

汤爱萍, 王金保, 李 爽, 等. 环境系统工程在农业非点源污染控制中的应用[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(6): 353-356.

环境系统工程在农业非点源污染控制中的应用

汤爱萍^{1,2}, 王金保¹, 李 爽¹, 孙 蕾¹

(1. 南昌大学环境与化学工程学院/鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 江西南昌 330029;

2. 南昌航空大学环境与化学工程学院, 江西南昌 330063)

摘要:环境系统工程是一门研究环境系统规划、设计、管理方法和手段的技术科学。运用环境系统工程分析奶牛场农业非点源污染问题, 建立目标函数模型并求解, 不仅可以追求环境效益, 而且能在保证产品收益最大的基础上进行污染控制。本研究根据应用实例总结出环境系统工程在农业非点源污染中的具体应用程序, 同时就环境系统分析法的局限性提出建议。

关键词:环境系统工程; 农业; 非点源污染; 系统优化

中图分类号: X192 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2013)06-0353-04

中国是农业大国, 如何在有限资源上实现农民增收、农业增效、农村致富的同时, 又减少其所带来的非点源污染已成为重要课题。尽管在非点源污染方面已开展了大量研究^[1-5], 但是大部分控制措施都是仅以控制污染为目标, 而并未在采取控制措施的同时最大限度地保护农民利益, 由此造成非点源污染控制措施失去示范性, 无法得以推广。因此在制定控

制农业非点源污染规划时, 要评价控制措施对农民收入的影响。这就必须运用环境系统工程的理念综合解决发展农业, 提高农民收入和有效减少农业非点源污染问题。确切地讲, 就是将上述互相关联的 3 个环境问题看作是处于同一体系(系统)中, 在定量化的基础上(用数量来表示环境因素), 建立起数学模型, 进行数学模拟与系统分析, 寻找该环境系统解决环境问题效果佳且保证农民收入的最优方案。因此, 本文通过实例说明环境系统工程在农业非点源污染控制的应用, 以期政府制定农业政策和评价农业非点源污染控制措施提供借鉴。

收稿日期: 2012-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41261097); 江西省教育厅项目(编号: GJJ12433); 江西省科技计划(编号: 20122BBG70079)。

作者简介: 汤爱萍(1975—), 女, 浙江建德人, 博士研究生, 主要从事水污染控制与水资源保护研究。E-mail: shuibar@hotmail.com。

通信作者: 王金保, 教授, 主要从事废水处理及资源化技术研究。

E-mail: jbw@ncu.edu.cn。

展^[9]为核心内容的“万顷良田建设工程”, 在这项工程实施的过程中, 农业生产用地规划上要充分考虑与畜牧业的结合, 根据土壤、气候、农作物种植种类和环境情况, 突破养殖场不能占有基本农田的规定, 充分考虑是否有足够的农田消纳粪便污水并提供优质饲料, 实现废弃物资源化利用, 使整个农业生态系统形成“粮食多—饲料多—畜禽多—肥料多—粮食多”的良性循环。

开展沼液作为猪舍冲圈用水的研究与试验。一是因厌氧发酵后大多数好气性的病原微生物被杀灭。二是在同一猪场中无外来致病性病原菌。因此, 从理论上讲, 沼液可以作为冲圈用水。如果能这样做, 就可以大大降低出水量, 更好实现节水减排的目标。

定位研究农田长期使用沼液对土壤生态环境的影响。在我国, 对规模化养猪场所生产出来的沼液在田间长期使用可能产生的不良影响以及相应对策尚未引起足够的重视。目前规模化养殖场畜禽粪尿的成分和以往相比已经发生了质的变化。当今畜牧业生产中大量使用各种能促进生长和提高饲料利用率、抑制有害菌的微量元素添加剂, 如 Cu、Zn、As 等; 另外, 滥用和超标使用兽药, 尤其是抗菌药物的现象也十分严重, 我国环境中兽药残留状况不容乐观^[2], 定位研究农田长期使用沼液对土壤生态环境的影响十分必要。

1 环境系统工程的基本内涵

钱学森指出, 只用人 与生物圈的概念无法完整表达环境

参考文献:

