湿地对农业非点源污染的去除效应

姜翠玲, 崔广柏

(河海大学水文水资源及环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 综合论述了湿地去除农业非点源污染的机理及影响营养物质净化的因素, 指出农业非点源污染是引起地表水富营养化的主要因素, 湿地生态系统作为农田与水体之间的一个过渡地带, 可通过土壤吸附、植物吸收、微生物转化等一系列物理、化学和生物学作用降解地表径流中的氮磷营养物质, 减轻地表水的污染。

关键词: 湿地; 非点源污染; 氮; 磷

中图分类号: X52   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1000-0267(2002)05-0471-03

Effectiveness of Wetlands in Removal of Non - Point Pollutants from Agricultural Source

JIANG Cui-ling, CUI Guang-bo

(Water Resources and Environment College, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Non - point pollutants from agricultural source are main factors leading to the eutrophication of surface water. As a buffer strip between fields and watershed, wetland ecosystems have the potential to reduce N and P nutrients by soil adsorption, aquatic plant assimilation and microbe transformation. This paper discusses the removal mechanism of non - point pollutants from agricultural source and the related factors affected the retention and release of nutrients.

Keywords: wetlands; non - point source pollution; nitrogen; phosphorus

农业非点源污染是指人们在从事农业耕作活动时, 由于使用化肥、农药, 以及农田水土流失而引起受纳水体(如河流、湖泊、水库、海湾等)的污染^[1]。非点源污染中的主要污染物质是氮、磷营养元素。在美国 60% 的水环境污染是由非点源污染造成的; 丹麦 270 条河流中 94% 的氮负荷、52% 的磷负荷来自于非点源污染; 荷兰来自于农业非点源的总氮、总磷分别占水环境污染总量的 60% 和 40%—50%^[2]。因此, 在北美和西欧, 非常重视非点源污染的研究和防治。我国地表水的非点源污染也占很大比重, 湖泊的氮、磷 50% 以上来自于农业非点源污染, 如太湖, 农业非点源氮量占入湖总氮量的 77%, 磷占 33.4%^[3]。氮、磷污染引起的湖泊富营养化现象十分严重, 江苏境内的大 - 中型湖泊基本上都处于中 - 富营养化水平。由化肥、水土流失等引起的水库的富营养化程度也正在加快。

非点源污染来源于非特定的、分散的地区, 与土壤的侵蚀程度、化肥、农药的施用量、农业耕作方式、地质地貌、区域降水过程等密切相关, 因此, 和点源污染相比, 非点源污染危害规模大, 且难以监测和控制。

湿地作为农田与水体之间的一个过渡带, 能够通过土壤吸附、植物吸收、生物降解等一系列作用, 降低进入地表水中的

氮、磷化合物的含量。根据 Peterjohn 和 Correll^[4](1984) 的研究结果, 农田与水体间 50 m 宽的沿岸植被缓冲带能减少进入地表水 89% 的氮和 80% 的磷。巴西的皮拉西卡巴的 Engenho 湿地对磷、硝酸盐和氨的去除率分别达到 93%、78% 和 50%^[5]。Chescheir^[6] 等通过模型研究表明湿地可以净化 79% 的总氮、82% 的硝酸盐氮、81% 的总磷。所以, 湿地在去除农业非点源污染方面是一个简单而有效的工具^[7], 而且费用低廉, 例如, 在瑞典计划把进入波罗地海的氮量负荷减少 50%, Rosenberg^[8] 等估计, 每减少 1 kg 进入波罗地海的氮, 利用沿海的湿地需要 0.6 美元, 用补救的农业措施需 1.9—53.4 美元, 而通过污水处理厂减少城市废水中 75% 的氮需要 15.6—31.2 美元。另外, 从生态学观点来看, 输入到湿地中的氮、磷营养物质可被植物吸收, 促进如芦苇、蒲草、灯心草等水生维管植物的生长和发育, 为保护生物的多样性, 改善流域生态景观起到积极的作用。因此, 从经济学和生态学的角度, 湿地生态系统已是世界上很多国家认可的控制水环境污染的有效工具。

我国农田的氮肥用量居世界首位, 而作物能够吸收的氮仅占施用量的 15%—30%, 其余存留在土壤中的氮有一部分将随径流和下渗进入地表水和地下水中。我国的湿地总面积为 6.594×10^5 km², 居世界第四位, 占国土面积的 6.5%^[9], 因此, 在我国有充分利用湿地资源去除农业非点源污染的巨大潜力。研究湿地生态系统对氮、磷化合物的去除能力, 可以在不改变现有的农药、化肥施用量和农田管理水平的条件下,

