

DOI:10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0345

钟珍梅,黄毅斌,李艳春,黄秀声,陈钟佃,冯德庆.我国农业面源污染现状及草类植物在污染治理中的应用.草业科学,2017,34(2):428-435.

Zhong Z M, Huang Y B, Li Y C, Huang X S, Chen Z D, Feng D Q. Current state of agricultural environmental pollution and herbaceous plants used in controlling pollution in China. Pratacultural Science, 2017, 34(2): 428-435.

我国农业面源污染现状及 草类植物在污染治理中的应用

钟珍梅, 黄毅斌, 李艳春, 黄秀声, 陈钟佃, 冯德庆

(1.福建省农业科学院农业生态研究所,福建 福州 350003; 2.福建省丘陵地区循环农业工程技术研究中心,福建 福州 350003)

摘要:以高投入、高产出、高排放为特征的现代农业在带来巨大经济效益的同时,也带来了一系列的环境问题。本文根据中国统计年鉴及中国农村统计年鉴的数据分析了我国由化肥、农药、养殖废弃物等产生的农业污染现状。结果表明,从改革开放至今,我国化肥施用量呈逐年递增趋势,其中,2014 年化肥施用量同比增加了 578.27%,2013 年单位耕地施肥量同比增加了 391.78%;2012 年农药施用量同比增加了 1.5 倍;同时随着养殖业的迅猛发展,废弃物排放量也逐年递增。针对污染现状,本文列举了目前常用于治理农业污染的草类植物,并探讨推行以草本植物为主的生态沟渠、草皮缓冲带和人工湿地治理面源污染的草业生态模式,提出在面源污染治理中草类植物的选择原则,建议构建循环农业生态模式用于治理面源污染,旨在为农业环境污染治理提供科学依据。

关键词:农业面源污染;化肥;养殖废弃物;草类植物;循环农业模式

中图分类号:X171

文献标志码:A

文章编号:1001-0629(2017)2-0428-08*

Current state of agricultural environmental pollution and herbaceous plants used in controlling pollution in China

Zhong Zhen-mei, Huang Yi-bin, Li Yan-chun, Huang Xiu-Sheng,
Chen Zhong-dian, Feng De-qing

(1.Agricultural Ecology Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences (FAAS), Fuzhou 350003, China,

2.Fujian Engineering and Technology Research Center for Hilly Prataculture, Fuzhou 350003, China)

Abstract: The development of modern agriculture with characteristically high input, output, and emissions in China has created considerable economic benefits since the Reform and Opening; however, it has also created numerous environmental problems. In this study, we analyzed the status of environmental pollution caused by fertilizers, pesticides, and farming waste. The results indicated there was an annual increase in the use of fertilizers and pesticides in China. Specifically, the quantity of chemical fertilizer being used increased by 578.3% in 2014 compared with that in 1978. In addition, the use of fertilizers on units of arable land also increased by 391.78% in 2013 compared with that in 1980. Moreover, the amount of pesticides used in 2012 increased 1.5 times compared with the amounts used in 1978. At the same time, farming waste discharged has increased annually with the rapid development of aquaculture. This present study was focused on herbaceous plant species that have the potential to be used to control agricultural pollution. We analyzed their grass ecological mode including ecological ditches, grass buffer strips, and artificial wetlands to control agricultural non-point pollution.

* 收稿日期:2016-06-27 接受日期:2016-09-02

基金项目:福建省公益类科研院所基本科研专项(2014R1017-7、2015R1017-2、2016R1016-2);福建省农科院英才计划课题(YC2016-12)

第一作者:钟珍梅(1975-),女,福建邵武人,副研究员,在读博士生,主要从事农业生态和污染生态研究。E-mail:mume19@126.com

通信作者:黄毅斌(1964-),男,福建惠安人,研究员,博士,主要从事农业生态和南方草业研究。E-mail:ecohyb@163.com

We proposed that the selection of the principle of grasses in pollution control would be a good strategy, and suggested that building a cycle agricultural mode for controlling non-point pollution would be expedient. The main aim of this study was to provide a scientific basis for agricultural non-point pollution.

Key words: agricultural environmental pollution; fertilizer; farming wastes; herbaceous plant; cycle agricultural mode

Corresponding author: Huang Yi-bin E-mail:ecozyb@163.com

随着中国经济的飞速发展,农业生产方式发生了深刻的变革,自给自足的传统农业逐渐向集约化、专业化和规模化的现代农业转变,以高投入、高产出、高排放为特征的现代农业在带来巨大经济效益的同时,也带来了一系列的环境问题^[1-2]。环境污染分点源污染与面源污染,面源污染(diffused pollution, DP)是指溶解和固体的污染物从非特定地点,在降水或融雪的冲刷作用下,通过径流过程而汇入受纳水体(包括河流、湖泊、水库和海湾等)并引起有机污染、水体富营养化或有毒有害等其它形式的污染。农业面源污染是分布最广泛且最主要的农业环境污染之一,其主要来源于农田施肥、农药、畜禽及水产养殖等。我国农业生产中化肥利用率并不高,大量无法被植物吸收利用的氮、磷、钾等养分直接随着灌溉水、地表径流等进入附近水体。集约化畜禽养殖业的发展更是加剧了这一过程,其未处理或处理后未达标排放的粪污任意排放后造成水体污染和富营养化,使区域水生生态系统平衡遭到破坏。