- [1] 舒邓群, 朱绪平, 邹润祥. 适度规模养殖, 确保粪污在场内消纳[J]. 江西畜牧兽医杂志, 2008(6): 20-22.
- [2] 徐秀银. 规模化养猪场沼液的农用现状与对策[J]. 江苏农业科学, 2010(6): 521-522.
- [3] 郝晓地. 可持续污水——废物处理技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 5-6.
- [4] 如皋概况[EB/OL]. [2011-11-29]. <http://www.rugao.gov.cn>.
- [5] 赵 玲, 永 华, 刘荣厚. 不同配比沼渣基质对草莓生长发育及叶绿素荧光特性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(2): 185-189.
- [6] 姜继辉, 严少华, 陈 巍. 蓝藻沼肥对土壤的影响[J]. 土壤, 2010, 42(4): 678-680.
- [7] 张克强, 高怀友. 畜禽养殖业污染物处理与处置[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 218-219.
- [8] 何平安, 李 荣. 中国有机肥料养分志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 5-7.
- [9] 有效集聚资源 有序统筹发展——访江苏省国土资源厅厅长夏鸣[EB/OL]. (2008-12-24)[2013-01-20]. <http://www.mlr.gov.cn>.

的概念,它不能把人类活动范围全部包括进去,他认为苏联科学家使用的地球表层或地壳层更准确^[6]。地球表层包括上至大气对流层顶层,下至岩石圈的上部,这是目前人类活动的主要范围,因此环境的范围应该是指地球表层。

浦汉昕指出,地球表层包括的非生物、生物可以看作是一个巨系统,而且是开放、有序、多层的巨系统^[7]。那么管理这个巨系统的技术也就必然是一门系统工程,可称之为环境系统工程。

环境系统工程又称环境系统分析、环境系统方法、环境系统处理、环境系统科学,是一门研究环境系统规划、设计、管理方法和手段的技术科学。其目的在于以环境质量的变化规律、污染物对人体和生态的影响、环境工程技术原理和环境经济学为依据,并综合运用系统论、控制论、信息论的理论,采用现代管理的数学方法和计算机技术,对环境问题和防治工程进行系统分析,谋求整体优化解决。它是数学模拟、系统分

析、计算机技术同环境污染控制技术的结合。高松武一郎等认为,人类环境问题(包括大气污染、水质污染、噪音、振动、恶臭、地基下沉、土壤污染等)可以看作是由一系列有因果关系的子系统组成的大系统,各子系统最优化之和并不一定等于整个大系统的最优化^[8]。环境系统工程的基本观点是追求大系统的最优化,这与钱学森的环境系统工程基本观点异曲同工。

作为一门系统工程,环境系统工程须要依靠系统工程的一般方法理论学科成果如运筹学以及计算机技术和控制论等,并且还要运用国土经济学的成果。由于地球表层是一个开放、有序、多层的巨系统,从保护环境角度来说,环境系统工程也要分级实施,逐步实现^[6]。图 1 中 4 级环境系统工程是一个整体,因为环境是地球表层的巨系统,是互相关联的,这是环境系统工程的特点之一。

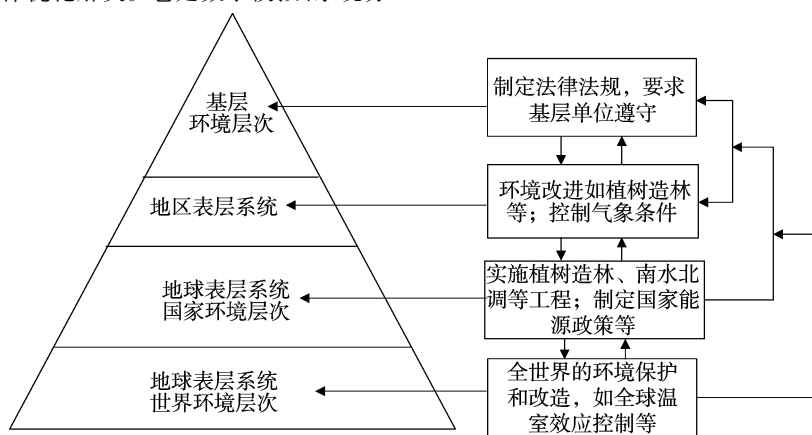


图1 地球表层环境结构及相应的环境系统工程解决方案

环境系统分析包括环境目标、可选方案、系统模式、评价标准、选优等 5 个基本要素。环境系统工作一般分为 6 个步骤:(1)系统地提出问题,明确其目标和范围;(2)选择评价系统功能的指标或目标函数;(3)明确系统组成因素或提出各种方案;(4)建立数学模式或进行数学模拟;(5)分析模式特点,确定选优方法,以便使系统最优化;(6)按最优方案建立环境污染控制系统。这些步骤往往需要反复进行。

