



SHUITU BAOCHI

—JIEWEI XIAOLIUYU MIANYUAN WURAN

水土保持

——解围小流域面源污染

杨育红◎著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

水土保持： 解围小流域面源污染

杨育红◎著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

• 北京 •

内 容 提 要

本书的主要内容为农业面源污染研究。本书主要围绕当前小流域面源污染的实际情况,结合实际案例,主要分析了土壤侵蚀以及面源污染的来源、迁移、防治效果以及动态优化配置措施。总体来说,本书具有一定的针对性和前瞻性,可以为农业经济发展研究人员和农村环境保护人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

水土保持:解围小流域面源污染/杨育红著. —
北京:中国水利水电出版社,2016.12
ISBN 978-7-5170-4942-5

I. ①水… II. ①杨… III. ①小流域—农业污染源—
面源污染—污染防治—研究—中国 IV. ①X501

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 296805 号

责任编辑:杨庆川 陈 洁 封面设计:崔 蕾

书 名	水土保持:解围小流域面源污染 SHUITU BAOCHI: JIEWEI XIAOLIUYU MIANYUAN WURAN
作 者	杨育红 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:mchannel@263.net(万水) sales@waterpub.com.cn 电话:(010)68367658(营销中心)、82562819(万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京鑫海胜蓝数码科技有限公司
印 刷	三河市佳星印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16 开本 13.5 印张 173 千字
版 次	2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—1500 册
定 价	42.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

农业面源污染已成为全球水环境保护的重点控制对象。国内外农业面源污染物输移过程和输移机理研究百家争鸣,防治措施百花齐放。东北地区作为我国重要的商品粮基地,农业面源污染研究处在污染源评价和负荷量化的基础阶段,缺乏面源污染防治措施的相关研究,对水土保持措施的面源污染防治效果研究尤为不足。受华北水利水电大学高层次人才科研启动项目资助和攻读硕士和博士学位阶段的科研积累,选取长春市石头口门水库莫家沟小流域水土保持示范措施为研究对象,进行坡耕地农业面源污染物的输移动态、水保措施的面源防治效果和防治措施的优化配置探索。研究结果有助于合理评估水土保持措施在促进农业面源污染防治中的贡献,同时也可小流域治理提供理论参考和技术支撑。

全书分七章。第一章阐明了选题背景、目的和意义,通过分析国内外研究现状和存在的不足,提出研究内容、技术路线和创新点。第二章简要概述了研究区的自然环境特征、田间试验和样品测定分析方法。第三章应用核素示踪技术估算了研究区土壤侵蚀强度,并计算了随土壤流失的吸附态氮磷污染负荷。第四章回归了径流浸提土壤溶解态氮磷关系,定量研究了农业面源氮磷污染物在土壤-径流系统中的迁移。第五章利用模型模拟和实际监测数据,针对横垄措施和梯田措施分别进行了面源污染防治效果研究。第六章建立动态规划模型为实现小流域近期、中期和远期入库水质治理目标,进行面源污染防治措施的优选。第七章为结论部分,分析了研究中存在的不足和对未来的展望。

本书写作过程中得到了华北水利水电大学聂相田、汪伦

焰、韩宇平、左萍、孙少楠教授等的指导和帮助,在此表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,希望广大读者批评指正。

杨育红

2016年8月

摘 要

坡耕地水土流失不仅造成土地贫瘠,由此形成的面源污染也是受纳水体水质恶化的主要原因。通过选择长春市主要水源地之一的石头口门水库莫家沟小流域为研究区,运用复合核素示踪技术,量化土壤侵蚀强度;基于同步监测土壤和降雨径流资料,应用线性回归最小二乘法,建立土壤-径流系统溶解态氮磷的浸提回归模型,确定溶解态氮磷的流失负荷;针对小流域水土保持措施,进行水保措施的面源污染防治效果研究;基于水保措施的污染防治成果,建立并运用小流域动态规划管理模型,进行小流域入库 TP 浓度分别满足近期(2011—2020)、中期(2021—2030)、远期(2031—2050)水库水质Ⅲ类、Ⅱ类、Ⅰ类标准的理论和实际最佳面源防治措施组合。研究主要结论如下。

