

农业非点源污染 数学模型及控制措施研究

——以青铜峡灌区为例

MATHEMATICAL MODEL AND CONTROL MEASURES OF
AGRICULTURAL NON-POINT SOURCE POLLUTION

Case studies in Qing-Tong -Xia Irrigation District

李强坤 李怀恩 著

中国环境科学出版社

任意非点阵约束 数学模型及控制理论探讨

——以两自由度系统为例

王德成 王德成 王德成 王德成 王德成 王德成 王德成 王德成 王德成 王德成
王德成 王德成 王德成 王德成 王德成 王德成 王德成 王德成 王德成 王德成
王德成 王德成 王德成 王德成 王德成 王德成 王德成 王德成 王德成 王德成

王德成 王德成 王

国家自然科学基金项目 (50879027)

中央级公益性科研院所基本科研专项资金 (HKY-JBYW-2007-16) 资助

农业非点源污染数学模型及 控制措施研究 ——以青铜峡灌区为例

李强坤 李怀恩 著

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

农业非点源污染数学模型及控制措施研究:以青铜峡灌区为例/李强坤,李怀恩著 —北京:中国环境科学出版社, 2010.7

ISBN 978-7-5111-0309-3

I. ①农… II. ①李…②李… III. ①农田水利—水污染—非点污染源—数学模型—污染控制—研究 IV ①X52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 125582 号

责任编辑 黄晓燕 王天一
责任校对 刘凤霞
封面设计 龙文视觉

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京崇文区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.eesp.com.cn>
联系电话: 010-67112735
发行热线: 010-67125803

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2010 年 7 月第 1 版
印 次 2010 年 7 月第 1 次印刷
开 本 880×1230 1/32
印 张 7
字 数 180 千字
定 价 26.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载,侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题,请寄回本社更换

前 言

近年来,随着水环境问题的突出以及点源污染治理水平的相对提高,非点源污染尤其是化肥、农药的大量使用而引起的农业非点源污染问题日益引起人们的关注和重视。大量研究表明,农业非点源污染已成为当前影响水体环境质量的主要因子。我国是一个以农业为主的发展中国家,农业非点源污染非常严重。根据相关资料统计,2005年全国总污染负荷中的氮、磷两项污染,非点源污染的贡献率超过50%;化学需氧量污染中非点源污染贡献率占到近40%,并有继续恶化的趋势。据中国农业信息网公布的数据核算,中国2005年使用化肥4766万t(折纯),按当年农作物播种面积计算,农作物的平均化肥施用量为 306.5 kg/hm^2 ,是世界平均化肥用量的3倍。2005年,我国东部湖泊的污染负荷输入量中,农业非点源污染负荷已超过50%。2010年2月,国家环保部、国家统计局、农业部联合公布了我国《第一次全国污染源普查公报》,其中农业非点源污染占有很大的比例。

基于国家自然科学基金项目(50879027)、中央级公益性科研院所基本科研专项资金(HKY-JBYW-2007-16)资助,以黄河上游青铜峡灌区为例,采取典型区监测试验与模型模拟相结合的研究手段,开展了农业非点源污染监测和模拟研究工作。本项研究主要内容包括:以典型农业非点源污染试验区监测试验资料为基础,分析了盐分、氮、磷等主要农业非点源污染物在灌区输水系统、田间系统和排水系统的运移特征;结合农业非点源污染的产生和迁移特

点, 将农业非点源污染整体模型划分为“源”“汇”模块并分别构建, 组成了完整的农业非点源污染负荷模型; 并将模型应用于青铜峡灌区, 计算了青铜峡灌区 2008 年典型时段的农业非点源污染输出负荷。同时, 根据农业非点源污染在“源”“汇”环节的不同特点, 通过模型定量分析, 提出“源”“汇”环节不同的农业非点源污染控制措施。