2 环境系统工程在农业非点源污染控制中的应用

非点源污染是一个很复杂的问题,控制非点源污染比控制点源污染要困难很多,而系统分析是制定非点源污染控制计划的重要方法。控制非点源污染对环境和农业规划都很重要,在世界很多地区控制农业非点源污染是水质管理的必要组成部分。农场是农业非点源污染的重要来源之一,可通过对农场管理作出某些调整来控制农业非点源污染如调整作物种植等,但必须评价控制污染对整个农场带来的影响。因为采取环境控制措施会影响与污染无直接联系的农场其他活动,如禁用某种农药可能会降低作物产量,因而减少食用这种作物的牲畜数量。

应当指出,在对某个环境体系进行系统分析时,要同时考虑许多因素特别是经济因素,须要寻求效果最优且投资最少的综合性方案。国外农业非点源污染治理经验有助于我国的

环保规划工作。以下以一个美国的奶牛场为例,应用线性规划模型(LP模型)制定最优农业非点源污染控制措施说明环境系统分析法的实际应用。该奶牛场土壤贫瘠,地面坡度平缓,可耕面积为 124 hm²,可饲养 150 头奶牛。首先汇总模型所需数据,然后分析约束条件对非点源营养物和沉积物流失量的影响^[9]。

2.1 数据收集

2.1.1 土壤与作物 该奶牛场有 4 种土壤类型:Rockland - Pantan(R/P)型、Livingston - Ponton(L/P)型、Acid - Sands(A/S)型、Ponton - Vergennes(P/V)型。首先测量各种土壤上的作物种植面积,并检测土壤氮、磷含量。作物采用 3 种轮作方式:玉米—燕麦—紫苜蓿—紫苜蓿(COAA);玉米—燕麦—草—草—草(COGGG);连续种植牧草。玉米作为新鲜饲料,紫苜蓿作为干草,所有草都被当作青饲料。依据上述条件,确定可能的作物/土壤组合和施肥情况——COAA(L/P、P/V),COGGG(L/P、A/S、P/V),牧草(R/P、A/S)。2 组轮作作物施用粪肥,牧草不施用粪肥。

2.1.2 作物营养物质量 可通过将已知土壤上作物的平均产量与作物营养物含量相乘求得。

2.1.3 牲畜营养物需求量与粪便排泄量 须考虑成年奶牛和更新用小奶牛,每 4 头奶牛中有 1 头更新用小奶牛。

2.1.4 营养物质与沉积物的流失量 测定土壤和作物的氮

挥发率;沉积物流失量根据通用土壤流失方程估算。径流量采用 SCS 径流方程估算。

2.1.5 费用与收入 每头奶牛收入的计算以奶牛场收支账目为依据。

2.2 模型的建立

奶牛场流失的沉积物、氮、磷主要是由农田侵蚀以及冲走的化肥和粪肥中未被利用的营养物所造成。

非点源发生的沉积物、氮、磷的流失,很难在奶牛场被消除,只能是有所削减。采取水土保持措施,如沿高程线修筑农田、建造梯田以及少耕等,可减少侵蚀和径流量,从而减少沉积物和营养物的流失,然而这些措施都会影响农场的运营和收入。

2.2.1 系统和目标的确定 控制非点源污染很少采用排放标准规定。确定对污染物的控制要求,要考虑农场管理实践所能减少的沉积物流失量。在建模时应改变不同的控制水平,考察控制费用与减少沉积物流失量之间的关系。最终法规不是沉积物排放标准,而是推荐一整套农场管理方法,包括必要时政府给予的补贴。本案例对非点源污染的控制要求,为侵蚀发生的沉积物流失量、随径流流失的溶解性氮、磷,以及总氮流失量。对模型规定 7 个目标:(1)奶牛场最大净收入(美元/年);(2)限制径流中的溶解性氮流失量(DN);(3)限制径流中的溶解性磷流失量(DP);(4)限制径流中的固相氮流失量(SN);(5)限制径流中的固相磷流失量(SP);(6)限制农田的总氮流失量(TN);(7)限制农田侵蚀的沉积物流失量(S)。

2.2.2 建立模型 和点源污染相比,非点源污染易受自然条件突发性、偶然性、随机性所制约,具有 3 个不确定性,即在不确定的时间内,通过不确定的途径,排放不确定数量的污染物,并具有潜在性、复杂性、隐蔽性的特点,所以导致非点源污染系统最优化模型的复杂性。为了得到简化模型,必须把复杂情况简化成收入与控制污染相关的基本关系。根据系统的复杂程度,往往采用试差法建立比较简单的模型(图 2)。