莫家沟小流域核素 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 背景值分别为 2918 Bq/m^2 和 8954 Bq/m^2 ;运用 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 核素示踪技术计算小流域多年平均土壤侵蚀厚度分别为 1.99 mm/y 和 1.85 mm/y ;土壤侵蚀模数为 $2507\text{ t}/(\text{km}^2\text{ y})$ 和 $2331\text{ t}/(\text{km}^2\text{ y})$ 。根据《黑土区水土流失综合防治技术标准(SL446—2009)》,莫家沟小流域土壤侵蚀强度属于中度-强烈过渡阶段。每年随土壤侵蚀流失的吸附态 TN、TP 分别为 29 kg/hm^2 和 12 kg/hm^2 ;随土壤侵蚀流失的 TN 负荷占化肥施用量的 22%;TP 流失负荷占化肥施用量的 10%。随土壤损失的 TN、TP 量分别是径流携带 TN、TP 负荷的 5 倍和 33 倍,流失土壤携带的吸附态 TN 负荷是土壤溶解态 TN 负荷的 300 倍,而流失土壤携带的吸附态 TP 负荷是土壤溶解态 TP 的 3000 倍。流失土壤颗粒是氮磷输出迁移的主要载体。

污染物的溶解态组分是面源污染最为活跃的部分。地表降

雨径流携带的氮磷负荷与地区降雨强度、雨水氮磷含量、土壤氮磷的溶出性关系密切。降雨输入和农田土壤氮磷的溶出迁移是农业面源污染物氮磷的两大来源。土壤 WEN 向降雨径流迁移的回归方程为 $y=0.361x+0.978(R=0.894)$; 土壤 WEP 向降雨径流迁移的回归方程为 $y=0.281x-0.179(R=0.943)$ 。土壤溶解态氮磷污染物的输移量即为径流量与土壤溶解态氮磷浓度及其提取系数之积。径流氮磷流失水平分别为 TN 6.02 kg/hm^2 , TP 0.37 kg/hm^2 。土壤溶解态氮磷提取系数模型的建立,是氮磷从农业营养元素向水环境污染因子进行内涵转变的桥梁;以水为浸提剂进行具有“水环境意义”的土壤水溶性氮磷分析,不同于传统“农学意义”上的土壤氮磷测试,是土壤氮磷向水环境迁移传输研究的重要模块,为农业面源污染防治和水环境保护规划提供了一种污染负荷估算新思路。

旱田农业面源污染负荷取决于污染物浓度和降雨径流量。不同的田间管理措施减少农业面源污染的效果不同。与顺垄耕作相比,横垄耕作措施可减少土壤流失 63%,梯田措施能减少土壤流失 95%。梯田措施较横垄耕作减少径流 45%、减少泥沙 74%。横垄耕作措施径流 DTN 负荷占 TN 负荷的 82%,DTP 占 TP 负荷的 16%;梯田措施径流 DTN 负荷占 TN 负荷的 84%,DTP 占 TP 负荷的 17%。梯田措施径流氮磷浓度均高于横垄耕作措施的径流氮磷浓度,单位面积梯田措施的径流磷负荷大于横垄耕作径流磷负荷;但梯田措施的氮流失小于横垄耕作措施的氮流失负荷。横垄和梯田措施径流氮流失以无机氮为主,其中, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 是主要形态;而径流中溶解态磷占很少一部分,吸附态是磷的主要流失形态。梯田是减少农业面源吸附态污染负荷的有效措施,但并不是减少农业面源溶解态污染负荷的理想措施。

运用动态规划模型,对小流域分三个阶段进行 21 种情境模拟,分别使小流域入库水质 TP 满足水库Ⅲ类、Ⅱ类、Ⅰ类标准。2010 年为基础年,保持现状施肥量和林地、耕地面积不变,小流域入库水质达到 $\text{TP} \leq 0.05 \text{ mg/L}$ 。针对目前粮食生产形势和水源

地保护政策,选择具有操作性强的措施组合方案。近期(2011—2020)目标达到小流域入库水质 $TP \leq 0.05 \text{ mg/L}$,选择保持现状施肥量,梯田面积不变, $\leq 5^\circ$ 耕地 0.411 km^2 横垄耕作,其他耕地退耕还林措施。中期(2021—2030)目标是实现石头口门水库水源地功能达标,在第一阶段基础上,修建人工湿地 0.03 km^2 ,即可满足小流域入库水质 $TP \leq 0.025 \text{ mg/L}$ 。实现小流域远期(2031—2050)入库水质目标, $TP \leq 0.01 \text{ mg/L}$,采用全部农田原位退耕还林(化肥施用量 0 kg/hm^2),保持已建人工湿地 0.03 km^2 。动态规划模型为实现小流域综合治理进行多种方案或情境优选提供有效方法。