在上述研究基础上, 经过系统的归纳总结, 进一步提炼, 编纂成此书。全书共分九章, 第一章绪论; 第二章为研究区概况介绍; 第三章介绍了青铜峡灌区农业非点源污染典型监测试验区及其监测试验过程及具体应用; 第四至六章主要内容为农业非点源污染模型构建; 第七章为模型示例运用; 第八章, 根据农业非点源污染在“源”“汇”环节的不同特点, 采用不同的控制措施等详细介绍。

本书由李强坤、李怀恩合著。在项目实施过程中, 黄河水利科学研究院引黄灌溉工程技术研究中心陈伟伟、孙娟两位同志参与了项目监测试验的全过程, 并承担了部分资料的分析工作; 在“汇”模块构建过程中, 胡亚伟、侯爱中两位同志在模型构建、编程求解等方面做了大量工作; 在整个研究项目实施过程中, 黄河水利科学研究院引黄灌溉工程技术研究中心苏运启、张会敏等领导始终给予大力支持和帮助, 西安理工大学沈冰教授、贾忠华教授、秦毅教授、冯民权教授等予以热心指导, 宁夏水文水资源局张学文、宁夏水利勘测设计院陈天伟、宁夏水利厅王立明等同志也都给予了不同程度的帮助, 在此一并致谢。

限于作者水平和各方面条件限制, 书中难免存在不当甚至错误之处, 欢迎各位读者与同行予以批评指导。

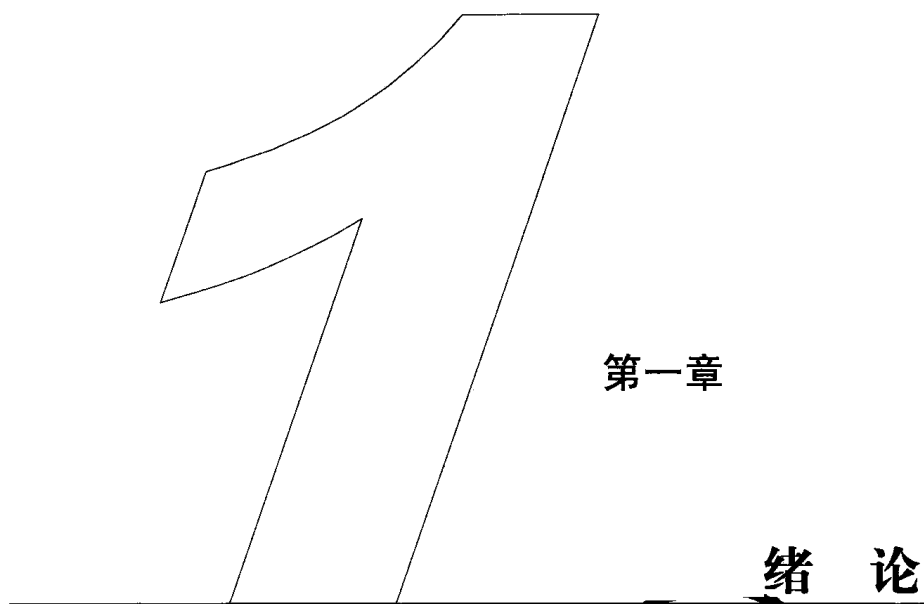
作者

2010 年 4 月

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究进展和趋势.....	5
1.3 研究内容和技术路线.....	24
第二章 研究区概况	29
2.1 自然地理概况	29
2.2 社会经济概况	33
2.3 水资源概况	34
2.4 引排水工程	36
2.5 灌区特点	39
2.6 水资源利用存在的问题.....	41
第三章 农业非点源污染监测试验及运移特征分析	43
3.1 农业非点源污染监测试验.....	43
3.2 污染物运移特征分析.....	50
3.3 小结	70
第四章 农业非点源污染整体模型	71
4.1 农业非点源污染特征.....	72
4.2 输出系数模型及其改进.....	73
4.3 农业非点源污染模型.....	80
4.4 小结	85

