染的最主要的自然原因, 而人类的土地利用活动才是面源污染的最根本的原因。从 20 世纪 50 年代以来, 许多学者从动态过程的角度对农业面源污染进行了深入研究。作为一个连续的动态过程, 农业面源污染的形成, 主要有降雨径流过程、土壤侵蚀过程、地表溶质溶出过程和土壤溶质渗漏过程, 这 4 个过程相互联系、相互作用^[7]。

1.2 农业面源污染的发生特点

与点源污染相比, 农业面源污染具有时空范围更大, 发生机理更复杂, 受降雨、径流等因素支配, 发生时间、地点随机性, 发生方式间歇性和排放方式与途径不确定性等, 污染负荷时空变异性, 监测、模拟和控制困难等特征^[8-10], 因此增加了农业面源污染研究、治理和管理政策制定的难度。

2 农业面源污染的影响因子

农业面源污染影响因素是非常复杂的, 涉及到人类活动、自然地理和社会经济等诸多方面^[11-12], 主要包括以下几个影响因子。

2.1 土地利用方式

土地利用方式是影响面源污染的关键因素, 综合反映人类活动对自然环境的作用, 土地利用方式对土壤、植被、径流及化学物质输入、输出等因素具有影响, 因而不同土地利用类型所产生的面源污染差异巨

①基金项目: 国家科技支撑计划项目(2007BAD87B10, 2008BABA7B09)资助。

* 通讯作者(gaoming@swu.edu.cn)

作者简介: 陶春(1984—), 男, 重庆人, 硕士研究生, 主要从事土壤质量与环境方面研究。E-mail: taochun2008@163.com

大。宋泽芬等^[13]对澄江尖山河小流域4种不同土地利用方式的研究表明,不同土地利用方式下,土壤侵蚀泥沙中的N、P输出量依次为:农地>人工林>灌草丛>次生林。孟庆华等^[14]通过两年的定位研究表明,不同土地利用方式的养分输出总量有较大变异,变化趋势为坡地农田>梯田农田>梯田果园>坡地果园,还指出坡地果园是较理想的土地利用方式。

不适当的土地利用方式和农田管理模式会导致土壤侵蚀和过量的N、P随地表径流流失,从而形成对大面积水体面源污染。一方面,人类开垦土地,砍伐森林,使他们变为农田、牧场、城市、工业区。这些土地利用变化活动改变了地表植被覆盖,改变了土壤的质地、成分,改变了土壤的渗透和蒸发特征,改变了影响径流汇集的地形特征,其结果就是改变了流域的水文和侵蚀过程,加剧了水土流失,对水体水质造成了威胁。另一方面,人类在进行农业活动中,大量施用化肥、农药等农业化学药品。这些化学药品中只有很少一部分被农作物吸收,其余大部分残留在土壤中,成为潜在的污染源。苏跃等^[15]对不同土地利用方式下地表径流和浅层地下水分析表明耕地地表径流和浅层地下水中营养物质明显高于林地和草地,且土地利用由林地变为耕地后,地下水质量出现一定程度的下降。吕唤春等^[16]的研究表明红薯地和园地等有人工耕种的坡地N、P流失浓度较大,草地和林地等受人工影响干扰少的土地利用方式N、P流失浓度相对较少。而在小流域内土地利用集约越高,N和P输出水平也越高^[17]。由此可见,不适当的土地利用方式,主要是通过改变土壤下垫面特性影响面源污染的发生。

2.2 农田耕作、农事活动和田间水肥管理

耕作方式对面源污染也有很大的影响。翻土耕作容易造成土壤结构破坏,表层土质疏松,地表径流过程中水土流失现象严重;保土耕作(如免耕、少耕),通过改善土壤的入渗性能、土壤物理结构,减少地表径流及雨点和径流对土壤的冲击与侵蚀来影响水土和农用化学物质的流失,能有效地控制水土流失。研究表明,耕作增加 NO_3^- -N淋失21%^[18]。免耕比传统耕作减少一半 NO_3^- -N积累;耕地修整导致高的淋洗潜力,秋季翻耕的比不上免耕的土壤N淋失潜力高^[19]。刘刚才等^[20]研究表明在降雨强度较大的情况下,聚土免耕(即沿坡面等高线,横向按3尺垄面3尺沟,6尺为一组的垄沟相间横厢划线,然后在准备起垄的3尺厢面上施入有机渣肥,深耕一次混匀,将3尺准备作沟的空行内大部表土聚于厢面,使成弧线,垄上实

行免耕或少耕)。耕作制度的产沙强度明显较常规种植的小,但是当土壤达到饱和后,聚土免耕的径流强度与常规种植的差异较小,因此,聚土免耕能明显防治径流流失是有限的。不同农田耕作系统(传统耕作、免耕留茬和免耕无茬耕作)对农药流失的影响研究表明:免耕和少耕农田产生了较多的地表径流,同时导致农药和养分的地表流失较多;而在传统耕作农田中,养分随地下径流流失较多^[21]。