由于农业面源污染物大多属于有机污染物,氮(N)、磷(P)含量高,如果将其合理利用可变为有用的资源,产生良好的经济效益。目前利用农业生产自身消纳农业污染物仍是一种有效措施。草本植物作为生态系统的初级生产者之一,具有适应性强、生长迅速、繁殖系数高、抗性强等特点,是退化生态系统植被恢复的先锋物种,其在消纳养殖场污水、富集土壤重金属、

消除土壤污染方面有巨大的潜力。为此,分析我国农业面源污染现状,探讨草本植物在治理农业面源污染的应用效果及治理模式,以期农业面源污染治理提供科学依据。

1 农业面源污染的现状

1.1 化肥施用及污染现状

现代农业的发展离不开化肥和农药的高投入,据统计^[3-4],我国化肥施用量逐年呈递增趋势。1980—2014 年期间,化肥施用量平均以每年 10% 的速度增加,2014 年的化肥施用量比 1978 年增加了 578.27% (图 1);单位耕地面积的施肥量也呈递增趋势,从 1978 年的 88.94 kg · hm⁻² 递增至 2013 年的 437.39 kg · hm⁻²,增加了 391.78% (图 2),远远超过发达国家设置的安全施肥标准(225 kg · hm⁻²)^[2]。长期施用化肥导致土壤酸化、板结,土壤微生物的数量和活性降低,土壤结构破坏,加上化肥的利用率并不高(N、P、K 利用率仅为 30% ~ 35%、10% ~ 20% 和 35% ~ 50%^[1]),进入附近水体易造成水体富营养化和水生生态系统失衡。

1.2 农药施用及环境污染现状

1990—2012 年期间,除 2010 年农药施用量降低外,其它年份农药施用量均呈增长趋势^[3]。1990 年全国范围内农药施用量仅为 73.3 万 t,到 2012 年增长至

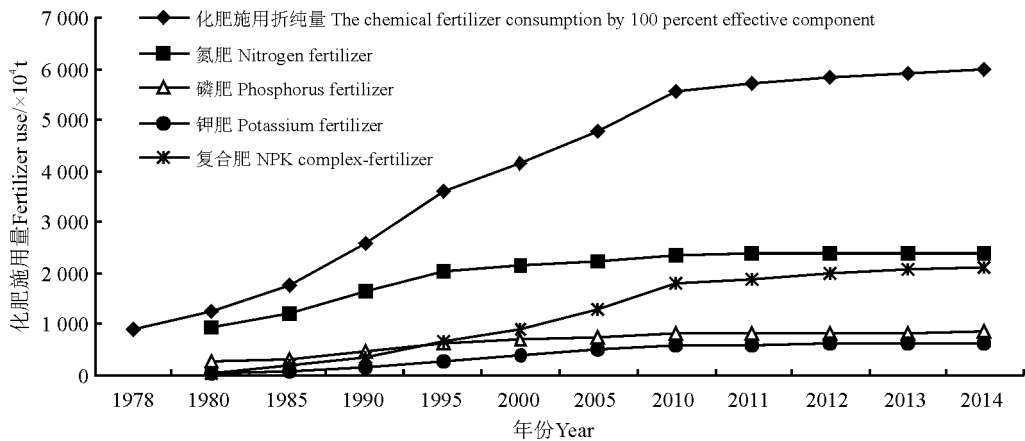


图 1 1978—2014 年中国化肥施用量
Fig. 1 Fertilizer use in China in 1978—2014

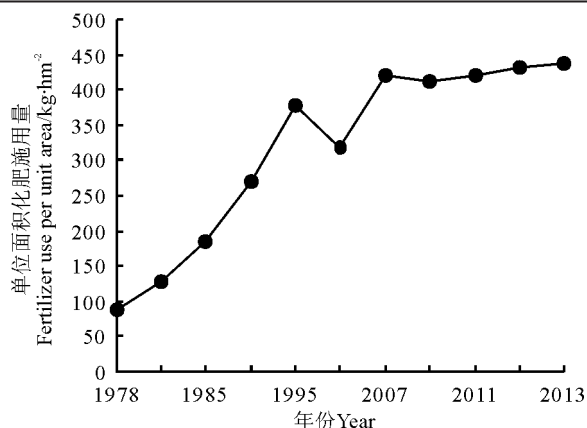


图 2 1978—2013 中国单位耕地面积化肥施用量

Fig. 2 Fertilizer use per unit area in China in 1978—2013

180.6 万 t, 增长了 1.5 倍(图 3)。在这些施用的农药中, 高毒农药占农药施用总量的 70%^[1]。据报道, 目前我国农药利用率也仅为 30% 左右, 未被农作物吸收的部分使我国 1 300~1 600 万 hm² 耕地受到严重污染^[2]。虽然自 1983 年起我国全面禁用有机氯农药, 但一些地区六六六(六氯化苯, C₆H₆Cl₆) 和 DDT[双对氯苯基三氯乙烷, (ClC₆H₄)₂CH(CCl₃)] , 土壤最高残留量仍在 1 mg·kg⁻¹ 以上。同时, 农药的过量使用也导致各种农牧产品农残检测超标, 产生食品安全问题; 还会对非靶心生物产生毒害作用, 使有害生物的天敌减少, 生物多样性丧失, 破坏生态平衡。