关键词:核素示踪技术;农业面源污染;横垄;梯田;坡耕地

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 选题背景、目的和意义	1
第二节 农业面源污染研究进展	5
第二章 研究区概况及试验设计	36
第一节 莫家沟小流域研究区概况	36
第二节 试验设计和方法	42
第三章 土壤侵蚀及面源污染	44
第一节 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 核素示踪技术	44
第二节 土壤侵蚀强度	48
第三节 土壤侵蚀引起的面源污染	54
第四节 小结	69
第四章 土壤-径流系统的污染物迁移	70
第一节 土壤水浸提液制备	70
第二节 土壤溶解态磷在土壤-径流系统中的迁移	73
第三节 土壤溶解态氮在土壤-径流系统中的迁移	81
第四节 土壤-径流系统中氮磷迁移	84
第五节 小结	94
第五章 农业面源污染调控措施的防治效果	95
第一节 横垄措施的面源污染	96

第二节	梯田措施的面源污染	110
第三节	小结	121
第六章	小流域面源污染防治措施优化配置	122
第一节	动态规划模型	122
第二节	动态规划模型的建立与求解	125
第三节	小结	133
第七章	结论与展望	135
参考文献		139
附录:已发表的相关文章		161

第一章 绪 论

第一节 选题背景、目的和意义

一、选题背景

农业面源(也称非点源)是全球水环境恶化的主要原因。国家粮食安全保障与粮食供需矛盾不断刺激化肥、农药、除草剂等农用化学品的增加。大量营养元素(N、P)、盐分、有毒有机物随农田回归水和暴雨径流进入水环境,水体中的盐分、硝酸盐、总悬浮固体含量增高已成全球性趋势(陈静生,2000)。

20 世纪 80 年代以来,全球陆地面积的 30%~50%受面源污染影响(Lovejoy 等,1997)。英国水体 60%的氮(N)、25%的磷(P)和 70%的沉积物(sediment)^①;西班牙 Ebro 河 64%的硝氮(NO_3^- -N)(Torrecilla 等,2005);荷兰水环境中 60%的总氮(TN)和 45%左右的总磷(TP)(Boers,1996);丹麦 270 条河流中 94%的 N 和 52%的 P(Kronvang 等,1996)均来自农业面源;美国河流污染长度的 48%和湖泊污染面积的 41%受农业生产活动引起的面源污染影响^②;日本 Biwa 湖的主要污染源是稻田退水(Line

① UKDEFRA. <http://www.defra.gov.uk/foodfarm/landmanage/water/csf/index.htm>. 2002-06-27, last modified: 2009-09-01.

② USEPA. National Management Measures to Control Nonpoint Pollution from Agriculture, 2002.

等,1997)。

我国也有 63% 的湖泊水体达到富营养化,其中 50% 以上的 N、P 负荷来自农业面源(王晓燕,2003)。云南洱海(杨建云,2004)、江苏太湖(夏立忠,2003)、北京密云水库(王晓燕等,2002)、安徽巢湖(阎伍玖等,1998)、天津于桥水库(王刚和郭柏权,1999)和云南滇池(阎自申,1996)等重点治理水域,因面源污染影响,水环境质量难以彻底改善和修复。

2007 年我国农业源化学需氧量(COD)排放量占全国 COD 排放总量的 43.7%;农业源 TN、TP 排放量分别占排放总量的 57.2% 和 67.4%;畜禽养殖业的 COD、TN 和 TP 分别占农业源的 95.8%、37.9% 和 56.3%^①。类比计算,随畜禽废弃物排放的氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)可占农业源的 42.4%。在工业点源和城镇生活源治理率不断提高的发展趋势下,农业面源无疑将成为水环境的最大污染源。

污染物 N、P 输移机理研究是农业面源研究中的主要内容。一般认为,N、P 主要是通过污染物结合在悬浮颗粒上,随土壤流失进入水体,而水溶性较强的污染物则被淋溶进入径流(Stefano 等,2000);氮常以溶解态在渗滤水中传输,而磷和土壤颗粒结合被输移(Pionke 等,2000);径流中溶解态 N、P 的流失量与表层土壤性状、径流发生地点有关,颗粒态 N、P 与径流过程中的土壤侵蚀有关(Sharpley 等,1996)。与土壤相比,侵蚀泥沙有较高的养分含量,表现出对 N、P 等养分的富集作用(Sharpley,1985)。随地表下径流流失的 P 被认为是非常少的(Torrecilla 等,2005),但当土壤地表水含 P 时,集水区地表下流失的 P 非常明显(McDowell 等,2001)。可见,即使是对 N、P 输移机理也没有达成完全共识。造成这种困扰最根本的原因是对 N、P 的输移机理还不是十分清楚。2011 年我国土壤侵蚀面积 294.91 万平方千米,水

① 中华人民共和国环境保护部,中华人民共和国国家统计局,中华人民共和国农业部.第一次全国污染源普查公报,2010.