化肥和农药是保证农业生产和提高农作物产量并在短期内无法替代的农用化学品,其使用规模直接决定TP、TN、有毒有机物和无机物的产生量^[22]。化肥和农药的施用量、施用方式和施用时间都与化肥的利用率密切相关。当化肥施用量达到最佳施用量时,农作物对化肥的吸收利用率将达到最高,其产量也最高;如果农田中使用的化肥长期超过农作物收获携带的养分含量,将导致N、P在土壤中不断富集,其结果是导致N、P流失危险性加大。对农药、化肥使用与农业面源污染的关系研究发现:土壤中N素的利用效率与使用的深度和方式具有密切的关系^[23]。不同施肥方式养分吸收的差异意味着养分流失潜力不同,如固态、液态化肥施用方式对养分的流失影响较大,固态施肥时,土壤中有效N将比液态施肥持续更长的时间^[24]。异丙甲草胺和阿特拉津施用后,若7天内发生降雨,将导致7%阿特拉津和5%异丙甲草胺流失;若降雨推迟,农药流失量将大大降低(一般只有使用量的0.1%~0.2%)^[25]。

农田灌溉方式与养分、农药流失密切相关,一般按下列顺序递增:喷灌<淹灌<沟灌^[26]。曾阿妍等^[27]的研究表明,夏浇时,由于植物吸收、灌水量小等因素,基本不产生污染,而秋浇期间,由于灌水量大、土地裸露成为面源污染产生的主要时期。不同土壤、灌溉方式的 NO_3^- -N流失不同。与有灌溉的单一种植小麦或高粱农作物系统相比,小麦、高粱两季轮作将导致更多的 NO_3^- -N流失。与喷灌和精确灌溉相比,无论沙粒土壤区沟灌还是黏粒土壤区沟灌方式均将导致更多的养分流失。水肥管理的科学程度同样影响农业面源污染,如污水灌溉、农田漫灌都可能在农田径流过程中把污染物质转移汇入水体^[22,28-29]。

2.3 地形地貌、土壤植被

地形地貌和土壤植被主要是通过改变降雨和地表径流下垫面影响农业面源污染。地形有坡长和坡度两方面因素。土壤流失量随坡度的增大而增大。当地面有一定坡度,坡长越长,汇流的流量越大,流速也将增加,从而水土流失也越严重,携带的污染物质就

越多。但是当雨量不大,坡度较缓,土壤吸水较强时,随坡度的增长就会产生径流退化现象,径流和泥沙流失量减少^[30]。

植被特点决定影响农业面源污染的径流下垫面条件。植被对降水有一定截持作用,但只作用于降水初期,主要是改变降水性质和土壤表层结构,减小雨水对土壤的冲击力,能有效地减少径流中的悬浮物质。植被覆盖具有强大的水土保持功能,并呈现出林-灌-草递减的规律;植被外在的水土保持功能是其内部各个垂直层次截留降雨、拦蓄径流从而削减降雨侵蚀动能和径流冲刷作用的综合体现。植被的各个垂直层次对其水土保持功能的发挥各具重要的作用^[31]。森林植被和土壤系统联合作用,将大量的地表水快速转化为慢速径流,从而减少土壤侵蚀,降低固体悬浮物的产生量;植被还可以吸收慢速径流中大量营养物质,减少对水体营养负荷量。雷孝章等^[32]借助大量的观察资料分析表明坡面森林可使固体污染物减少 60% 以上,林地营养元素损失减少 30% ~ 50%,森林覆盖率高的流域水质明显优于覆盖率低的流域。

2.4 气候、水文特征

水土流失和地表径流是农业面源污染产生的主要条件。所有的气候因素对水土流失都有相应的影响,其中降水与农业面源污染关系最为密切。一般是年降水量越大,水土流失就越严重,污染程度越高,是因为面源污染主要是靠地表径流运输和转移,而降雨的大小、强度、时空分布对地表径流的影响很大。降雨强度和降雨过程对水土流失起到决定性作用。傅涛和倪九派^[33]采用室内模拟降雨装置对三峡库区黄色石灰土养分流失进行研究表明,雨强与径流的养分浓度和泥沙的养分浓度无关,但可能影响其峰值出现时间,并与流失量成正比。农业面源污染水文条件主要受到暴雨和洪水影响。暴雨次数越多,洪水面积越广和洪水量越大,农业面源污染物的总数量和污染范围就越大。干湿沉降不仅会加重水体 N、P、重金属等污染物含量,还直接对生态系统造成破坏。湿沉降(酸雨),通过改变土壤酸度影响重金属活动,特别是 Hg 的生物有效性^[34]。