1.3 畜禽养殖业污染现状

1980—2014 年, 畜禽粪便排放量从 11.2 亿 t 增加至 15.4 亿 t, 增加 37.66%, 畜禽粪污的化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、生物需氧量(biochemical oxygen demand, BOD)和铵氮(NH₄⁺-N)

排放量同比增加 36.3%、37.4% 和 30.3%(表 1)。畜禽养殖业废弃物中的 N、P 是造成污染流域水体 N、P 富营养化的最主要原因^[6]。据 2014 年中国环境状况公报^[7] 统计, 2014 年太湖和巢湖流域Ⅳ水质(适用于一般工业用水区及人体非直接接触的娱乐用水区) 占主要比例, 分别为 90% 和 50%, 滇池 10 个国控点水质均为劣Ⅴ类(污染程度已超过Ⅴ类的水)。太湖流域源于农田面源、农村畜禽养殖业、城乡结合部城区的全磷、全氮分别为 20%、32%、23% 和 30%、23%、19%, 其贡献率超过来自工业和城市生活的点源污染^[8]。在农村水源污染中, 城市污水和农业污染各占 50%, 其中农业废弃物污染占 35%~40%, 化肥污染占 10%~15%^[9]。2014 年我国来自农业源的废水化学需氧量和氨氮排放量分别为 1 102.4 万 t 和 75.5 万 t, 是工业源的 3.54 倍和 3.25 倍^[6]。而在农业源的污染物排放中, 畜禽养殖业的贡献率占了相当大的比重。

2 草本植物在农业面源污染治理中的应用

2.1 植物种类

农业有机废弃物含有大量的营养物质, 可用作肥料满足植物的生长, 因此几乎所有的草本植物均可应用于该类污染的治理。但是, 农业环境污染具有典型面源污染的特征, 所以在农业面源污染治理过程中宜选用生物量大、能大面积栽种和推广的草本植物。目前用于治理农业废弃物污染的常见植物有狼尾草(*Pennisetum alopecuroides*)、多花黑麦草(*Lolium perenne*)、香根草(*Vetiveria zizanioides*)、红萍(*Azolla imbricata*)、水葫芦(*Eichhornia crassipes*) 等(表 2)。此外, 一些具有观赏价值的水生植物对富营养化

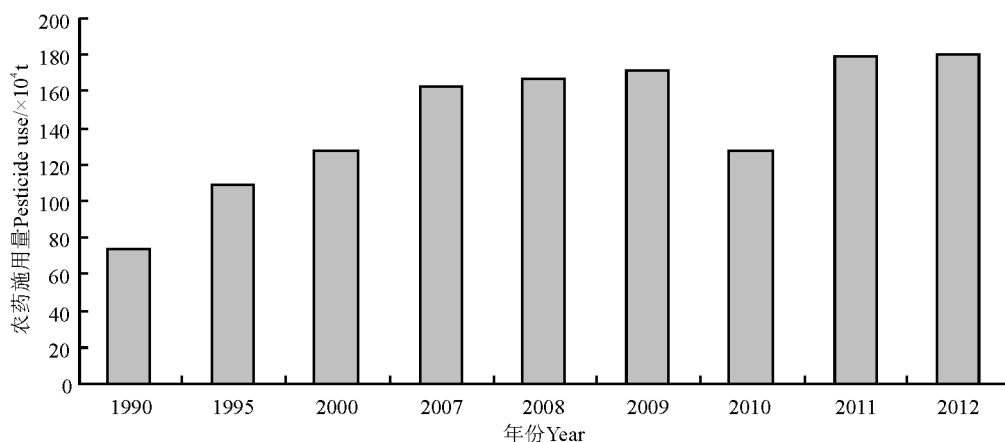


图 3 1990—2012 年中国农区农药施用量

Fig. 3 Pesticide use in China in 1990—2012

表 1 1980—2014 年中国畜禽排污量(万 t)
Table 1 Livestock emissions in China in 1990—2014 (×10⁴t)

年份 Year	粪便排放量 Stool emissions	尿排放量 Urine emissions	化学需氧量 Chemical oxygen demand	生物需氧量 Biochemical oxygen demand	铵氮 NH ₄ ⁺ -N
1980	111 831.4	446 511.7	6 405.52	5 040.96	1 454.69
1985	124 492.0	507 055.2	7 301.84	5 729.01	1 706.22
1990	144 088.0	584 918.5	8 314.97	6 505.01	1 948.19
1995	177 531.8	718 347.7	10 174.13	7 956.61	2 377.19
2000	167 141.3	688 167.7	9 754.76	7 637.42	2 262.50
2005	157 190.6	673 094.0	9 513.46	7 443.00	2 209.19
2010	153 303.9	621 292.9	8 888.22	7 004.22	1 989.10
2011	151 779.8	60 1601.1	8 767.15	6 953.13	1 918.53
2012	152 077.0	59 3687.7	8 678.33	6 892.76	1 885.62
2013	152 155.1	59 3323.1	8 680.93	6 900.71	1 875.55
2014	153 941.9	600 682.1	8 728.72	6 925.46	1 895.26