水土保持措施面积 99.16 万平方千米^①, 占总土壤侵蚀面积的 33.6%, 土壤侵蚀造成的受纳水体水环境质量问题不应小觑。因此, 有必要研究土壤到径流到水环境的溶解态和吸附态 N、P 的输移过程, 为揭示其机理提供数据支持。

农业面源污染具有随机性大、分布范围广、影响因子多、形成机理复杂和潜伏滞后等特点, 致使污染治理方面还存在着诸多不确定性和复杂性。与点源污染相比, 面源污染受降雨强度和土地利用影响很大, 决定了面源污染治理不同于点源污染处理, 而是集中在土地和径流管理措施方面。结合农业活动采取综合性措施, 是减少或防止农业面源污染产生的关键 (Centner 等, 1999)。具体措施有农作物覆盖、等高线耕作、条状种植、保护性耕作、营养物管理、河滨植被缓冲带、人工湿地、梯田、过滤带和水道、牧场管理、带状种植等^②。单一措施普遍存在“保一损一”现象, 如与传统耕作相比, 少耕法或免耕法虽然减少地表径流中的 N 负荷, 但却增加 NO_3^- -N 淋溶量 (Drury 等, 1993); 而等高耕作地表径流中 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 PO_4^{3-} -P 浓度均高于传统耕作法地表径流 N、P 浓度 (Alberts 和 Spomer, 1985)。免耕、少耕和残茬覆盖等单一的保护性耕作措施不能有效减少土壤中 N、P 养分的流失 (Stevens 和 Quinton, 2009)。污染防治措施的综合建设及优化组合成为减少农业面源污染和流域水环境质量改善的有效途径。农业面源污染防治研究逐渐从理论探索转向实际应用、从单一措施转向多种措施并存的阶段。

我国农业面源污染管理和控制措施零散, 没有形成系统的体系。但我国通过长期研究发展的“工程措施、生物措施和蓄水保土相结合”的水土保持综合防护体系对减少水土流失效果明显, 而且示范分布广泛。水土保持系统在减少土壤侵蚀方面成果斐

① 中华人民共和国水利部, 中华人民共和国国家统计局. 第一次全国水利普查公报, 2013.

② Georgia Soil & Water Conservation Commission. Agricultural best management practices for protecting water quality in Georgia, 1994.

然,但对水保措施的面源污染防治效果缺乏足够的关注。因此,充分利用小流域水土保持示范区,开展水保措施的面源污染防治效果研究,进而提供有效的措施优化组合是促进我国农业面源污染防治的重要途径。

东北地区是我国重要的商品粮基地和粮食生产后备区。独特的土壤特性、地形地貌、气候特征和长期采用频繁耕翻、无秸秆覆盖、顺坡耕作等常规农田管理,造成黑土地土壤侵蚀严重(刘宝元等,2008)。由此形成的面源污染不同程度地影响着区内饮用水源地安全,松花湖、石头口门水库、月亮湖、五大连池、连环湖、新立城水库等均处于中度营养水平以上,个别水库出现局部区域“水华”现象。松花湖流域面源 TP、TN 负荷约占总负荷的 88% 和 71%(王宁,2001;王霞,2005);新立城水库 1998 年 TN 面源污染负荷占总负荷的 81%(杨爱玲,2000);松花江流域农田 TN、TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 污染负荷最高(岳勇等,2007)。松嫩平原、吉林西部地表径流与农田回归水对松花江及嫩江的水质碱化贡献率达 55%~65%(陈静生等,1999;阎百兴,2001)。黑土区水土流失对土壤和水资源危害严重,“东北黑土区水土流失综合防治一期工程饮马河流域吉林省长春市莲花山流域项目”的实施,多个小流域水土保持示范工程相继建设并投入使用,为小流域农业面源污染综合研究提供了契机和平台;可为我国农业产粮大省——河南省改良坡耕地地力,减缓土壤质量退化,提升粮食产量提供措施保障。

二、选题目的

通过研究坡耕地土壤-径流系统中 N、P 形态及负荷的变化,①全面掌握面源污染中溶解态和吸附态 N、P 的输移过程,量化污染负荷和污染物流失水平,为确定科学合理的面源污染防治规划提供理论基础;②探讨水土保持措施的面源污染防治效果,结合零维水质模型和动态规划模型,提供实现小流域出口水质-水

量俱佳的措施优选配置方案,为小流域综合治理提供示范依据。

三、选题意义

我国“十一五”环境保护规划要求加快实现“环境保护滞后于经济发展转变为环境保护和经济发展同步,做到不欠新账,多还旧账,改变先污染后治理边治理边破坏的状况”。加强小流域综合治理,控制水土流失,开展农村面源污染防治综合治理的试点、示范是饮用水水源安全和粮食生产安全的全力保障,也是促进社会主义新农村建设的重要任务,更是实现水环境保护与农业生产协调发展的科学之路。

