

农药面源污染流失特征及 生物炭控制优化

欧阳威 郝芳华 等 著



科学出版社

农药面源污染流失特征及 生物炭控制优化

欧阳威 郝芳华 等著

科学出版社

北京

内 容 简 介

针对我国农业生产过程中农药使用、流失和控制特征,本书首先介绍了全国农药流失现状及流失匡算、在代表性流域开展的水体农药残留观测与代表性农药流失时空特征模拟,重点论述了基于生物质炭优化制备及用于农药污染物的原位控制效果,对于我国不同类型秸秆废弃物生物质炭处理提出了针对性建议。

本书可供环境科学与工程、农业资源与环境、农业生态工程等相关专业的科研人员与管理人员、高等院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

农药面源污染流失特征及生物炭控制优化/欧阳威等著. —北京:科学出版社, 2016.6

ISBN 978-7-03-049256-2

I. ①农… II. ①欧… III. ①农药污染—面源污染—生物控制—研究 IV. ①X592

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 146488 号

责任编辑:朱 丽 / 责任校对:蒋 萍
责任印制:张 伟 / 封面设计:耕者设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2016 年 6 月第一次印刷 印张: 14 1/4

字数: 300 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

农药在推动农业发展和保障粮食安全方面扮演着重要角色，我国农药使用量位居全球首位。经济的快速发展使我国的农业种植结构发生了很大变化，然而有关农业种植结构与农药使用时空特征的研究相对有限。伴随着农药的大量使用，农药在降雨冲刷和地表径流的作用下进入地表水体，造成地表水环境质量恶化，同时对人体健康造成潜在的健康风险。

农药类有机污染物在农业环境中的运移和归趋是一个非常复杂的过程，包括土壤有机质吸附，作物的吸收，通过径流、淋溶和挥发等作用发生迁移，还可以通过光解、生物降解和化学降解等过程发生转化。其中，吸附是农药在农田中的迁移转化过程中最重要的作用之一。生物炭是生物质在限氧条件下热分解得到的产物，可将生物质中易分解的碳转化为更稳定持久性的固定碳。由于生物炭具有多孔结构和特殊的物理化学性质，因此其对农业面源污染物具有很强的吸附能力，作为土壤改良剂可有效降低农药类有机污染物的风险。

本书所涉研究采用建立清单、地理信息技术和模型模拟等方法对我国农药使用时空特征及典型流域农药流失模拟进行研究，估算了我国农药的使用量和流失量，分析了我国农药使用和流失的时间变化特征和空间分布规律，开展了典型小流域农药流失的模拟研究。以玉米芯、玉米秆、大豆秆和水稻秆 4 种北方常见的生物质作为原料，分别在不同热解温度以及预处理条件下制备出一系列生物炭。通过不同的测试方法表征生物炭的组成结构及物理化学性能；采用热重分析方法研究生物质通过热分解制备生物炭过程中的热解行为特性，重点研究生物炭对阿特拉津的吸附行为。通过等温吸附平衡方法，探究除草剂阿特拉津在玉米秸秆来源的生物炭上的吸附特性，同时研究了磷酸二氢铵（ADP）预处理前后的玉米秆所得的生物炭对阿特拉津的吸附行为，研究了不同生物炭改良的土壤对阿特拉津的行为。本书评估了流域农药污染控制措施对农药流失负荷的影响，旨在为我国地表水农药污染的防控提供科学的理论依据和决策支持。

本书是“十二五”国家科技支撑计划课题“东北规模集约化农区农业面源污染防治防控技术集成与示范”研究工作的总结，也是多位研究生论文的精华。项目组的同学们克服了研究区域路途遥远、物质保障条件差等问题，积极开展工作、深入了解东北集约化区域农业生产特征、农户耕作习惯和农场制的农业政策，获得