注:畜禽污染物产生量的数据根据《中国农村统计年鉴 2013》畜牧业主要畜禽饲养量^[3]和《畜禽养殖污染防治技术与政策》^[5]中有关公式计算而得。
Note:Livestock pollutants calculated using formulas from the book “Livestock Pollution Control Technology and Policy”^[5], and animal husbandry data amount are from China Rural Statistical Yearbook 2013^[3].

水体也有明显的净化作用^[10],因此也可应用于小面积面源污染的治理。

2.2 治理技术与模式

农业环境污染治理常用的生态技术措施包括沟渠系统、缓冲草皮带、生化塘及人工湿地系统等,其中草本植物是这些污染治理系统的重要组成部分,它能吸收农田径流中过剩的氮、磷营养元素及重金属和有机氯、磷等有害元素,使水体得到净化。

2.2.1 生态沟渠 生态沟渠是一种具有河流和湿地双重特征,用于治理农业面源污染的小型半自然化的水文生态系统,常设于农田周边,用于拦截农田排水中的氮、磷。人工种植绿色植物的生态沟渠对农田排水中氮、磷的拦截效果明显高于未种植植物的沟渠。如,种植多花黑麦草的生态沟渠对水稻田排水中的铵态氮、硝态氮、全氮和全磷都有较强的降解能力^[21]。水生植物茭白(*Zizania latifolia*)和菖蒲(*Acorus calamus*)不仅能吸收一部分 N、P,还可增强沟渠对 N、P 的截留效果^[22]。生态沟渠中植物种类对水体中的 N、P 去除效果也存在差异。余红兵等^[23]研究了 5 种植物水生美人蕉(*Canna glauca*)、铜钱草(*Hydrocotyle vulgaris*)、黑三棱(*Sparganium stoloniferum*)、狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*)和灯心草(*Juncus effusus*)对农田排水沟渠中氮、磷吸收效果的影响,结果表明,单次收割 5 种水生植物可带走水体中 7.40~28.23 和 1.13~4.49 g·m⁻² 的氮和磷,其中水生美人蕉效果最好,全年可带走的总氮和总磷量分别为 20.34~109.12 和 3.41~17.95 g·m⁻²。茭白和菖蒲能明显

促进系统对氮、磷的截留和转化作用,其中菖蒲对磷的吸收能力要强于茭白^[24]。水生植物对 N、P 去除效果与植物根系深度存在相关性,一般来说水生植物根系越深,氮去除率也越大。蕉草(*Nymphoides aquatic*)、芦苇(*Phragmites communis*)和香蒲(*Typha orientalis*)的根深度分别为 76、60 和 30 cm,这 3 种草对氮的去除率分别为 94%、78%和 28%^[25]。

2.2.2 草皮缓冲带 草皮缓冲带是建在河滨岸边用以截留陆域面源污染、改善河道水质的一种由植物组成的草地生态系统,其通过植物生长吸收、输送溶解氧、提供生物栖息地、疏松土壤、滞缓径流、调节微气候等功能来实现对面源污染防治和生态恢复作用,因此草种的选择及草皮缓冲带的构建将直接影响滨岸缓冲带面源污染的防治效果。暖季型草坪草百慕大(*Cynodon dactylon*)、白三叶(*Trifolium repens*)和冷季型草坪草高羊茅(*Festuca arundinacea*)3 种草皮缓冲带能截留 73%以上农田径流中的悬浮物,对全氮、NH₄⁺-N、全磷净化效果均显著^[26-27]。冰草(*Agropyron cristatum*)、酢酱草(*Oxalis corniculata*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)、白三叶 4 种草皮缓冲带对农田径流中总氮的平均去除率在 30%以上,对悬浮物的平均去除率达 73.6%^[28]。苏天杨等^[29]研究了冰草、高羊茅(*Festuca elata*)、披碱草、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)4 种草皮缓冲带对渗流水中全氮、全磷的净化效果,结果表明,4 种缓冲带对全氮的平均去除率在 60%以上,对全磷的平均去除率达 79.3%。草皮缓冲带去面源污染的拦截作用与植物类型、草皮宽度有关,