第五章 “源”模块构建	86
5.1 农田灌溉排水子模块	86
5.2 农田排水中污染物浓度的估算子模块	98
5.3 小结	117
第六章 “汇”模块构建	118
6.1 概述	118
6.2 水流连续方程	120
6.3 污染物迁移转化方程	122
6.4 模型求解	127
6.5 小结	135
第七章 模型应用	136
7.1 计算流程	137
7.2 田间产污计算	139
7.3 排污系数计算	144
7.4 输出污染负荷计算	150
7.5 小结	153
第八章 农业非点源污染控制措施研究	154
8.1 “源”环节控制	154
8.2 “汇”环节控制	181
8.3 小结	196
第九章 结论与建议	197
9.1 结论	198
9.2 建议	202
参考文献	204



1.1 研究背景

水与人类社会的发展密切相关。源于黄河流域的中华文明、源于尼罗河流域的古埃及文明、源于恒河流域的古印度文明、源于两河流域的古巴比伦文明等这些古代文明的兴起都和水资源的开发利用密切相关。进入 21 世纪，水资源正日益成为全球战略性资源，成为直接关系经济社会可持续发展的核心资源。人类发展与进步面临的人口膨胀、资源短缺和环境恶化三大问题均与水资源的开发利用相关。20 世纪下半叶，随着工业革命和人类社会化进程的发展，全球范围内的水资源短缺和水质恶化、饮用水安全与水源地保护等相关议题受到了全世界的广泛关注。1972 年，在联合国第一次人类环境会议上将 1981—1990 年作为“国际饮用水供给和卫生十年”，旨在促进和加强公共机构对饮用水源的管理。1992 年，第 47 届联

大通过决议,确定自 1993 年起将每年的 3 月 22 日确定为“世界水日”(World Water Day)。1996 年,作为之前召开过的各种有关水问题会议的集大成者,由联合国教科文组织、世界银行、国际水资源学会等机构提供技术以及资金支持成立了“世界水理事会”(World Water Council),作为该组织活动的一部分,世界水理事会 1997 年于摩洛哥马拉喀什召开了“第一届世界水论坛”会议,来自 63 个国家的 500 余人参加了这次会议,会议对“21 世纪关于水与生命、水与环境”作出了新的展望,勾画出了蓝图。在 2000 年 9 月举行的联合国千年峰会上,189 个国家的元首和政府领导人就包含八项“千年发展目标”以及相关 18 项具体目标和 48 项指数的《千年宣言》达成一致。2002 年,在南非约翰内斯堡召开的“世界可持续发展峰会”上,水问题也成为其中一个重要课题。2009 年闭幕的“第五届世界水论坛”会议,发布了《世界水发展报告》(第三部),再次向世界敲响了水危机的警钟,报告指出,全球人口增长、经济发展和气候变化,正成为影响地球水系统的驱动力,到 2025 年,全世界将有 35 亿人口缺水,涉及的国家和地区将超过 40 个。水问题的不断恶化不仅将制约世界经济和社会发展,还将进一步破坏自然生态系统,从而严重威胁人类生存。种种迹象表明我们正处在多方的水危机当中。不论是关系到健康、卫生、环境还是城市、食品、工业和能源生产等议题,21 世纪都将是水质和水管理问题最为重要的世纪^[1]。

我国是世界上人口最多的发展中国家,也是水资源相对短缺的国家。人多水少、水资源时空分布不均、与生产力布局不相匹配是中国的突出水情,也是我国将要长期面临的基本国情。特别是 20 世纪 90 年代以来,随着我国国民经济的迅猛发展,在水资源供给危机的基础上,水环境问题日益引起人们的关注和重视。《2008 年中国环境状况公报》指出,在评价的 200 条河流 409 个断面中,I~III 类、IV~V 类和劣 V 类水质的断面比例分别为 55.0%、24.2%和 20.8%。七大水系中,珠江、长江水质总体良好,松花江为轻度污染,黄河、淮河、辽河为中度污染,海河为重度污染;28 个国控重点湖(库)中,满足 II 类水质的有 4 个,占 14.3%;III 类的有 2 个,