收稿日期: 2001-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50109001)

作者简介: 姜翠玲(1966—), 女, 副教授, 主要从事水环境生态学和水环境污染控制的研究。

湿地在减轻地表水富营养化方面所发挥的作用。

1 国内外研究现状和进展

利用湿地处理废水的研究是20世纪70年代以来世界上的一个热门研究领域,其原理主要是利用湿地生态系统中物理的、化学的和生物的作用机制,降低或减轻废水中营养物质的浓度。在国外,特别是西欧、北美等国家利用自然湿地生态系统的原理,发展了大量的人工湿地系统处理废、污水。1974年在西德首次建造人工湿地,后来这一工艺在欧洲和北美得以迅速发展。人工湿地是由人工基质(碎石、砂砾等)和生长在其上的水生植物组成,污水在湿地土壤的表层或表面下流动,靠砂石、土壤的吸附、植物吸收、微生物转化等一系列过程降解水中的营养物质,是一种有别于自然湿地的独特的土壤-植物-微生物系统。这种处理系统适应面广,既可以处理来自农田排水中的营养物质,也可以用于城镇生活污水、工业废水、矿山排水的处理。人工湿地的大小规模差别很大,小到仅处理几百人的生活污水,大的可以处理上千甚至上万人的生活污水。国外自20世纪70年代以来,已做了大量有关自然湿地和人工湿地对氮、磷营养物质去除能力的研究,分析了吸附、下渗、植物吸收、生物转化(矿化、硝化、反硝化)等多种因素对氮、磷在湿地生态系统中迁移的影响。通过实验研究了各种类型的湿地对生活污水、工业废水、农业排水、矿山排水的处理机制和处理潜力,确定了湿地在河流、湖泊水质的恢复与管理中所发挥的作用^[10]。

我国在20世纪50—70年代曾大规模垦殖湿地,变荒泽为良田,造成生态环境的严重破坏。20世纪80年代以后,我国开始重视农业非点源污染,进入90年代,由化肥、农药、水土流失引起的污染研究更加活跃。在这一时期,有关自然湿地和人工湿地处理点源和非点源污染的能力引起了人们的兴趣。先后在深圳、北京、天津等地建立了人工湿地处理系统,并开始了对湿地生态系统中营养物质转化机制的研究^[11]。

2 湿地去除农业非点源污染的机理

湿地是一独特的土壤-植物-微生物系统,当农田排水流经湿地时,水中的有机质、氮、磷等营养成分将发生复杂的物理、化学和生物的转化作用。自然和人工湿地中的土壤及砂石通过吸附、截留、过滤、离子交换、络合反应等净化去除水中的氮、磷等成分。

水生植物在湿地去除农业非点源污染过程中起着十分重要的作用,植物不仅可以通过其呈网络样的根系直接吸收农田排水中的 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 PO_4^{3-} ,更重要的是,水生植物可通过其生命活动改变根系周围的微环境,从而影响污染物的转化过程和去除的速度。

营养物质在湿地土壤中的降解和转化主要靠微生物来完成。湿地土壤中发育着大量的好氧、厌氧及兼性的微生物,由于水生植物的生长,其根系的分泌物及好氧环境为好氧细菌的生长创造了条件,将排水带来的有机物分解为 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 等离子,被植物吸收;根区以外的还原状态区域,发育着大量的

厌氧微生物,如硝酸盐还原细菌和发酵细菌,将有机物分解为 CO_2 、 NH_3 、 H_2S 、 H_2P 、 CH_4 等气体,挥发进入大气。

2.1 对磷的去除

农业排水中的磷主要是无机正磷酸盐,也有多聚磷酸盐和有机磷。湿地对磷有很好的去除效果,在Des Plaines湿地,Hey^[12]等人发现可溶性磷的去除率可达52%—99%。理论上,磷的去除可通过土壤的吸附、过滤、植物吸收、微生物转化等过程。但据研究报道^[5,7,11,13],磷含量的下降实际上主要依靠土壤的吸附和沉淀作用,仅少数种类的水生植物可以吸收磷,如棒灯心草(*Schoenoplectus validus*)和风眼莲(*Eichhornia crassipes* Solms)等,而大多数种类的根部对磷的吸收能力弱。缪神裕等^[14]也发现,湿地生态系统中的磷主要被吸附、截留在土壤中,而在植物体内和落叶中的很少。所以,植物吸收对磷的去除只起到较小的作用,不是削减磷的一个有效途径。