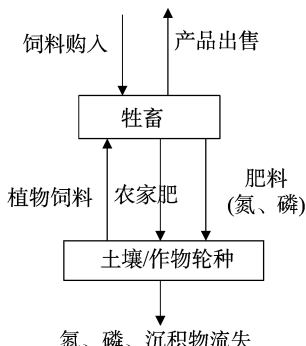


图2 奶牛场系统概念模型

(1)确定基本变量。模型基本变量为作物种植面积、粪肥和氮肥施用量以及奶牛数量。 X_{ij} 为在土壤 i 上作物(或轮作) j 的种植面积; M_{ij} 为在土壤/作物 X_{ij} 上施用的粪肥量; N_{ij} 为在土壤/作物 X_{ij} 上施用的氮肥量; H 为奶牛数量。

(2)约束条件。约束条件为:①在奶牛场中,只有某种土壤/作物的组合才是可行或合理的;②每种土壤上的作物面积受到可种植面积的约束;③不是所有情况都能施用粪肥;④奶牛数量受到圈养设施或其他条件约束,不能超过最大值 H_{\max} ;

⑤因为牧草收获有季节性,而且奶牛场距仓库有一定距离,所以收草能提供的营养物质质量受到约束;⑥每种污染物的流失量均限制在每公顷土地最大年平均值;⑦农场主的目标是净收入(Z ,美元/年)最大。

(3)目标函数。在最优化模型中的目标函数为:

$$\max Z = \max [rH - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{ij} X_{ij} - C_m \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J M_{ij} - C_n \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J N_{ij}]$$

式中: r 为每头奶牛收入; C_{ij} 为在土壤 i 上作物 j 的种植费用,不包括固定费用及氮肥与粪便处置等费用; C_m 为粪便处置费用; C_n 为氮肥费用。

模型中有 45 个变量(20 个决策变量与 25 个松弛或剩余变量)及 26 个约束条件。

2.3 模型求解

该线性规划模型可求得 3 组解:(1)不控制污染物流失量,奶牛场可能得到最大收入。在这种情况下,奶牛场收入量和污染物流失量均为最大值,如果能够接受这种污染物的最大流失量,就不必改变管理和运行条件。(2)削减总氮流失量。不考虑其他污染物流失量的控制,要削减氮流失量,就必须减少施氮量或采取少耕、免耕措施,虽在短期内对产量影响不大,但长期必会造成作物产量减少^[10],降低牲畜营养物质供应量,从而减少牲畜头数,最终影响奶牛场收入。虽然在求解时没有限制其他污染物的流失量,但结果是其他污染物流失量也有所降低,因为在削减氮流失的管理和运行措施时,同样也能削减其他污染物流失量。(3)控制沉积物的流失量,其结果除了 COAA 在侵蚀性低的土壤一项外,与控制氮流失量的结果相接近。

2.4 模型在政府管理上的应用

建立模型的目的是为政府规划机构提供资料和信息,用以制定控制奶牛场非点源污染的管理计划。根据 LP 模型的解,可得出一些结论。

收入最高的奶牛场总氮流失量可能最大。虽然未被利用的氮可能部分挥发到大气中,然而仍有相当部分的氮会进入地面水体和地下含水层。

该奶牛场削减沉积物和氮流失量的成本很高,因为其主要措施是减少作物种植面积或采取免耕、少耕的耕作措施。这表明要控制非点源污染,势必造成减产。

在奶牛场的污染控制模型中,削减污染物的措施中只考虑了控制氮肥和粪肥施用量,以及作物与土壤的合理组合,这些措施确实能够减少污染,但成本很高。因此模型中应考虑其他管理和工程措施,如雨季采用作物覆盖控制土壤冲蚀、暴雨径流等各种水土保持措施,减少径流量、侵蚀量,必然能削减径流中溶解性和固相营养物的流失量,但须重新建立和求解模型。

3 结论及建议

上述奶牛场非点源污染控制过程可以归纳为 3 个方面,它们之间的联系及过程如图 3 所示。

通过对上述实例的简要分析,说明应用系统工程分析方法控制非点源污染可以在保护环境的基础上,最大限度地考虑产品收益。环境保护工作者往往只注重环境效益而忽略了农民利益,这对农民来说是不可接受的,对国家来说也不现