占 7.1%；IV类的有 6 个，占 21.4%；V类的有 5 个，占 17.9%；劣 V类的有 11 个，占 39.3%。主要污染指标为总氮和总磷。在监测营养状态的 26 个湖（库）中，重度富营养的有 1 个，占 3.8%；中度富营养的有 5 个，占 19.2%；轻度富营养的有 6 个，占 23.0%。其中，太湖、滇池总体水质为劣 V类，巢湖总体水质为 V类，在太湖 21 个国控监测点位中，IV类、V类和劣 V类水质的点位比例分别为 14.3%、23.8%和 61.9%。2008 年，全国废水排放总量为 572.0 亿 t，比 2007 年增加 2.7%；化学需氧量排放量为 1 320.7 万 t，相比 2007 年下降 4.4%；氨氮排放量为 127.0 万 t，比 2007 年下降 4.0%。

水环境恶化是点源污染（Point Source Pollution, PSP）和非点源污染（Non-point Source Pollution, NSP）共同作用的结果。随着水环境问题的突出以及点源污染治理水平的相对提高，非点源污染，尤其是化肥、农药的大量使用而引起的农业非点源污染问题对水环境的影响作用将日益重要^[2]。农业非点源污染是指农业生产活动中所引起的各种污染物（盐分、营养物、农药、病菌等），通过农田地表径流、农田排水和地下渗漏等，以低浓度、大范围的形式从土壤圈向水圈扩散的过程。20 世纪 70 年代以来，西方国家的水污染治理实践证明，即使点源污染得到全面控制，河流、湖泊、水库等地表水水质达标率也仅为 42%~65%。在美国，非点源污染约占总污染负荷量的 2/3，其中农业非点源污染占非点源污染总量的 68%~83%，农业已经成为全美河流污染的第一污染源^[3]；丹麦 270 条河流中 94%的氮负荷、52%的磷负荷来自于农业非点源污染；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%^[4]；农业非点源污染影响了全球陆地面积的 30%~50%^[5]。据统计，到 2020 年，经济合作与发展组织（OECD）国家农业总用水将增长 15%，农业入河的氮和生化需氧量（BOD）将至少增加 25%^[6]。

我国地表水污染中的农业非点源污染负荷也占很大比重，根据相关检测和调查数据，我国农业非点源污染负荷 2002 年就全面超过工业污染和城市污染，成为最大的环境污染源；2005 年全国总污染负荷中的氮、磷两项污染，农业非点源污染的贡献率超过 50%；

COD（化学需氧量）污染中农业非点源污染贡献率占到近 40%，并有继续恶化的趋势^[7]。据中国农业信息网公布数据核算，中国 2005 年使用化肥 4 766 万 t（折纯），按当年农作物播种面积计算，农作物的平均化肥施用量为 306.5 kg/hm²，是世界平均化肥用量的 3 倍。由于化肥利用率低下，其中氮肥的利用率为 30%~35%，磷肥为 10%~20%，钾肥 35%~50%^[8]。2005 年，我国东部湖泊的污染负荷输入量中，农业非点源污染负荷入湖量已超过 50%；大理洱海流域非点源氮、磷污染负荷分别占流域污染负荷的 97.1%和 92.5%；滇池农业非点源污染产生的总氮、总磷负荷占水体总量的 59%和 30%^[9]；太湖农业非点源氮、磷负荷占入湖总量的 77%和 33.4%；巢湖流域农业非点源污染氮、磷负荷分别占入湖总量的 74%和 68%^[10]。世界银行的报道指出，中国地下水有将近 50%被农业非点源污染^[6]。目前，中国受农业非点源污染影响的耕地面积已近 2 000 万 hm² ^[11]。而到目前为止，我国在水环境污染的治理方面仍然以点源为主，开展的研究较多，治理技术也相对成熟，对于农业非点源污染问题，由于监测资料缺乏，研究成果少，在实际工作中很少、甚至没有考虑，往往造成水污染控制规划与控制措施脱离实际、控制目标落空等严重后果。