2.5 社会经济因素

社会经济因素主要通过社会经济活动影响土地利用方式、农业生产方式及管理水平、产业结构、农村庭院养殖集中程度和规模、居民环境保护意识等影响面源污染物的排放量^[35-36]。随着社会经济的快速发展,人口不断增长,耕地不断缩减,工业化和城市化进程的加快,以及不合理的农业生产方式,使水环境

面临巨大的压力,环境意识落后、治理能力不足、管理体制不合理是水环境恶化的根本原因。农村人口现状及增长速度直接影响耕地利用方式及利用程度、农业面源污染的产生总量^[37]。在我国太湖流域,水环境与社会经济因子的关系研究结果表明:太湖水体水质变化及整个流域的水质环境变化与该流域的人口增长、经济发展、土地利用、城市化发展之间存在着较好的对应关系^[38]。

3 农业面源污染的工程拦截技术

对于面源污染的控制,目前普遍认为由美国环保署(USEPA)提出的“最佳管理措施(BMPS)”是值得采用的。最佳管理措施是指为预防和减少全国水体污染而采取的行动计划、预防措施、维护措施及其他的管理措施。现已提出并应用的有人工湿地、植被过滤带、草地缓冲带、岸边缓冲区、免耕少耕法、综合病虫害防治、灌溉水的生态化、生物废弃物的再利用、防护林、地下水位控制等方法 and 措施。BMPS 因其高效、经济、符合生态学原则,现已得到广泛的应用。

3.1 人工湿地技术在面源污染中的应用

人工湿地是 20 世纪 70 年代发展起来的新型污水处理和水环境修复技术,常为由土壤或人工填料(如碎石等)和生长在其上的水生植物所组成的独特的土壤-植物-微生物-动物生态系统。目前人工湿地已被应用于工业污水、生活污水、养殖场污水、城市污水和地表水的处理^[39-40]。与传统的二级生化处理相比,人工湿地具有 N、P 去除能力强,投资低,处理效果好,操作简单,维护和运行费用低等优点,作为污水处理技术已被广泛应用^[41]。1952—1994 年使用植物或人工湿地治理各类污染的试验和工程报道共 45 例^[42]。但人工湿地污水处理技术还存在较严重的二次污染问题,收获的植物茎叶无法妥善处置;工程占地面积大,在我国人多地少的环境,特别是在三峡库区土地资源紧缺的地方更无法大面积实施人工湿地技术,以改善库区生态环境;受气候条件限制较大,部分水生植物不耐寒,易受病虫害影响,容易产生淤积和饱和现象等。受这些因素的影响,限制了人工湿地污水处理技术大规模的推广应用。

3.2 前置库技术在面源污染中的应用

20 世纪 50 年代后期,前置库就开始被作为流域面源污染控制的有效技术进行开发研究,前置库技术是利用水库的蓄水功能,将因表层土壤中的污染物(营养物质)淋溶而产生的径流污水截留在水库中,

经物理、生物作用强化净化后,排入所要保护水体^[43]。前置库这种因地制宜的水污染治理措施,对控制面源污染,减少湖泊外源有机污染负荷,特别是去除入湖地表径流中的N、P安全有效^[44]。对于控制面源污染具有广泛的应用前景。在面源污染治理中发挥了巨大的作用,也取得了很大的效益,但是前置库技术存在着植被二次污染防治、不同季节水生植被交替和前置库淤积等问题。

3.3 缓冲带和水陆交错带技术在面源污染中的应用

缓冲带,全称保护缓冲带,它指邻近接纳水体、有一定宽度、具有植被、在管理上与农田分割的地带^[45-46]。滨岸缓冲带的植物对农田地表径流、废水排放、地下径流及深层地下水流中携带的营养物质、沉积物、有机质等污染物质具有良好的吸收、沉淀功能,可以在其进入水体之前起到一个净化、过滤的缓冲作用^[47-48],形成一个阻碍污染物质进入水体的生物和物理障碍,从而达到改善水质的目的,是控制农业面源污染的一个最有效的形式。Lowance 等人^[49],在滨岸缓冲带对农田径流中 N、P 去除作用的研究中也表明,农田地表径流在经过滨岸缓冲带之后,剩余的 N、P 总量仅为原始值的 1/7。Jaana 等^[50]研究发现,经过缓冲带后,农业地表径流中的 P 可以减少 27% ~ 97%,且缓冲带的减 P 效应随其带宽的增加而增加。张刚等^[51]在苏南太湖地区研究表明,稻季缓冲带拦截 N、P 径流损失效果明显,拦截量占田面水中总 N 的 31.7% ~ 50.9%,总 P 的 1/2 以上;对渗漏水中 N、P 的水平迁移具有同样明显的拦截效果。同时,缓冲带对不同种类的农药也均具有较好的去除效果,可以防止水体中有害物质的聚集。Geert 等^[52]通过对农业用地与水体间设置缓冲带的研究发现,缓冲带能有效减少在施药过程中杀虫剂向沟渠的漂流情况,及其对水生生物的影响。其中不同种类物质的去除效果差异较大,甚至于在不同实验中,同种农药的去除率也相差较大。这也表明了缓冲带效果不稳定的特性。