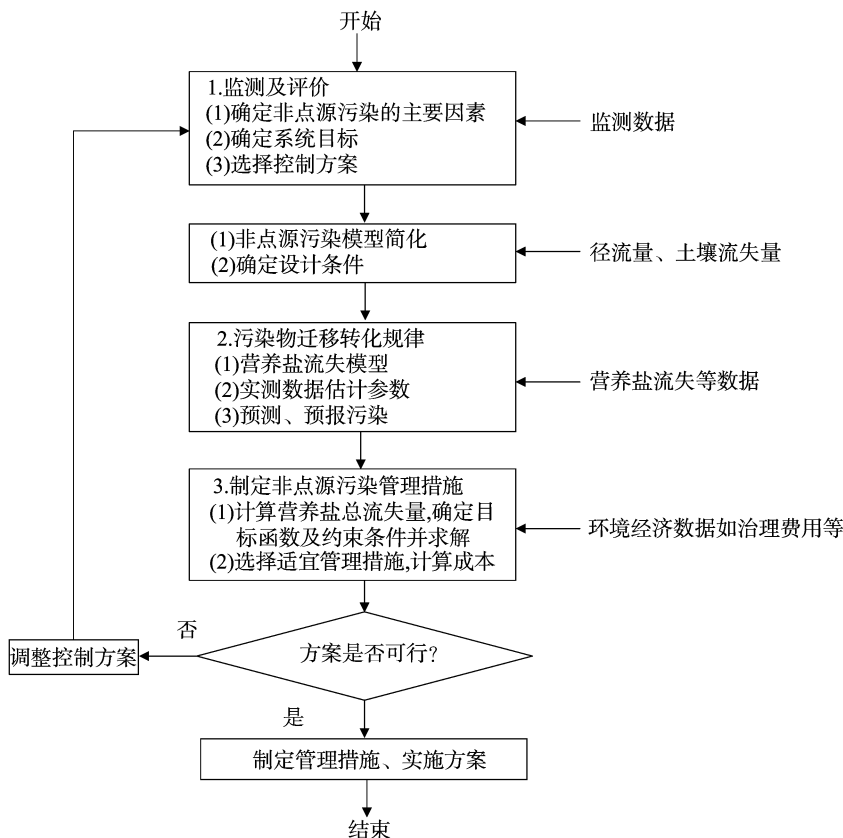


图3 环境系统工程在非点源污染控制中应用的程序

实。任何一个国家都不希望采取严重影响农业收入的环境控制措施,而是希望能够制定出既保持产量又能控制污染物的措施和方案。运用系统工程就能很好地实现这个目标。非点源污染的影响因素众多,并不是只根据单一因素建立简单模型就能解决污染控制问题,而是必须考虑多方面问题,因而对整个系统进行分析非常必要。

环境系统工程从整体上、系统地考虑环境问题,最终在系统最优化的基础上控制非点源污染。此结论不仅适用于某一具体的地点,而且在整个地区乃至全国都有适用性,这也是环境系统工程的特点之一。

非点源污染的突发性、偶然性、随机性、不确定性的特点,决定了建立控制非点源污染的模型任务将十分艰巨,由此建立的完整非点源污染系统模型也将非常复杂,而用此模型分析各种控制方案也非常困难。因此要注意对模型的简化,能解决问题的最佳模型往往是最简单的模型,因为这种模型易被人理解,而且便于获得所需数据。在本例中,就意味着要忽略许多对环境与经济影响不大的因素。这样建立起来的模型虽不是原问题的精确数学描述,得出的牲畜数量与沉积物、营养物流失量之间的关系也只是近似的,但却能解决一些实际问题。

本研究运用环境系统工程的方法对美国某奶牛场进行了分析。我国的农业非点源污染更主要来自农田及畜禽养殖特别是养猪业等,所以在对我国的农业非点源污染进行系统化分析、建立系统模型时,要结合我国农业的特点具体分析。

参考文献:

- [1] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等. 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[J]. 中国农业科学,2004,37(7):1008-1017.
- [2] 张维理,冀宏杰,Kolbe H,等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 II. 欧美国家农业面源污染状况及控制[J]. 中国农业科学,2004,37(7):1018-1025.
- [3] 张维理,徐爱国,冀宏杰,等. 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[J]. 中国农业科学,2004,37(7):1026-1033.
- [4] 梁正高. 我国农村环境污染现状及防治对策探析[J]. 中共贵州省委党校学报,2007(3):37-39.
- [5] 韩秀娣. 最佳管理措施在非点源污染防治中的应用[J]. 上海环境科学,2000,19(3):102-104,128.
- [6] 钱学森. 保护环境的工程技术——环境系统工程[J]. 环境保护,1983(6):2-4.
- [7] 浦汉昕. 地球表层的系统与进化[J]. 自然杂志,1983,6(2):126-128.
- [8] 高松武一郎,内藤正明,Fan L T. 环境系统工程[M]. 刘鸿竟,韩德昇,马倩如,等,译. 北京:中国环境科学出版社,1985:25.
- [9] Haith D A. 环境系统最优化[M]. 袁铭道,季民,译. 北京:中国环境科学出版社,1987:135-165.
- [10] 吴建富,潘晓华,王璐,等. 双季抛栽条件下连续免耕对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学,2010,43(15):3159-3167.