鉴于农业非点源污染研究的重要性，《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》在确定的 11 个国民经济和社会发展的重点领域 68 项优先主题中，其中水和矿产资源、环境、农业三大重点领域中第（12）、（13）、（22）三项优先主题都涉及农业水土环境问题。“十一五”国家高技术研究发展计划（863 计划）、“十一五”国家科技支撑计划也都安排了类似项目进行研究，同时，开展人类活动对水循环与水文水资源、水生态与水环境工程等影响的研究也是国家自然科学基金近年来的鼓励申报项目。2008 年我国新修订的《中华人民共和国水污染防治法》，其显著的一个特征就是提出要“防治农业面源污染，积极推进生态治理工程建设”，第四十八条第二款要求“合理地施用化肥和农药，控制化肥和农药的过量使用，防止造成水污染”；2009 年 4 月颁布的《全国新增 1 000

亿斤粮食生产能力规划（2009—2020 年）》在农业生态环境保护体系建设中明确提出要“加强农业面源污染监测和治理，在粮食生产核心区建设农田生态拦截工程，在河湖入口处建设人工湿地示范工程”、“依据区域气候、土壤、种植制度等特点，在粮食生产核心区建设 160 个县级农业面源污染监测站，建立健全农业面源污染监测体系”。农业非点源污染问题已经引起国家、地方及有关专家学者的高度重视。

1.2 国内外研究进展和趋势

1.2.1 非点源污染的提出及认识

非点源污染一词是从英文“Non-point Source Pollution”（NSP）转译过来的，是相对于点源污染（Point Source Pollution, PSP）而言的。点源是指以点状形式排放而使水体造成污染的发生源。根据欧美有关文件解释，点源污染最简单明确的定义是：污水在排放点通过排污管网直接进入水体。按照这一界定，无论是生活、工业还是生产活动产生的污水，凡是通过污水管网直接排入水体的均属于点源污染^[12]。一般工业污染源和生活污染源产生的工业废水和城市生活污水，经城市污水处理厂或经管渠输送到水体排放口，均属点源污染。与点源污染不同，按照美国清洁水法修正案（1997）（The U.S. Clean Water Act Amendments of 1997）对非点源污染的定义为：污染物以广域的、分散的、微量的形式进入地表及地下水体。非点源污染形式包括大气干湿沉降、暴雨径流、底泥二次污染和生物污染等诸多方面引起的水体污染。

非点源污染与点源污染相比，具有不同的污染特性，具体表现在^[13]：① 随机性。从非点源污染的起源和形成过程分析，非点源污染与区域的水文过程密切相关。此外，非点源污染的形成还受其他许多因素影响，如土壤结构、农作物类型、气候、地质地貌等。降水的随机性和其他影响因子的不确定性，决定了非点源污染的形成

具有较大的随机性；② 广泛性。随着世界经济的发展，人工生产的许多为自然环境所无法接受的化学物质逐年增多，在地球表层分布广泛，随着径流进入水体的污染物遍地可见，其所产生的生态环境影响更加深远而广泛；③ 滞后性。农田中农药和化肥的施用造成的污染，在很大程度上是由降雨和径流决定的，同时也与农药和化肥的施用量有关。当刚刚施用化肥后，若遇到降雨，造成的非点源污染将会十分严重。并且农药和化肥在农田存在的时间长短也将决定非点源污染形成的滞后性的长短。通常，一次农药或化肥的施用所造成的非点源污染将是长期的；④ 模糊性。影响非点源污染的因子复杂多样，由于缺乏明确固定的污染源，因此在判断污染物的具体来源时存在一定的难度。以农业非点源污染为例，农药和化肥的施用是非点源污染的主要来源，但农药施用量、生长季节、农作物类型、使用方式、土壤性质和降水条件不同时，所导致的农药和养分的流失将会有巨大的差异，而不同因子之间又相互影响，因而使得非点源污染的形成机理具有较大的模糊性；⑤ 潜伏性。以农药、化肥施用为例，施用之后，在无降水或灌溉时，形成的非点源污染十分微弱，在更多的情况下，农业非点源污染直接起因于降水和灌溉的时间。城市地表径流污染也有同样的特点，在无降水条件下，散落在城市空间的许多固体污染物、垃圾对水体的危害十分有限，但在降水时，随着径流进入水体将会形成严重的非点源污染；⑥ 隐蔽性。由于点源活动是人类活动的直接产物，故一般情况下，点源污染会随着人类活动的加剧而急剧增加，因此，点源污染更容易引起人们的注意。而非点源污染并非由单一的人类活动所致，其负荷随人类活动的变化也不像点源污染那样剧烈，所以，不易引起人类的重视。