控制农业面源污染是农业与农村可持续发展的重大课题;如何实现粮食增产不增污是当前急需解决的问题之一;如何充分利用“全部降水就地入渗拦蓄”为核心的水土保持综合防护体系进行面源污染防治及其措施的优化配置是当前乃至今后农业面源污染综合研究的重要任务。

定量研究我国大粮仓——东北地区小流域农业面源污染及水土保持措施的面源污染防治效果和防治措施配置研究,可为小流域综合治理和大流域水环境保护提供理论基础,为河南省实现水源地水环境安全和保障耕地资源的数量和质量提供重要示范意义。

第二节 农业面源污染研究进展

农业面源污染主要是指农业生产活动中,农田中的土粒、氮、磷、农药等有机、无机物质,在降水、灌溉或其他过程中,通过地表径流、农田排水和地下渗漏,大量进入水体,其浓度和含量超过水体的自然净化能力,使水体水质和底质的物理、化学性质或生物群落组成发生变化,从而降低水体的使用价值和使用功能。污染源确定、污染负荷量化、输移机理探索、相关法规制定及防治措施

建设一直是面源污染研究的重要内容。农业面源污染的发生和程度与水文循环、土壤侵蚀密不可分,污染物的迁移、转化、输送与水文损失过程、降雨、径流、下垫面关系密切,决定了农业面源污染日渐成为汇集农学、环境科学、统计学、信息系统学等学科的交叉研究流域。

一、污染源确定和农业面污染模型发展

20 世纪 80 年代,科学技术的迅猛发展和生产工艺的不断改进,人们的环境保护意识逐渐提高,90%的环境保护投资用于点源污染的治理和控制,近 100%点源污染物达标排放,但是,1992 年美国仍有 44%的评价河段不能完全满足其水体功能要求(Puckett,1995)。农业面源污染成为发达国家地表水环境的首要污染源和重点研究对象,同时,发展中国家也开始进行湖库水体富营养化调查和流域综合治理,面源污染研究进入全面发展阶段。

与工业、生活点源污染的固定时间、固定数量和固定排放口等“固定性”特点相比,农业面源是污染物以广域的、分散的、微量的形式进入水环境,具有时空范围更广,随机性更强,成分、过程更复杂等“不确定性”特征。面源污染负荷量化也是面源污染研究中的基础内容和艰巨任务。常用的面源污染负荷量化方法分为经验方法和模型模拟。

(一)农业面源污染负荷量化经验方法

1. 统计调查方法

将抽样调查原理和统计学原理融入农业源污染负荷调查,主要有重点调查、抽样调查和典型调查三种。

2. 二源分割法

选取不同尺度流域出口为监测点进行水样采集和分析;根据

流域出口丰水期和枯水期水量及污染物浓度,采用二源分割法计算流域输出面源污染负荷。

3. 输出系数法(单位面积负荷法)

输出系数法(Johnes,1996),对不同种植作物的耕地、不同牲畜根据其数量和分布采用不同的输出系数;对人口的输出系数则主要根据生活污水的排放和处理状况来选定。在总氮输入方面还考虑了植物的固氮、氮的空气沉降等因素。

4. 水质-水量相关法

该方法是以径流试验场或河道水质、水量同步监测资料为基础开发的经验模型,是建立在大量实测数据的基础上,适合于有较好数据基础的流域。

5. 降雨量差值法

其基本思路为非点源污染的产生受降雨量和降雨径流过程的影响,晴天或雨天不产生地表径流时,流域的污染全部为点源污染,发生暴雨并产生地表径流时,两者同时包括。点源较为稳定,可将其视为常数。任意两场洪水产生的污染负荷之差为这两场降雨量之差引起的非点源污染负荷。

这些经验方法能充分利用相对容易得到的土地利用状况等资料,直接建立土地利用与接纳水体面源污染负荷的关系,避免了对面源污染物产生和迁移过程的过多考虑,应用效果较好。

(二) 农业面源污染模型

美国农业部 1979 年开发的农业管理系统中化学物质、径流和侵蚀模型 CREAMS 奠定了非点源污染模型发展的“里程碑”。该模型首次综合了农业非点源污染迁移过程的各个环节,即水文、土壤侵蚀和污染物迁移过程,用于评价田间尺度多种耕作措施下土壤侵蚀和水质状况(Knisel,1982)。美国 Hydrocomp 公司