了很多珍贵的信息。本书写作分工如下：第 1 章绪论由郝芳华、赵旭晨完成；第 2 章我国各省份农药使用量匡算由蔡冠清、郝芳华完成；第 3 章我国各省份农药流失量匡算由蔡冠清、欧阳威完成；第 4 章典型小流域农药污染实验分析由蔡冠清、欧阳威完成；第 5 章典型小流域农药流失模拟研究由蔡冠清、欧阳威完成；第 6 章典型小流域农药污染控制的管理措施由蔡冠清、郝芳华完成；第 7 章生物炭的制备、表征和热解特征由赵旭晨、郝芳华完成；第 8 章不同温度制备的生物炭对农药的吸附性能由赵旭晨、欧阳威完成；第 9 章 ADP 改性前后的生物炭对农药吸附的对比研究由赵旭晨、欧阳威完成；第 10 章生物炭对农药在土壤中吸附行为的影响由黄威佳、郝芳华完成；第 11 章生物炭控制农药运移的优化研究由黄威佳、欧阳威完成。全书由欧阳威和郝芳华统稿。

在项目研究和书稿的撰写过程中，得到黑龙江省八五九农场、黑龙江省农科院、吉林农业大学和大连理工大学等部门的大力支持。本书的撰写还得到了北京师范大学环境学院林春野教授、程红光教授、沈珍瑶教授的大力协助。感谢课题组王芳丽、郭波波、魏鹏、高翔、黄浩波、曹嘉祺、许雪婷、杨万新、史炎丹、吴雨阳、连仲民、鞠欣妍、徐宜雪、徐逸、邬昊天和张琦等同学的努力与贡献。

全书从农药非点源污染流失与控制的科学性和实用性角度出发，在总结我国农药使用和典型流域流失研究工作基础上，阐述了运用农业秸秆制备生物质炭并优化运用于农药污染控制的理论、方法和应用，供广大环境科学与生态学工作者借鉴和批评。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及研究意义	1
1.1.1 粮食安全与农药	1
1.1.2 农药与农业面源污染	2
1.1.3 农业面源污染与生物炭	3
1.1.4 存在问题	5
1.1.5 研究意义	5
1.2 研究进展	6
1.2.1 农业面源污染研究	6
1.2.2 农药在环境中的归趋	9
1.2.3 农药流失的影响因素研究	11
1.2.4 地表水农药污染研究	13
1.2.5 污染负荷大尺度匡算研究	15
1.2.6 农药流失的模拟研究	16
1.2.7 生物质热解特性和制备研究	18
1.2.8 生物炭对农业面源污染的控制研究	19
1.3 研究内容和技术路线	20
1.3.1 研究目的	20
1.3.2 研究内容	21
1.3.3 技术路线	22
第 2 章 我国各省份农药使用量匡算	23
2.1 农药使用清单的建立	23
2.1.1 农药使用量的估算方法	23
2.1.2 农作物种植结构分析	23
2.1.3 农药使用强度的确定	25
2.1.4 资料来源和不确定性分析	25
2.2 农药使用的时间变化分析	25

2.2.1 农药使用的时间变化规律	25
2.2.2 农药使用与社会经济发展的演变	26
2.3 农药使用的空间分布规律	27
2.3.1 杀虫剂使用的空间特征分析	27
2.3.2 除草剂使用的空间特征分析	28
2.3.3 杀菌剂使用的空间特征分析	30
2.3.4 农药使用的空间特征分析	32
2.3.5 农药使用量估算的不确定分析	34
2.4 小结	35
第3章 我国各省份农药流失量匡算	36
3.1 农药流失清单的建立	36
3.1.1 农药流失量的估算方法	36
3.1.2 农药流失系数的计算	36
3.1.3 数据统计和不确定性分析	38
3.2 农药流失的空间特征分析	38
3.2.1 杀虫剂流失特征分析	38
3.2.2 除草剂流失特征分析	40
3.2.3 杀菌剂流失特征分析	43
3.2.4 农药流失清单及特征分析	44
3.2.5 农药流失量估算的不确定性分析	47
3.3 农药流失对我国水环境的影响	48
3.3.1 水环境安全风险评估	48
3.3.2 农药面源污染和水资源保护	49
3.4 小结	50
第4章 典型小流域农药污染实验分析	51
4.1 研究区概况	51
4.1.1 地理位置	51
4.1.2 气候特征	51
4.1.3 土地利用	53
4.1.4 土壤特性	54
4.1.5 农业措施	55
4.2 实验材料	56
4.2.1 样品采集	56