对于非点源污染及其危害，人们是在防治水污染的实践过程中逐渐认识的。20 世纪 40 年代，美国学者 C.N.Sawyer 调查一个湖泊的营养物质收支平衡时，在向威斯康星州政府的报告中首次提出了非点源污染问题，但当时并没有引起人们的注意^[4]。20 世纪 60 年代以前，人们一直认为工业、生活废污水的集中排放（点源）是造

成水污染的主要原因,并没有认识到非点源污染的严重后果。美国曾一度设想只要将废污水集中高度处理,就可以从根本上解决水污染问题,但之后的治理实践证明,点源污染的处理只能解决水污染的部分问题。1964年7月,美国水污染控制联合会会刊(JWPCF)发表了 Weibel 的文章《市区排水是河流污染的一个因素》,首次公开报道城市雨水管网排放的雨水径流也是一个污染源^[15]。1972年 Bowen 的研究也认为,降雨径流冲刷污染是对下一个污染控制的挑战^[16]。

20世纪60年代以后,人们逐渐认识到非点源污染的影响及其危害。1970年美国成立环境保护局接管水质管理业务;1972年实施联邦水污染控制法修正案 PL92-500,该法208节提出了对非点源污染进行控制的要求^[17]。之后,在对1972年《水清洁法》进行多次修正的基础上,美国1999年又制定了新的《水清洁行动计划——恢复和保护美国的水体》,其重点是非点源污染的控制和管理^[18]。美国研究非点源污染的著名学者 Novotny 教授指出^[19],非点源污染是一个有待解决的世界性难题。Carpenter 等指出^[20],由于 N、P 的过量富集,在美国,河流、湖泊(水库)、河口、海岸带等地表水体的富营养化已经成为一种广泛存在的问题,而来自农业和城市(包括工业)的非点源污染是水生态系统 N、P 的主要来源。过量的营养物输入水生态系统,会产生很多问题,如有害藻类大量繁殖(水华)、溶解氧下降、鱼类死亡、生物多样性降低等。因此,营养物富集将显著降低水生态系统的功能和严重影响水体的饮用、工农业、娱乐等用途。目前,非点源污染问题已经引起许多国家的重视。美国是开展研究与控制最多的国家,加拿大、英国、澳大利亚、德国等也做了很多工作^[20-26]。此外,日本、瑞典、匈牙利、荷兰、爱沙尼亚、土耳其等很多国家也已开始引起重视^[27-28]。同时,非点源污染研究也得到了国际学术界的重视,有关研究成果已经在国际最权威的《Nature》^[29]和《Science》^[30]上发表。

随着对非点源污染各项控制和管理措施的不断实施,人们对非点源污染的认识也逐步深入。人们早期提出的非点源污染概念主要

指的是降雨径流污染，随着研究的深入，人们逐渐赋予了非点源污染更为丰富的内涵，泛指除点源以外的一切污染形式，包括线源、面源、体积源等，按照国际研究惯例，非特指情况下，非点源污染仍然指的是由于降雨径流的冲刷所带来的污染。同时，按照非点源污染形成的机制和发生区域，又相继提出了水土流失型非点源污染、农业非点源污染以及城市非点源污染等，研究进一步细化，如图 1-1 所示。