表 2 几种应用于农业面源治理的常见植物

Table 2 Common plants for controlling agricultural non-point pollution

植物名 Plant name	治理效果 Controlling effect
水葫芦 <i>Eichhomia crassipes</i>	为浮水植物,适宜于在农业面源污染水体的治理。其对水体中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率在 75% 以上^[10],还能吸收和吸附水体中的重金属铅、铬等,且根中含量高于茎叶^[11]。 <i>E. crassipes</i> is suitable for controlling sewage from agricultural non-point pollution as a floating plant. It removes more than 75% $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in sewage and absorbs heavy metals such as Pb and Cr in sewage with content in roots being higher than that in stem and leaves.
红萍 <i>Azolla imbricata</i>	为浮水植物,适宜用在农业面源污染水体的治理。对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率在 9.9%~38.9%,对全磷的去除率在 5.8%~38.4%^[12],能去除水体中的镉、铬、铜、锌等重金属^[13]。 <i>A. imbricata</i> is suitable for controlling sewage from agricultural non-point pollution as a floating plant. It removes $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (9.9% to 38.9%), total phosphorus (5.8% to 38.4%), and heavy metal including Cd, Cr, Cu, and Zn from sewage.
香根草 <i>Vetiveria zizanioids</i>	为多年生禾本科植物,可通过建植栽培草地或种植于人工湿地浅水区治理农业面源污染。对养殖废水中的全氮、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、全磷的净化效果均在 70% 以上^[14],$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率为 100%^[15]。对重金属镉具有较强的耐性和富集能力^[16]。 <i>V. zizanioids</i> is suitable for controlling sewage from agricultural non-point pollution when planted in grassland or artificial wetland as a perennial grass. It removes more than 70% total nitrogen, nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), and total phosphorus. It also has strong tolerance and enrichment ability against Cd.
多花黑麦草 <i>Lolium multiflorum</i>	为一年生冬季禾本科植物,可通过建植栽培草地或种植于浮床治理农业面源污染。对全氮的去除率为 70%,$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率 72.1%,$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为 75%,全磷为 71.6%^[17]。 <i>L. multiflorum</i> is suitable for controlling sewage from agricultural non-point pollution when planted in grassland or floating bed as the annual winter grass. It removes more than 70% of total nitrogen, 72.1% of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 75% of nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), and 71.6% total phosphorus.
狼尾草 <i>Pennisetum alopecuroides</i>	为多年生禾本科植物,可通过建植栽培草地或种植于人工湿地浅水区治理农业面源污染。对废水中全氮、全磷和化学需氧量去除率分别为 28%~38%、60% 和 50%~60%^[18];每年能消纳养殖场废水中的 TN 0.310~0.467 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,TP 0.273~0.315 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$^[19]。 <i>P. alopecuroides</i> is suitable for controlling sewage from agricultural non-point pollution when planted in grassland or artificial wetland as a perennial grass. It removes 28%~38% of total nitrogen, 60% of total phosphorus, and 50%~60% of chemical oxygen demand. Further, it absorbs 0.310~0.467 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ total nitrogen and 0.273~0.315 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ total phosphorus in farm sewage yearly.

由于农业土地资源有限,为了达到治理面源污染最佳效益,应构建最适宽度和植物配置的草皮缓冲带^[29-30]。

2.2.3 人工湿地 人工湿地是一种利用“基质+水生植物+微生物”的物理学、化学、生物学三重协同作用,人工形成的沼泽地、湿原、泥炭地或水域地带等水文生态系统,其中挺水植物是人工湿地最重要的组成元素之一。有研究^[31]表明,植被在人工湿地系统中去除 COD 和全氮过程中有着重要的作用,石菖蒲(*Acorus gramineus*)植被人工湿地对 COD 和全氮平均去除率

为 80.46% 和 77.77%,灯心草(*Juncus effusus*)植被人工湿地为 75.53% 和 71.17%,蝴蝶花(*Iris japonica*)植被人工湿地为 70%、53% 和 66.38%,显著高于无植被的人工湿地。与人工湿地(河沙)相比,种植植物的人工湿地(河沙植物)对水体中的 COD、全氮、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和全磷的去除率分别增加 20%、14%、17% 和 5%^[32]。人工湿地中植物直接去除污染物的量较低,其主要通过稳定床体表面、改变水力传导能力、防止系统堵塞、促进微生物的生长繁殖、创造生物共生条件、向基质中

释放氧气及景观美学作用等发挥作用^[33]。有研究^[34]表明,人工湿地中依靠植物生长同化吸收污水中的氮磷贡献较小,只占全部去除量的2%~5%,但植物在维持系统内微生物生长、系统稳定性、运行效果等方面作用显著^[35]。当然,湿地植物对污染物的去除能力与植物种类、植物净生长量、单位生物量的污染物蓄积强度也有关系^[36-38]。

3 对策和建议

3.1 植物的选择

植物在农业面源污染治理过程中发挥着重要的作用,其通过自身生长吸收一部分污染物,还可通过与微生物、环境介质的共同作用固定、截留一部分污染物,或加速水体中氮、磷界面交换和传递,从而使氮、磷含量快速减少。由于不同植物在面源污染治理过程中发挥作用不尽相同,因此在农业面源污染治理的植物选择上应兼顾以下原则:1)宜选择具生命力强、对环境适应性好、根系发达、生物量大、生长迅速等特点的植物;2)为了避免产生外来物种入侵引发的生物安全问题,在植物选择上尽量选择乡土物种;3)应结合农业生产实际或周边环境特性选择植物,如在大型养殖场周围可选择种植狼尾草、黑麦草、麦类植物等消纳废水,实现养殖场废水达标排放,同时这些植物还可循环反馈利用于畜禽养殖。而以观赏为目的的人工湿地宜选择观赏性水生植物,通过挺水植物、浮水植物和沉水植物的垂直搭