4.2.2 标准样品和试剂	58
4.2.3 仪器设备	58
4.3 实验方法	59
4.3.1 样品预处理	59
4.3.2 土壤基本属性的测定	60
4.3.3 水体农药含量的测定方法	61
4.4 结果与讨论	63
4.4.1 土壤基本属性	63
4.4.2 土壤的农药污染负荷	64
4.4.3 地表水农药含量分析	64
4.5 小结	67
第5章 典型小流域农药流失模拟研究	68
5.1 流域尺度农药流失模拟方法	68
5.1.1 SWAT 模型机理	68
5.1.2 模型数据库的构建	68
5.1.3 农药流失模拟对象	70
5.1.4 模型的验证及运行	71
5.2 典型小流域农药流失的时空特征模拟	72
5.2.1 流域农药流失负荷的年际变化特征	72
5.2.2 流域农药流失负荷的月际变化特征	74
5.2.3 流域农药输出负荷的空间分布特征	75
5.3 小结	80
第6章 典型小流域农药污染控制的管理措施	82
6.1 污染控制措施设置	82
6.1.1 最佳管理措施	82
6.1.2 农药使用强度管理情景设置	83
6.1.3 农药喷洒时间管理情景设置	83
6.1.4 保护性耕作管理情景设置	84
6.1.5 植被过滤带情景设置	84
6.2 不同污染控制措施的情景模拟分析	84
6.2.1 农药使用强度管理情景模拟分析	84
6.2.2 农药喷洒时间管理情景模拟分析	85
6.2.3 保护性耕作管理情景模拟分析	86

6.2.4 植被过滤带情景模拟分析	87
6.3 小结	88
第7章 生物炭的制备、表征和热解特征	89
7.1 生物炭的应用价值	89
7.1.1 生物炭增汇减排作用	89
7.1.2 生物炭土壤改良及对污染物的调控	89
7.2 生物炭的制备和表征	90
7.2.1 材料和实验仪器	91
7.2.2 实验方法	91
7.2.3 结果与讨论	95
7.3 生物质热解过程和热解动力学研究	120
7.3.1 材料和方法	122
7.3.2 热解动力学理论	122
7.3.3 结果与讨论	126
7.4 生物炭质量评价及在农业环境管理方面的应用建议	139
7.4.1 材料与方法	140
7.4.2 结果与讨论	140
7.5 小结	148
第8章 不同温度制备的生物炭对农药的吸附性能	150
8.1 实验材料	151
8.1.1 农药和试剂	151
8.1.2 主要仪器设备	151
8.1.3 生物炭选取	151
8.2 实验方法	152
8.2.1 吸附液配制	152
8.2.2 吸附实验	152
8.2.3 分析方法	152
8.3 吸附模型模拟	153
8.4 结果与讨论	154
8.4.1 Freundlich 吸附模型拟合	154
8.4.2 Langmuir 吸附模型拟合	158
8.4.3 Redlich-Peterson 吸附模型拟合	159
8.4.4 Dual-mode 吸附-分配模型拟合	160

8.4.5 生物炭的应用价值和环境影响	162
8.5 小结	164
第9章 ADP 改性前后的生物炭对农药吸附的对比研究	165
9.1 实验材料	165
9.1.1 农药和试剂	165
9.1.2 主要仪器设备	166
9.1.3 生物炭选取	166
9.2 实验方法	166
9.2.1 吸附液配制	166
9.2.2 吸附实验	166
9.2.3 分析方法	167
9.2.4 吸附模型模拟	167
9.3 结果与讨论	167
9.3.1 pH 对阿特拉津吸附行为的影响	167
9.3.2 温度对阿特拉津在两种生物炭上吸附行为的影响	168
9.3.3 吸附热力学	174
9.3.4 生物炭的环境价值评价	175
9.4 小结	177
第10章 生物炭对农药在土壤中吸附行为的影响	178
10.1 实验材料	178
10.1.1 样品采集区概况	178
10.1.2 主要仪器设备	178
10.1.3 实验试剂	178
10.1.4 实验样品	179
10.2 实验方法	179
10.2.1 土壤和生物炭理化性质分析	179
10.2.2 等温吸附实验	179
10.3 结果与讨论	180
10.3.1 土壤理化性质结果分析	180
10.3.2 阿特拉津在土壤中的吸附行为	181
10.3.3 生物炭对阿特拉津在土壤中吸附行为的影响	182
10.4 小结	187