水陆交错带是指内陆水生态系统和陆地生态系统之间的界面区^[53]。对经过水陆交错带的物质流和能量流有拦截和过滤作用,其作用类似于半透膜对物质的选择性过滤作用。尹澄清等^[54]发现作为陆地/源头水交错带的人工多塘系统具有很强的截留来自农田径流和面源污染物的生态功能。其他的研究者发现湖边的灌木和草本水生植物也有类似的作用。在白洋淀进行的野外实验结果表明湖周水陆交错带中的芦苇群落和群落间的小沟都能有效地截留陆源营养物质^[55]。污染物质通常在水陆交错带中富集,如果它不被

转移到交错带以外,它在一定条件下又可以部分释放出来进入水体^[55]。水陆交错带可以被看作一个缓冲带,其缓冲容量受交错带的宽度、植被及土壤中的腐殖质含量影响。被截留的比率受径流中营养物质含量、酸碱度、水中有机质含量、气候及周围土地利用格局的影响。截留量也受径流通过水陆交错带的方向、形式和流速变化影响。

3.4 水土保持技术在面源污染中的应用

农业面源污染主要是由地表径流引起,因而治理水土流失是解决水体污染的根本之策。水土保持技术一方面使表土稳定化或以植被覆盖来减少雨点对表土的冲击,另一方面则降低坡度,以渠道化手段分散径流或降低流速,以减弱径流的侵蚀力,并减少雨水在地面溢流的数量^[56]。水土保持技术所包含的工程措施、农业技术措施和生物措施不但对植物吸收、土壤胶体吸附与微生物降解途径有促进作用,而且对径流淋失与挥发等途径有抑制作用。可见,水土保持措施是防治非点源污染,保障饮水安全的重要手段。

工程措施主要是梯田、植草水道和水渠改道。梯田工程是一种水土保持坡面治理工程措施,是控制坡耕地水土流失、保持水土和实现农业高产与稳产的根本措施之一。梯田工程可以拦蓄天然降水以及上部来的径流和泥沙,能够使得土壤水分和肥力有所增加,改变土壤的理化性状、微生物状况、土壤水分状况、减蚀蓄水作用及微地形小气候等,具有良好的水土保持效益和生态效益。试验表明,梯田的径流系数仅为 2.9%,同顺坡种植相比,其拦蓄径流率达 92.1%,拦沙率达 99%,具有显著的保持水土功效^[57]。水平梯田可以减少土壤流失的 94% ~ 95%,营养物质流失的 56% ~ 92%^[58]。

耕作措施主要是通过保护土壤的表面来减轻土壤侵蚀,提高作物对营养元素和农业化学物质的利用率,减少它们向环境的输入,从而可以有效地防止农业面源污染的形成。有研究表明^[59],少耕、免耕等水土保持耕作方法,可以减少土壤流失量和颗粒形态的养分流失,但是不能减少可溶性养分的流失;残渣覆盖物在增加土壤有机物、改善土壤结构的同时,残渣腐烂分解部分也增加了径流中的养分浓度。沿等高线种植同顺坡种植相比,可以减少约 30% 的土壤流失量,一定程度上降低了农田土壤养分的流失,能够实现农田面源污染的控制^[60]。

生物措施通过提高植物覆盖度、改善土壤质地、增加土壤团粒结构、提高土壤有机质含量、增加土壤微生物种类和数量、改善土壤水分条件等功能,减少

污染源系统的污染物通量。研究表明,森林植被覆盖率达 93.8% 的治理小流域的水质明显优于森林植被覆盖率为 35.7% 的对比小流域^[61]。在桑基植物篱模式下土壤抗蚀性有较大幅度的提高,能有效地减少紫色土坡地的水土流失,尤以侵蚀量和径流含沙量的减少和降低更为明显,与传统种植模式相比,径流量和径流系数减少或降低了 10.34% ~ 20.00%,侵蚀量减少了 55.23% ~ 67.84%,径流含沙量减小了 48.60% ~ 59.80%;在大雨强时桑基植物篱对减少养分的流失总量和富集比效果也相当显著^[62]。许峰等^[63]研究表明坡地等高植物篱在减轻坡地土壤侵蚀方面的效果接近于田间工程措施,而在控制面源污染、增加系统产出和低投资等方面的优势则为后者有所不及。