可溶性的无机磷化物能与土壤中二价及以上的阳离子(如 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+})发生吸附和沉淀反应而被截留在土壤中,若土壤中含有较多的铁、铝氧化物,能与磷形成溶解度很低的磷酸铁或磷酸铝,沉积在土壤中,但是这种沉淀反应是可逆的,如果流经湿地的排水中磷的浓度较低时,土壤吸附的一部分磷有可能重新释放到水中。因此,土壤在某种程度上起到了“磷缓冲器”的作用^[6]。土壤对磷的吸附主要发生在表层,随深度增加,吸附能力下降,这是由于表层土壤处于好氧状态,铁、铝呈非定性的氧化态形式,吸附能力强,能与磷形成难溶的复合物^[15]。

2.2 对有机氮的去除

排水中的有机氮首先被土壤吸附,而后靠湿地系统中微生物的矿化作用转化为 NH_4^+ , NH_4^+ 易转化为气态的 NH_3 ,挥发进入大气,但此过程主要发生在湿地土壤的表层。 NH_4^+ 能通过硝化作用形成 NO_3^- ,这一转化需要有氧的环境。在湿地生态系统中,水生植物可通过通气组织将氧气从上部输送至根系,经释放和扩散,使根系周围呈现好氧环境,为硝化细菌的生存、繁殖提供了条件,因此, NH_4^+ 在根系区域可发生硝化反应转变为 NO_3^- 。根系区以外的环境,由于处于淹水条件下,土壤水中氧气的含量很低。当水流流经根系以外的其它区域时,厌氧环境促使硝化产物 NO_3^- 发生反硝化作用,转化成气态的 N_2 和 N_2O ^[16]。通过湿地生态系统这种好氧和厌氧交替的环境条件,使硝化和反硝化作用可交替进行,为有机氮化合物转化成气态的氮脱离系统创造了条件。

2.3 对 NH_4^+ 的去除

作为阳离子, NH_4^+ 易被带正电荷的土壤颗粒所吸附,另外, NH_4^+ 在碱性的土壤中将转化为气态的 NH_3 而挥发。 NH_4^+ 亦是植物吸收的一种主要的氮形式,在夏、秋季节,成为植物组织的一部分,最后通过植物的收割而去除。曹向东等^[17]在实验中发现,湿地内密集的芦苇对氨氮的摄取量十分巨大,其吸收作用是系统净化氮元素的主要过程。芦苇根系统的内部发育着大量的硝化细菌, NH_4^+ 可在硝化细菌的作用下发生氧化,形成 NO_3^- 。当农田排水流经湿地生态系统时,由于上述过程的协同作用,使 NH_4^+ 易在系统中被截留、吸收和降解,因此, NH_4^+ 的迁

移能力比较弱。

2.4 对 NO_3^- 的去除

NO_3^- 是一种容易迁移的离子, 因为带负电荷的土壤胶体不易吸附 NO_3^- 。湿地对 NO_3^- 有很高的净化效果, 这种净化主要发生在湿地边缘 10—20 m 的范围内^[18], 靠反硝化作用、植物吸收和下渗作用去除。靠植物去除氮必须及时收获快速生长的水生植物, 才能阻止氮在系统中的循环。而反硝化作用是湿地生态系统永久性地消除氮的惟一自然过程^[19], 也是去除 NO_3^- 的一条主要途径。湿地中的最高反硝化率可达到 $0.28 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[20]。靠下渗可以去除 15% 的 NO_3^- , 下渗在冬季比在其它的季节更强烈, 因为冬季不适宜湿地植物的生长, 降雨过程更容易引起 NO_3^- 的淋溶。

3 影响湿地对营养物质去除的因素

3.1 湿地淹水程度

干湿交替是湿地的特征之一。水位的变化影响土壤中碳、氮、磷等营养物质的转化和释放。据 Martin^[21] 的研究结果, 夏季洪涝引起的水位上升对土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN (总氮) 的释放量影响不大, 但能显著增加 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的淋溶。水位的自然波动, 导致了 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 周期性的释放。磷的释放比较复杂, 淹水后的湿地更容易释放磷, 因为在水位较高时, 有机磷不易分解。水位下降后, 好氧环境促进了有机磷的降解, 更易导致磷的淋溶释放。

3.2 水生植物

植物是湿地生态系统的重要组成部分, 既可直接吸收氮、磷等营养物质, 又可通过茎叶的传送, 将空气中的氧气输入到根区, 在根区形成氧化的微环境, 为硝化细菌的生存和营养物质的降解提供必要的场所和好氧条件。据张甲耀等人的报道^[22], 有植物生长的人工湿地对总氮的去除率显著高于无植物系统的。湿地中的植物需要耐污能力强、根系发达、茎叶茂密的高等水生植物。根据根区范围的大小, 可判断不同植物对污水净化能力的高低, 大型水生植物因根系发达, 吸收能力强, 在湿地污水净化过程中起积极的作用。