第 11 章 生物炭控制农药运移的优化研究 189

11.1 实验材料 191

11.1.1 淋溶柱土壤样品 191

11.1.2 农药和试剂 191

11.1.3 污染土壤的培养 191

11.1.4 仪器设备 191

11.2 实验方法 192

11.2.1 淋溶土柱填充方法 192

11.2.2 降雨设置 193

11.2.3 实验装置 194

11.2.4 淋出液处理 194

11.2.5 淋溶土柱样品处理 194

11.3 土壤改良 194

11.3.1 生物炭添加配比 194

11.3.2 生物炭改良土壤对阿特拉津的去除效果 195

11.3.3 生物炭改良土壤对镉的去除效果 195

11.3.4 土壤改良方式设置 196

11.4 结果与讨论 196

11.4.1 生物炭改良土壤对阿特拉津的去除率 196

11.4.2 生物炭改良土壤对镉的去除率 197

11.4.3 不同改良方式和降雨强度对阿特拉津运移的影响 198

11.4.4 不同改良方式对阿特拉津在土壤中运移的影响 199

11.4.5 阿特拉津淋溶运移随时间变化的分布特征 200

11.4.6 降雨强度与改良方式对阿特拉津运移影响的差异显著性分析 202

11.4.7 不同生物炭水平对阿特拉津运移的影响 203

11.5 小结 204

参考文献 206

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及研究意义

1.1.1 粮食安全与农药

农药在农业现代化进程中扮演重要的角色。根据美国环境保护署（Environmental Protection Agency, EPA）的定义，农药是指任何能够预防、摧毁、驱逐或减轻害虫的物质或混合物。“害虫”包括昆虫、杂草、微生物、植物病原体等散播疾病、造成粮食减产的生命体^[1]。根据《中华人民共和国农药管理条例》定义，农药是指用于农业和林业生产中消灭和防控病、虫、草等危害以及调节植物生长的化学物质，包括天然来源和人工化学合成^[2]。按照用途分类，农药可分为杀虫剂、除草剂、杀菌剂、杀螨剂、植物调节剂等，其中以杀虫剂、杀菌剂和除草剂这三大类农药为主。按照化学成分分类，农药可分为有机农药、无机农药和生物农药，其中以有机农药为主。

人类在 4500 年前就开始使用农药来预防农作物病虫害等损害。最早的农药使用记录是大约公元前 2500 年美索不达米亚平原苏美尔人喷洒的元素硫。而世界现代农药的起步源于 1945 年。1874 年，德国 Zeidler 合成了滴滴涕，直到 1945 年由 Ciba-Geigy 公司实现了滴滴涕的产业化，一般把 1945 年作为世界现代农药的起点。我国 1951 年生产滴滴涕，现代农药的起步比国外晚 5~10 年。随着农药工业的快速发展，我国的农药产量和使用量均取得长足进步。2013 年，中国化学农药生产量为 318.95 万 t。作为重要的农业生产物资，农药在推动农业发展和保障粮食安全战略方面做出了巨大的贡献。世界范围内，农药使用挽回的粮食损失占粮食总产量的 1/3^[3]。在我国，农药的使用每年可挽回大量的农作物产量损失，仅挽回粮食损失就高达 7000 万 t，功不可没^[4]。

美国、中国、巴西、日本、法国和德国是全球农药使用最多的国家^[5,6]。在各大农药市场地区中，欧洲、亚洲和拉丁美洲位居全球农药市场的前三名。从农作物的角度看，果树和蔬菜是全球范围内农药的最大市场，其次为谷物、大豆、水稻。在美国，玉米、果蔬和大豆是使用农药最多的三类农作物，约占总市场的 68.73%；在南非，棉花和果树是使用农药最多的农作物，其次依次为谷物、玉米、

水稻。从农药类型的角度看,除草剂是全球最主要的农药类型。在北美,除草剂占很大的比重,杀虫剂增长回落,杀菌剂增长最快;在巴西,除草剂销售量最大,而杀菌剂是销售量增长最快的农药类型;在欧洲地区,除草剂为市场上最大的农药类型;在澳大利亚,除草剂是销售额最大的农药类型,杀虫剂位居第二位,杀菌剂占比最小^[7]。