配,实现净化水体的目的,同时通过观赏植物的花、叶形态增加人工湿地的观赏性。

3.2 治理模式的构建

无论是生态沟渠还是草皮缓冲带和人工湿地,都不能算完整意义上的农业治理模式,它们仅是农业治理模式中的一个环节或一项综合技术,其考虑的是农业面源污染的治理,而治理后如何运作则缺乏相应的对策,因此在大农业体系下构建以种草为纽带的循环农业模式用于治理面源污染具有重要的意义。当前,以种草为纽带的循环农业模式已成功应用于养殖场污染治理,如“猪(牛)一沼一草”、“猪(牛)一沼一果一草”等,其通过循环产业链的构建变养殖废弃物为宝,在完成污染治理的同时降低生产成本,提高经济效益。此外,在构建循环农业模式可将生态沟渠、草皮缓冲带、人工湿地等环节合理纳入,如在生态沟渠中种植产量大的饲草喂鱼,在人工湿地中配置水雍菜(*Ipomoea aquatica*)、茭白等增加经济效益或种植牧草循环应用于养殖业,在消纳废水的同时实现经济效益、生态效益和社会效益的有效统一。

总之,从一定层面上讲,农业面源污染物是放错的地方的资源,通过将其合理利用,必定能达到增效减排的作用,而草本植物具有生长迅速、生物量大、繁殖系数高、抗性强等优点,将其应用到农业面源污染的治理中,构建以草本植物为纽带的循环农业模式,变养殖废弃物为宝,实现经济效益、生态效益和社会效益的有效统一。

参考文献 References:

- [1] 孙铁珩,宋雪英.中国农业环境问题与对策.农业现代化研究.2008,29(6):646-648.
- [2] 吕悦来,张林秀,刘浩森,朱兆良,Norse D,孙波.化肥使用对农民生计的影响及政策启示.中国农业面源污染控制对策.北京:中国环境科学出版社,2006.
- [3] 中华人民共和国国家统计局.2013年中国农村统计年鉴.北京:中国统计出版社,2013.
- [4] 中华人民共和国国家统计局.2015年中国统计年鉴.北京:中国统计出版社,2015.
- [5] 王凯军.畜禽养殖污染防治技术与政策.北京:化工工业出版社,2004.
- [6] 张维理,徐爱国,冀宏杰,Kolbe H.中国农业面源污染形势估计及控制对策Ⅲ.中国农业面源污染控制中存在问题分析.中国农业科学,2004,37(7):1026-1033.
Zhang W L,Xu A G,ji H J,Kolbe H.Estimation of agricultural non-point source pollution in China and alleviating strategies Ⅲ.A review of policies and practices for agricultural non-point source pollution control China.Scientia Agriculture Sinica,2004,37(7):1026-1033.(in Chinese)
- [7] 中国环境保护部.2014年中国环境状况公报.<http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201506/W020150605383406308836.pdf>
- [8] 张维理,武淑霞,冀宏杰,Kolbe H.中国农业面源污染形势估计及控制对策Ⅰ.21世纪初期中国农业面源污染的形势估计.中国农业科学,2004,37(7):1008-1017.
Zhang W L,Wu S X,ji H J,Kolbe H.Estimation of agricultural non-point source pollution in China and alleviating strategies I . estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century.Scientia Agriculture Sinica,2004,37(7):1008-