3.5 农田养分管理措施在面源污染中的应用

在农业面源污染防治中,农田养分平衡是目前急需解决的问题。其中最为严重的是化肥的过量施用,研究表明当化肥施用量超过一定水平以后,其养分流失量显著增大,但减少化肥施用量或不施,其养分流失量差别不大,而作物产量却急剧下降,这主要是由于农田养分管理不当、土壤保肥能力较差造成的^[64]。鲁如坤等人^[65]对我国南方农田养分平衡现状进行评价时发现,农田 N、P、K 素平衡均处于盈余状态,其中最严重是在福建和广东两省。而就全国来说,农田 N、P 素投入过大,大部分盈余的 N、P 并未在生产上起作用却进入了环境,更严重的是土壤 P 的积累现象,而农田 K 素大多处于亏缺状态。因此,推广平衡施肥技术势在必行,目前主要采用以下几种措施:①多种施肥方式相结合。主要包括叶面施肥、分次施肥、湿润施肥以及测土配方施肥等,这些施肥方式可以有效地提高化肥利用率,减少化肥施用量,降低养分流失的风险性;马立珊等^[66]在苏南太湖流域研究发现,分次施肥能促进水稻对土壤 N 素的吸收,当施 N 量相同时,水稻对 N 的利用率随施用次数增加而提高。②平衡施肥技术,即有机肥与无机肥平衡施用, N、P、K 素平衡施用,大量元素与中微量元素平衡施用。③生物固氮技术,如种植豆科作物及施用含固氮菌的菌肥^[67]。④开发新型肥料,主要有控制释放型、高氮型和高磷型^[68]。环境问题的关注已经迫使美国许多州开始根据农田径流中 P 素损失的潜力来考虑 N 素施用和流域管理^[69]。以往仅仅根据土壤中 P 素的水平来评估农田土壤 P 素流失的潜力是不科学的。土壤 P 素的有效管理涉及到许多因子,如化肥和有机肥的施用量、施用时间、施用方法及其在植物根区的积累等。这些措施都可以减少 P 素在地表径流中的暴露程度、增加作物 P

素的吸收量以及作物产量,从而间接地减少农田中 P 素的流失量。然而,这种措施是暂时的,并非长久之计,根本的解决方法是控制土壤侵蚀。另外,据王庆仁和李继云^[70]报道,储存于我国农业土壤中固定态(难溶态) P (P_2O_5) 的总量目前可达 6000 万 t,相当于全国 P 肥 10 年消费量的总和。因此,通过作物 P 高效利用基因型的改良与定向培育,施用含解 P 菌的菌肥,不仅能节省大量资金与能源,还可以加快 P 的生物循环,有效阻止 P 素的流失,减少 P 素对环境的污染,这对维护生态系统的良性循环及农业的可持续发展具有重要的作用^[71]。

为了减少由于侵蚀和径流所产生的 P 素流失量,目前采取的主要水土保持耕作法包括保护性耕作、作物残茬管理、设置缓冲带和边缘区、修筑梯田、等高耕作、覆盖种植和建造小水库等。Gustafson 等人^[72]试验表明冬季种植作物或覆盖作物可以使本年内 NO_3^- -N 流失量下降 75%,在后续几年内 NO_3^- -N 流失量也大约降低 50%,覆盖作物可以明显减少 N 素流失量。然而,这些措施在减少底质 P 负荷方面通常要比减少可溶性 P 负荷的效率更高一些。同时有些水土保持耕作法有时可能会增加溶解性 P 的流失和 NO_3^- -N 对地下水的污染。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^[73]。

3.6 农业生态工程技术在面源污染中的应用

面源污染对水体具有很大的危害,它随降雨而产生,污染排放具有间歇性、偶然性。由于面源污染的复杂性和随机性,因此对面源污染的控制十分困难^[74]。采用农业生态工程技术可以有效地预防和控制农业面源污染的发生和发展。农业生态工程技术实质上是通过生态学原理,同时应用系统工程方法,将生态工程建设与治污工程并举,从根本上减少化肥、农药的投入和降低能源、水资源的消耗,从而减少污染物的排放,达到治理与控制面源污染的目的。卞有生^[75]通过对湖泊面源污染的深入分析,认为在湖区及上游水源区开展农业生态工程建设,必将显著地改善地区的农业生产状况,极大地减少生产过程中资源的消费,特别是减少化肥、农药的使用,有效地控制和减少面源污染。开展生态农业建设,也可极大地降低农业水体的污染。如我国江西省和四川省最近几年逐渐完善的“种植-养猪-沼气”生态模式,使生物能得到多层次的重复利用,从而显著降低了化肥的使用量,提高了养分的利用效率,达到综合治理水体污染的目的。同时,将膜控制释放技术用于农业,开发膜控制释放化肥、膜控制释放农药,也是控制农业面源

污染的一条重要途径^[76], 这种化肥和农药的施用, 能明显地提高化肥和农药的利用率, 减少农用化学物质对水体的污染。

4 展望

水环境面源污染的严重性已受到国内外普遍关注, 面源污染研究已成为国际上水环境问题研究的活跃领域。综上所述, 国内外关于农业面源污染基本特征、形成机理、动态模拟技术和污染控制技术等进行全面、系统的研究。今后的研究重点主要从以下几个方面进行:

(1) 在今后的研究中注重农业面源污染对地表水污染的研究的同时, 应加强农业面源污染对地下水污染的研究, 特别是对农田生态系统中硝酸盐淋失动态及其对区域地下水的影响研究。

(2) 在今后的研究中, 在注重地表径流对农业面源污染影响的同时, 应考虑壤中流(侧渗)对农业面源污染的贡献作用的研究。

(3) 面源污染负荷中 N 的大气干湿沉降占有一定的比例, 在今后的研究中应考虑这一因素对水环境的影响。

(4) 我国幅员辽阔, 自然生态条件复杂, 面源污染类型多样, 关于污染源和污染通量的研究较少, 更没有根据不同区域特点, 建立特定的面源污染理论和控制理论。特别是在三峡库区这一生态脆弱地带, 现有研究中没有对其定位、定点的监测研究, 以后应加强在这一区域的控制性研究。

(5) 在研究中注重工程措施或生态措施对面源污染的控制的同时, 还应加强工程措施结合生态措施对面源污染控制的研究。

参考文献:

[1] Miller GT. Living in the Environment: An Introduction to Environmental Science. 7th Edition. Belmont: Wadsworth Publishing Company, 1992

[2] Ongley ED. Control of Water Pollution from Agriculture. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996

[3] Kronvang B. Diffuse Nutrient Losses in Denmark. Water Science and Technology 1996, 33(4/5): 81-88

[4] Atsushi I, Kiyoshi Y. Study on characteristics of pollutant runoff into Lake Biwa, Japan. Water Science and Technology, 1999, 39(12):17-25

[5] Boers PCM. Nutrient emission from agriculture in the Netherlands: Causes and remedies. Water Science and

Technology, 1996, 33(4/5):183-189

[6] 张宝文. 积极发展生态农业努力防治面源污染. 中国农业信息快讯, 2001(7): 3-5

[7] 张玉珍. 九龙江上游五川流域农业非点源污染研究(博士学位论文). 福建厦门: 厦门大学, 2004

[8] Vladimir N. Integrating diffuse non-point pollution control and water body restoration into watershed management. Journal of the American Water Resource Association, 1999, 35(4): 717-722

[9] 贺缠生, 傅伯杰, 陈利顶. 非点源污染的管理与控制. 环境科学, 1998, 19(5): 87-91

[10] 李怀恩. 流域非点源污染模型研究进展与发展趋势. 水资源保护, 1996(2): 14-18

[11] 林昭远, 陈建鑫, 颜正. 平集水区农业非点源污染之评估及控制对策. 水土保持研究, 2001, 8(1): 7-9

[12] 朱颜明, 黎劲松. 城市饮用水地表水源非点源污染研究. 城市环境与城市生态, 2000, 13(4): 1-4

[13] 宋泽芬, 王克勤, 杨云华, 李天兴. 澄江尖山河小流域不同土地利用类型面源污染输出特征. 水土保持学报, 2008, 22(2): 98-101, 158

[14] 孟庆华, 杨林章. 三峡库区不同土地利用方式的养分流失研究. 生态学报, 2000, 20(6): 1 028-1 033

[15] 苏跃, 刘方, 李航, 罗海波, 刘元生, 冯泽蔚. 喀斯特山区不同土地利用方式下土壤质量变化及其对水环境的影响. 水土保持学报, 2008, 22(1): 65-68

[16] 吕唤春, 薛生国, 方志发, 傅军, 陈英旭. 千岛湖流域不同土地利用方式对氮和磷流失的影响. 中国地质, 2004, 31(增):112-117

[17] Zampella PA. Characterization of surface water quality along a watershed disturbance gradient. Water Resource Bulletin (Urb.), 1994, 30: 605

[18] Wang XB, Bailey LD, Grant CA. A review of fertilizer N behaviors in soils, and effective N management under conservation tillage systems. Progr. Soil Sci., 1995, 23(2): 1-11

[19] Soldberg SQ, Kristensen L, Stopes C. Influence and crops and cultivation management on the nitrogen leaching potential on ecological farms in south east Norway. Veterinary and Agricultural University, 1995: 121

[20] 刘刚才, 高美荣, 林三益, 刘淑珍. 紫色土两种耕作制的产流产沙过程与水土流失观测准确分析. 水土保持学报, 2002, 16(4): 108-111

[21] Moller HE, Djurhuus J. Nitrate leaching as influenced by soil tillage and catch crop. Soil & Till Res., 1997, 41(3/4): 203-219