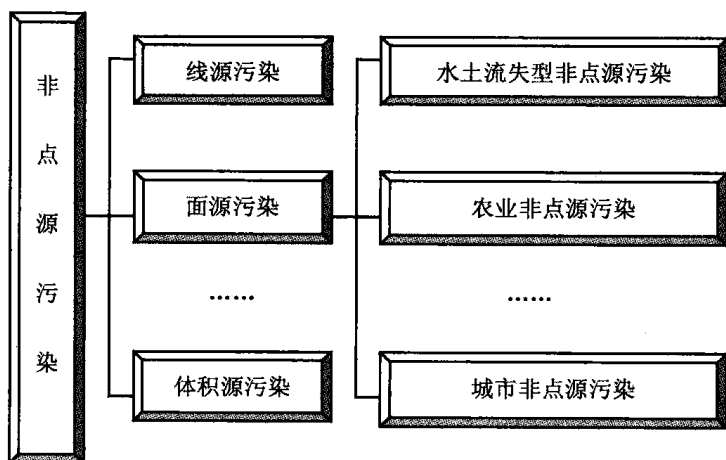


图 1-1 非点源污染的类型划分

从图 1-1 中的划分可以看出，面源污染即是非点源污染的一种表现形式，同时又进一步细分为水土流失型非点源污染、农业非点源污染及城市非点源污染等多种形式。因此，在进行具体问题研究时，将面源污染等同于农业非点源污染是不合适的，有必要进一步限定。

1.2.2 农业非点源污染模型研究进展

1.2.2.1 国外研究

相对于点源污染而言，非点源污染具有来源和排放地点不固

定、污染负荷时空变化幅度大等不确定性特点，因而导致非点源污染的监测、控制和处理困难而复杂^[31]。国外从 20 世纪 70 年代开始系统地研究农业非点源污染问题，回顾近 40 年来的研究进展，描述非点源污染负荷定量化的数学预测模型始终是研究的重点。依据模型原理和描述的手段、方法，可将农业非点源污染预测模型大致划分为 3 类：经验型模型（Empirical Model）、确定型（机理）模型（Mechanism Model）和随机模型（Random Model）^[32]，其中确定型模型根据其适用范围不同又可进一步划分为农田尺度模型和流域规模模型。

（1）经验型模型。主要应用于农业非点源污染研究初期。20 世纪 60 年代至 70 年代初，是农业非点源污染模型研究的起步阶段。20 世纪 60 年代，人们就已经认识到了非点源污染的潜在危害，但由于缺乏有效的定量评估手段，往往依据因果分析和统计分析的方法建立污染负荷与流域土地利用或径流量之间的统计关系，简便地计算流域出口处的污染负荷^[33]。随后研究者在污染源调查、非点源污染的影响因素、特性分析、单场暴雨和长期平均污染负荷输出、非点源污染对水质的影响分析等方面取得了大量的成果，为农业非点源污染模型的进一步研究奠定了基础^[34]。

1971 年，Hydrocomp 公司开始为 USEPA（美国环保局）研制农药输移和径流模型 PTR（Pesticide Transport and Runoff Model）以及最初的城市暴雨水管理模型 SWMM（Urban Storm Water Management Model）^[35]。其中 SWMM 模型经过不断地完善和升级，目前已经发展到 SWMM 5.0 版本，并广泛应用于城市排水系统的设计和规划。SWMM 模型可以对雨水管、合流制管道、自然排放系统进行水量水质模拟，它包括地面径流、排水管网输送、贮水处理及接纳水体的影响等。SWMM 模型可以对单场降雨或者连续降雨而产生的坡面径流和水质变化进行动态模拟，也可以对排水系统中节点、管道、汇水区以及其他排水构筑物的流量、水深和流速等时间序列进行仿真模拟，还可以完整地模拟回水影响、逆流、明渠、地下管网、环状管网以及各种复杂的排水构筑物。所以 SWMM 模