- 1017.(in Chinese)
- [9] 王海燕,杜一新,梁碧元.我国化肥使用现状与减轻农业面源污染的对策.现代农业科技,2007,20:135-136.
- [10] 钟珍梅,黄秀声,黄勤楼.水葫芦净化沼液的效果研究.福建农业科技,2006(2):84-86.
Zhong Z M, Huang X S, Huang Q L. Effect of *Eichhornia crassipes* solms on purifying biogas slurry. Fujian Agricultural Science and Technology, 2006(2): 84-86. (in Chinese)
- [11] 纪苗苗,林波,吴跃明,刘建新.不同水域中水葫芦对铅、镉、铬、汞的富集规律研究.草业科学,2010,27(7):1-4.
Li M M, Lin B, Wu Y M, Liu J X. Study on the enrichment patterns of Pb, Cd, Cr and Hg in water hyacinth in different water areas. Pratacultural Science, 2010, 27(7): 1-4. (in Chinese)
- [12] 邓素芳,陈敏,杨有泉.红萍净化水产养殖水体的研究.环境工程学报,2009,3(5):809-812.
Deng S F, Chen M, Yang Y Q. Study on purification of aquaculture water with *Azolla*. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(5): 809-812. (in Chinese)
- [13] 陈坚,金桂英,唐龙飞.红萍在植物治污方面的应用研究进展.环境污染治理技术与设备,2002,3(4):74-78.
Chen J, Jin G Y, Tang L F. The progress in use *Azolla* for phytoremediation. Techniques and Equipments for Environmental Pollution Control, 2002, 3(4): 74-78. (in Chinese)
- [14] 夏汉平,王庆礼,孔国辉.垃圾污水的植物毒性和植物净化效果之研究.植物生态学报,1999,23(4):289-302.
Xia H P, Wang Q L, Kong G H. Phyto-toxicity of garbage leachates and effectiveness of plant purification for them. Chinese Journal of Plant Ecology, 1999, 23(4): 289-302. (in Chinese)
- [15] 司友斌,包军杰,曹德菊,彭军,杨强.香根草对富营养化水体净化效果研究.应用生态学报,2003,14(2):277-279.
Si Y B, Bao J J, Cao D J, Peng J, Yang Q. Purification of entrophicated water body by *Vetiveria zizanioids*. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(2): 277-279. (in Chinese)
- [16] 刘云国,宋筱琛,王欣,闵宗义,柳思勉.香根草对重金属镉的积累及耐性研究.湖南大学学报:自然科学版,2010,37(1):75-79.
Liu Y G, Song X C, Wang X, Min Z Y, Liu S M. Study of the cadmium accumulation and tolerance of *Vericeria zizanioides*. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2010, 37(1): 75-79. (in Chinese)
- [17] 陈海生,王光华,刘建飞,任红侠.模拟生态沟渠中盘培牧草降解农业面源污染效应的研究.江西农业学报,2010,22(9):143-145.
Chen H S, Wang G H, Liu J F, Ren H X. Research on effects of simulative ecological ditch on degradation of agricultural non-point pollution. Acta Agriculturae Jianxi, 2010, 22(9): 143-145. (in Chinese)
- [18] 钟宁,蔡秋亮,李顺兴.夏秋两季漂浮栽培狼尾草净化猪场废水的研究.漳州师范学院学报:自然科学版,2013(2):59-64.
Zhong N, Cai Q L, Li S X. Purification of piggery waste water by *Pennisetum* planted in a floating phytoremediation system during summer and autumn. Journal of Zhangzhou Normal University: Nation Science, 2013(2): 59-64. (in Chinese)
- [19] 黄勤楼,黄秀声,陈钟佃,冯德庆.规模化猪场污染及废弃物循环利用研究.中国农学通报,2007,23(10):175-178.
Huang Q L, Huang X S, Chen Z D, Feng D Q. Research on the pollution situation of scale pig farms and waste circular utilization. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(10): 175-178. (in Chinese)
- [20] 杨立红,卓丽环.水生植物对富营养化水体净化能力的研究.吉林农业大学学报,2006,28(6):663-666.
Yang L H, Zhou L H. Studies on purification ability of aquatic plants of the entrophication water. Journal of Jilin Agricultural University, 2006, 28(6): 663-666. (in Chinese)
- [21] 陈海生,王光华,宋仿根,钱忠龙,李建强.生态沟渠对农业面源污染物的截留效应研究.江西农业学报,2010,22(7):121-124.
Chen H S, Wang G H, Song F G, Qian Z L, Li J Q. Retention and removal effects of ecological ditch on agricultural non-point source pollutants. Acta Agriculturae Jianxi, 2010, 22(7): 121-124. (in Chinese)
- [22] 徐红灯,席北斗,王京刚,蔡洋.水生植物对农田排水沟渠中氮、磷的截留效应.环境科学研究,2007,20(2):84-88.
Xu H D, Xi B D, Wang J G, Cai Y. Study on the interception of nitrogen and phosphorus by macrophyte in agricultural drainage ditch. Research of Environmental Sciences, 2007, 20(2): 84-88. (in Chinese)
- [23] 余红兵,肖润林,杨知建,张树楠,刘锋.五种水生植物生物量及其对生态沟渠氮、磷吸收效果的研究.核农学报,2012,26(5):798-802.
Yu H B, Xiao R L, Yang Z J, Zhang S N, Liu F. Biomass and effects of five aquatic plants uptake of nitrogen and phosphorus in ecological ditch. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2012, 26(5): 798-802. (in Chinese)
- [24] 李秀珍,肖笃宁,胡远满,王宪礼.湿地养分截留功能的空间模拟Ⅱ.模型的完善和应用.生态学报,2002,22(4):486-495.
Li X Z, Xiao D N, Hu Y M, Wang X L. Spatial modeling on nutrient reduction in the wetlands Ⅱ. Finalization and application.

- Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(4): 486-495. (in Chinese)
- [25] 王为东, 王大力, 尹澄清, 陈海婴, 姜婧, 郑军. 芦苇型湿地生态系统的潜水水质状态研究. 生态学报, 2001, 21(6): 919-925.
Wang W D, Wang D L, Yin C Q, Chen H Y, Jiang J, Zheng J. A study on the groundwater quality of the baiyangdian wetland ecosystem. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(6): 919-925. (in Chinese)
- [26] 黄沈发, 唐浩, 鄢忠纯, 熊丽君, 吴建强. 3 种草皮缓冲带对农田径流污染物的净化效果及其最佳宽度研究. 环境污染与防治, 2009, 31(6): 53-57.
Huang S F, Tang H, Yan Z C, Xiong L J, Wu J Q. Sward riparian buffer zone for runoff clarification and nutrient removal. Environmental Pollution and Control, 2009, 31(6): 53-57. (in Chinese)
- [27] 苗青, 施春红, 胡小贞, 蒋丽佳. 不同草皮构建的湖泊缓冲带对污染物的净化效果研究. 环境污染与防治, 2013, 35(2): 22-27.
Miao Q, Shi C H, Hu X Z, Jiang L J. Purification effect of sward buffer strips of lake to runoff and seepage pollutants. Environmental Pollution and Control, 2013, 35(2): 22-27. (in Chinese)
- [28] 杨慧滨, 李林英. 4 种草皮缓冲带对径流污染物去除效果研究. 天津农业科学, 2010, 16(4): 73-76.
Yang H B, Li L Y. Effects of different grass and width of riparian buffer strips on runoff purification. Tianjin Agricultural Sciences, 2010, 16(4): 73-76. (in Chinese)
- [29] 苏天杨, 李林英, 姚延栋. 不同草本缓冲带对径流污染物滞留效益及其最佳宽度研究. 天津农业科学, 2010, 16(3): 121-123.
Su T Y, Li L Y, Yang Y T. Effects of different grass and width of riparian buffer strips on runoff purification. Tianjin Agricultural Sciences, 2010, 16(3): 121-123. (in Chinese)
- [30] 何聪, 刘璐嘉, 王苏胜, 周明耀. 不同宽度草皮缓冲带对农田径流氮磷去除效果研究水土保持研究, 2014, 21(4): 55-58.
He C, Liu L J, Wang S S, Zhou Y M. Effect of grass buffer strips with different widths on nitrogen and phosphorus removal efficiency of farmland runoff. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(4): 55-58. (in Chinese)
- [31] 袁东海, 任全进, 高士祥, 张洪, 尹大强, 王连生. 几种湿地植物净化生活污水 COD、总氮效果比较. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2337-2341.
Yuan D H, Ren Q J, Gao S X, Zhang H, Yin D Q, Wang L S. Purification efficiency of several wetland macrophytes on COD and nitrogen removal from domestic sewage. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(12): 2337-2341. (in Chinese)
- [32] 苏北, 徐德福, 魏驰原, 田浩. 不同人工湿地系统中植物的生长特性及净化能力差异. 南京信息工业大学学报: 自然科学版, 2015, 7(3): 247-253.
Su B, Xu D F, Wei C Y, Tian H. Plant growth characteristics and purification capacity in different constructed wetland system. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition, 2015, 7(3): 247-253. (in Chinese)
- [33] 王宝贞, 王琳. 水污染治理新技术——新工艺、新概念、新理论. 北京: 科学出版社, 2004: 200-208.
- [34] 邓泓, 何国富, 邢和祥, 达良俊, 由文辉, 徐亚同, 陈邦林, 张俊, 黄民生, 钱耀敏, 陈彬. 河道水体富营养化污染综合治理的研究. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 132-136.
Deng H, He G F, Xing H X, Da L J, You W H, Xu Y T, Chen B L, Zhang J, Huang M S, Qian X M, Chen B. Integrative pollution control of urban eutrophication rivers. Environmental Science and Technology, 2008, 31(2): 132-136. (in Chinese)
- [35] 张荣社, 李广贺, 周琪, 张旭. 潜流湿地中植物对脱氮除磷效果的影响中试研究. 环境科学, 2005, 26(4): 83-86.
Zhang R S, Li G H, Zhou Q, Zhang X. Effects of plants on nitrogen/phosphorus removal in subsurface constructed wetland. Environmental Science, 2005, 26(4): 83-86. (in Chinese)
- [36] 陈俊宏, 高旭, 谢伟丹, 黄磊, 马晓霞. 植物对潜流人工湿地净化微污染水效果的影响研究. 环境工程学报, 2012, 6(2): 515-518.
Chen J H, Gao X, Xie W D, Huang L, Ma X X. Impact of plants on purification efficiencies of subsurface horizontal flow constructed wetland treating micro-polluted water. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2012, 6(2): 515-518. (in Chinese)
- [37] 李龙山, 倪细炉, 李志刚, 李健. 5 种湿地植物对生活污水净化效果研究. 西北植物学报, 2013, 33(11): 2292-2300.
Li L S, Ni X L, Li Z G, Li J. Sewage cleaning abilities of five wetland plants. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, 33(11): 2292-2300. (in Chinese)
- [38] 徐德福, 李映雪, 方华, 赵晓莉. 4 种湿地植物的生理性状对人工湿地床设计的影响. 农业环境科学学报, 2009, 28(3): 587-591.
Xu D F, Li Y X, Fang H, Zhao X L. Effects of physiological character of four wetland plants on design of the constructed wetland bed. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(3): 587-591. (in Chinese)

(责任编辑 王芳)