[22] 陈利顶, 傅伯杰. 农田生态系统管理与非点源污染控制. 环

- 境科学, 2000, 21(2): 98-100
- [23] 艾应伟, 范志金. N 肥施肥深度对小麦吸收利用 N 的影响. 土壤学报, 1997, 34(2): 146-151
- [24] Loro JP. Intensity and duration of denitrification following application of manure and fertilizer to soil. *J. of Environ. Qual.*, 1997, 26: 706-713
- [25] Gayor JD. Atrazine and metolachlor loss in surface and runoff from tillage in corn. *J. of Environ. Qual.*, 1995, 24: 246-256
- [26] Troiano J. Influence of amount and method of irrigation water application on leaching of Atrazine. *J. of Environ. Qual.*, 1993, 22: 290-298
- [27] 曾阿妍, 郝芳华, 张嘉勋, 欧阳威, 张敏霞, 田伟君. 内蒙古农业灌区夏、秋浇的氮磷流失变化. 环境科学学报, 2008, 28(5): 838-84
- [28] 王珂, 朱荫涓. 土壤耕作与农业面源污染. 耕作与栽培, 1996(2): 15-17
- [29] 易秀. 农事活动对水资源的非点源污染问题. 西安工程院学报, 2001, 23(2): 42-45
- [30] 关君蔚主编. 水土保持原理. 北京: 中国林业出版社, 1996
- [31] 韦红波, 李锐. 我国植被水土保持功能研究进展. 植物生态学报, 2002, 22(4): 489-496
- [32] 雷孝章, 陈季明. 森林对非点源污染的调控研究. 重庆环境科学, 2000, 22(2): 41-44, 53
- [33] 傅涛, 倪九派. 雨强对三峡库区黄色石灰土养分流失的影响. 水土保持学报, 2002, 16(2): 33-35, 83
- [34] 冯宗炜, 小仓纪雄. 重庆酸雨对陆地生态系统的影响和控制对策——中日酸雨合作研究总结. 环境科学进展, 1998, 6(5): 1-8
- [35] 许刚. 太湖流域社会经济发展对水环境的研究. 地域研究与开发, 2002, 21(1): 55-59
- [36] 邢光熹, 施书莲, 杜丽娟, 曹亚澄, 孙国庆, 沈光裕, 孙德玲. 苏州地区水体氮污染状况. 土壤学报, 2001, 38(4): 540-546
- [37] Hamilton PA, Miller TL. Differences in social and public risk perceptions and conflicting impacts on point/non-point trading ratios. *Am. J. Agric. Econ.*, 2001, 83(4): 934-941
- [38] 谢红彬, 虞孝感, 张运林. 太湖流域水环境演变与人类活动耦合关系. 长江流域资源与环境, 2001, 10(5): 394-400
- [39] Volker L, Elke E, Martina LW, Andreas L, Richard MG. Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 2001, 18(2): 157-171
- [40] Song Z W, Zheng Z P, Li J. Seasonal and annual performance of a full-scale constructed wetland system for sewage treatment in China. *Ecological Engineering*, 2006, 26: 272-282
- [41] Huang J, Reneau JRB, Hagedorn C. Nitrogen removal in constructed wetlands employed to treat domestic wastewater. *Water Res.*, 2000, 34(9): 2 582-2 588
- [42] Vymazal J. Introduction // Vymazal J, Brix H, Cooper PF. *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe*. Leiden: Backhuys Publishers, 1998: 1-15
- [43] 叶建锋, 操家顺. 生态修复技术在保护水库水源地中的应用. 环境科学与技术, 2004, 27(2): 61-63
- [44] Fiala L, Vasata P. Phosphorus reduction in a man-made lake by means of a small reservoir in the inflow. *Arch. Hydrobiol.*, 1982, 94: 24-37
- [45] Charles AC, Robert PB. A comparison of hydrologic characteristics of natural and created mainstream floodplain wetlands in pennsylvania. *Ecol. Eng.*, 2000, 14: 221-231
- [46] 尹澄清, 毛站坡. 用生态工程技术控制农村非点源水污染. 应用生态学报, 2002, 13(2): 229-232
- [47] 晏维金. 氮磷在水田湿地中的迁移转化及径流流失过程. 应用生态学报, 2004, 33(2): 93-97
- [48] Jon ES, Karl WJW, James JZ. Nutrient in agricultural surface runoff by riparian buffer zone in southern Illinois, USA. *Agroforestry Syetems*, 2005, 64: 169-180
- [49] Lowrance R, McIntyre S, Lance C. Erosion and deposition in a field/forest system estimated using cesium-137 activity. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1988, 43: 195-199
- [50] Jaana UK, Bent B, Jansson H, Nina S, Risto U. Buffer zones and constructed wetlands as filters for agricultural phosphorus. *Environmental Quality*, 2000, 29: 151-158
- [51] 张刚, 王德建, 陈效民. 太湖地区稻田缓冲带在减少养分流失中的作用. 土壤学报, 2007, 44(5): 873-877
- [52] Geert RS, Paul JW. Buffer zones for reducing pesticide drift to ditches and risks to aquatic organisms. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1998, 41: 112-118
- [53] 尹澄清. 内陆水-陆地交错带的生态功能及其保护与开发前景. 生态学报, 1995, 15(3): 331-335
- [54] Yin CQ, Zhao M, Jin WG, Lan Z. A multipond system as a protective zone used in the management of lakes in china. *Hydrobiologia*, 1993, 251: 321-329
- [55] Vanek V. Riparian zone as a source of phosphorus for a groundwater-dominated lake. *Water Research*, 1991, 25(4): 409-418
- [56] 柴世伟, 裴晓梅, 张亚雷, 李建华, 赵建夫. 农业面源污染及其控制技术研究. 水土保持学报, 2006, 20(6): 192-195
- [57] 阮伏水, 周伏建. 坡地果园开发水土保持新模式. 农村生态环境, 1995, 11(2): 7-10, 14