3.3 季节温度的变化

湿地对氮、磷等污染物的去除依靠土壤的吸附、截留、水生植物的吸收、土壤中微生物的降解和转化作用来完成, 这些作用都受到温度和季节的影响。David^[7] 等通过三年的实验发现湿地对氮、磷的净化在夏、秋温度高的季节更容易发生。夏秋季节, 由于水生植物生长, 可通过直接吸收去除一部分氮和磷。另外, 微生物的生长和代谢活动直接受温度的影响。微生物最适宜的生长温度是 20°C — 40°C , 在此范围内, 温度每增加 10°C , 微生物的代谢速率将提高 1—2 倍, 因此, 夏秋季节适合微生物的生长和繁殖, 其对农田排水中的有机质、氮、磷化合物的转化速度明显高于冬、春季节。在北方冬季氨氮去除效果低于夏季的原因还在于, 在冬季湿地的表面往往结上一层厚厚的冰盖, 阻止大气中氧气的输入, 造成厌氧条件, 抑制了硝化作用的进行, 导致冬季氨氮的去除效果下降。

3.4 湿地宽度和面积

作为农田和水体之间的缓冲带, 湿地去除非点源污染的能力是显著的。但缓冲带应为多宽, 才能有效地去除排水中的营养物质? David^[7] 发现湿地面积与水域面积的比率越高, 对营养物质的截留、去除效应就越高, 他建议的湿地与水域最佳面积比率为 15—20 之间。在北京昌平的芦苇湿地中, 大约有 50% 的 BOD_5 和 COD 在进水的 50 m 距离内被迅速降解, 90% 的悬浮物在 10 m 以内沉降。随着距离的增加, 降解速度降低。Doyle^[10] 等曾用三个不同初始浓度的硝酸盐, 在缓冲带宽度分别为 4 m、8 m、15 m 和 30 m 处观测地表径流的氮浓度减少情况, 结果发现, 对于所有三个初始浓度, 水流经过后硝酸盐的浓度都呈曲线下降, 但当缓冲带的宽度超过 10 m 以后, 硝酸盐浓度的下降趋于平缓。磷在经过 8 m 宽的草地缓冲带之后, 其浓度下降 90%。

3.5 pH 值

pH 影响湿地中微生物的活性, 从而影响对氮、磷等营养物质的去除。硝化细菌和反硝化细菌适宜在中—碱性的条件下生长, 同样, 在碱性条件下, NH_4^+ 更易转化为气态的 NH_3 挥发进入大气, 因此, 湿地在碱性状态比在酸性状态更有利于对氮的净化。磷在碱性条件下, 易与 Ca^{2+} 发生吸附和沉淀反应, 而在中性和酸性条件下, 主要通过配位体交换被吸附到 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 的表面, 这是磷酸根离子去除的主要途径。

3.6 湿地土壤的类型

据丁疆华等^[11] 的报道, 土壤对有机污染物和营养元素的去除发挥了重要作用, 对总氮、总磷和总碳的去除率可达 70% 以上。含有机质丰富的土壤, 有较好的团粒结构, 吸附能力强, 在土壤中生长的微生物种类和数量多, 有助于吸附、降解各类污染物; 石灰性土壤的 pH 值高, 含更多的 Ca^{2+} , 有利于氮元素的转化和磷的吸附沉淀。

参考文献:

- [1] 朱铁群. 我国水环境农业非点源污染防治研究简述[J]. 农村生态环境, 2000, 16(3): 55—57.
- [2] 杨爱玲, 朱颜明. 地表水环境非点源污染研究[J]. 环境科学进展, 1999, 7(5): 60—67.
- [3] 范成新. 太湖非点源污染负荷与对策研究[J]. 河海大学学报, 1996, 24, 海洋湖沼专辑: 64—69.
- [4] Peterjohn W T and Correll D L. Nutrient dynamics in an agricultural watershed: Observations on the role of a riparian forest[J]. *Ecology*, 1984, 65: 1 466—1 475.
- [5] Farahbakhshazad N, Morrison G M and Filho E S. Nutrient removal in a vertical upflow wetland in Piracicaba, Brazil[J]. *Ambio*, 2000, 29(2): 74—77.
- [6] Chescheir G M, Skaggs R W and Gilliam J W. Evaluation of wetland buffer areas for treatment of pumped agricultural drainage water[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1992, 35: 175—182.