- [58] 王晓燕. 农业非点源污染及其控制管理//农业面源污染与综合防治: 全国农业面源污染与综合防治学术研讨论文集. 2004: 9-13
- [59] Alberts EE, Spomer RG. Dissolved nitrogen and phosphorus in runoff from watersheds in conservation and conventional tillage. *Soil and Water Conservation*, 1985, 40(1): 153-157
- [60] Poudel DD, Midmore DJ, West T. Farmer participatory research to minimize soil erosion on steepland vegetable systems in the Philippines. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000, 79(3): 113-127
- [61] 陈丽华, 余新晓, 王礼先, 张志强. 森林生态水文. 北京: 中国林业出版社, 2004
- [62] 史东梅, 卢喜平, 刘立志. 三峡库区紫色土地桑基植物篱水土保持作用研究. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 75-79
- [63] 许峰, 蔡强国, 吴淑安, 张光远. 坡地等高植物篱带间距对表土养分流失的影响. *水土保持学报*, 1999, 5(2): 23-29
- [64] Cooke LG. Nutrient transformations in a natural wetland receiving sewage effluent and the implications for waste treatment. *Water Science and Technology*, 1994, 29(5): 209-227
- [65] 鲁如坤, 时正元, 施建平. 我国南方6省农田养分现状评价和动态变化研究. *中国农业科学*, 2000, 33(2): 63-67
- [66] 马立珊, 汪祖强, 张水铭, 马杏法, 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
- [67] 盛下放, 黄为一, 殷永娟. 硅酸盐菌剂的应用效果及其解钾作用的初步研究. *南京农业大学学报*, 2000, 23(1): 43-46
- [68] 吕耀. 农业生态系统中氮素造成的非点源污染. *农业环境保护*, 1998, 17(1): 35-39
- [69] Daniel TC, Sharpley AN, Lemunyon JL. Agricultural phosphorus and eutrophication: A symposium overview. *Journal of Environment Quality*, 1998, 27(1): 251-257
- [70] 王庆仁, 李继云, 李振声. 高效利用土壤磷素的植物营养学研究. *生态学报*, 1999, 19(3): 417-421
- [71] 金相灿, 刘鸿亮, 屠清瑛, 章宗涉, 朱莹. 中国湖泊富营养化. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 21-40
- [72] Gustafson A, Fleischer S, Joelsson A. A catchment-oriented and cost-effective policy for water protection. *Ecological Engineering*, 2000, 14(4): 419-427
- [73] Heckrath G, Brooks PC, Pouiton PR. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentration in the broad balk experiment. *Journal of Environment Quality*, 1995, 24(2): 904-910
- [74] 赵建伟, 单保庆, 尹澄清. 城市面源污染控制技术及应用及进展. *中国给水排水*, 2007, 23(12): 1-5
- [75] 卞有生. 建设农业生态工程治理与控制湖泊面源污染. *中国工程科学*, 2001, 3(5): 17-21
- [76] 蒋茂贵, 方芳, 望志方. MCR技术在农业面源污染防治中的应用. *环境科学与技术*, 2001(增刊): 4-5

Research Status and Prospect on Influential Factors and Control Technology of Agricultural Non-Point Source Pollution: A Review

TAO Chun, GAO Ming, XU Chang, CI En

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The severity of non-point source pollution has caused wide public concern all over the world, and non-point source pollution has become into one of the most active international study fields of water environment. Based on the brief introduction of the occurrence mechanisms and the characters of agricultural non-point source pollution, this paper firstly summarized the research status of the influential factors of agricultural non-point source pollution, which include land use type, crop cultivation, management of irrigation and fertilization, terrains and landforms, characteristics of climate and hydrology, soc-economic factors and so on, then described the latest research progresses on the control technology of agricultural non-point source pollution in recent years, which include the constructed wetland technology, pretank technology, buffer zone technology, water & soil conservation technology and agricultural & ecological engineering technology, finally put forward the research emphases of agricultural non-point source pollution in the future in accordance with China's actual situation.

Key words: Agricultural non-point pollution, Impact factor, Control technology