我国的农药使用量已位居全球榜首。农药使用总量增长迅速,从1991年到2010年,我国农药使用总量增长了129.8%。1991年粮食作物、经济作物、蔬菜作物、茶和水果的农药使用量占总量的比例分别为75.08%、15.69%、4.38%和4.85%,2010年这一比例变化为68.38%、14.45%、10.78%和5.34%。其中粮食作物的比例下降,经济作物、茶和水果的比例小幅度增长,而蔬菜作物的比例增长最大。其中蔬菜作物的增长率最大,而粮食作物的最小,说明我国过去十年中农药施用量的迅速增长主要归因于蔬菜作物农药施用量的增长。农药施用量在不同地区间表现出明显的差距。东部、中部、西部、东北部地区1991~2010年的农药施用量增长量分别为24.44万t、39.93万t、19.82万t和15.09万t。相比于全国平均增长率129.8%,东北部地区的增长率远远高于全国平均水平,增长超过4倍,中部和西部地区分别为170.89%、174.43%,而东部地区以63.8%的增长率落后。东北地区的农药施用量增长主要是由于东北地区粮食作物的产量和播种面积的增长^[8]。

中国作为人口大国与农业大国,对粮食产量与食品安全的要求与日俱增。据中华人民共和国国家统计局2015年12月发布的数据显示,2015年我国粮食总产量以同比2.4%的增长速率达到6.2亿万t,实现了2004~2015年粮食生产的“十二连增”^[9]。虽然当前我国在保障粮食产量上取得了一定成就,但长期的“高投入高产”生产模式导致化肥、农药等农用化学品使用量也逐年增加^[10]。据《中国统计年鉴》显示,2011年我国单位耕地面积农作物化肥使用量为468.7 kg/hm²,远远超出世界平均水平^[11]。农用化学品污染已成为农业面源污染的主要来源之一。土壤与受纳水体中污染物负荷不断上升,痕量污染物种类日渐繁多,引发了严重的生态与环境问题^[12]。

1.1.2 农药与农业面源污染

农业面源污染(agriculture non-point source pollution)主要指在农业活动中,农田土壤中的氮素、磷、农药及其他物质,在降水或灌溉过程中,通过农田地表径流、农田排水和地下渗漏,造成大量污染物进入水体而形成的水环境污染。主要包括土壤流失、化肥污染、农药污染、畜禽养殖污染及其他农业生产过程中造

成的面源污染。在农业活动中, 农药为农作物的高产丰收提供了有效的保障, 作为农业生产的重要投入物在农业发展和粮食供给方面做出很大贡献。中国是农业大国, 由于农作物病虫害发生严重且频繁, 造成农药的品种多、用量大。我国近80%的农田都使用过农药, 致使国土面积的一半存在着不同程度的污染。大量的农药通过生产、运输、储存、使用、废弃等不同环节进入环境和生态系统, 造成土壤的污染, 不仅可使土壤酸化, 土壤养分减少, 而且对土壤动物、微生物和农作物等均可造成不良影响; 同时, 农药在迁移转化过程中进入水体, 对地下水造成污染。因此, 农药污染成为农业面源污染的主要来源之一, 所引发的生态与环境问题已引起人们的高度重视。

全世界每年使用的农药大致为 600 余万 t, 其中被农作物有效利用的仅占 20%~30%, 而 40%~60%的农药洒落在农田地表, 5%~30%的农药挥发进入大气。进入环境中的这 70%~80%的农药绝大部分经降雨冲刷和地表径流的携带作用最终汇集到水体。农药进入地表水环境后, 将降低水生生态环境质量, 造成生物量的减少和生物多样性的降低, 破坏水生生态平衡, 威胁水生生态系统安全^[13]。同时, 进入水体的农药对人体有潜在的健康风险。地表水体中的农药通过食物链或是皮肤接触等途径进入人体, 可被富集到很高的浓度, 进而危害人体健康。在很多国家, 农药被视为致癌污染物^[14]。

从全球范围来看, 已经有高达 30%~50%的陆地面积受到农业面源污染, 这也是导致水体污染的主要原因之一^[15]。当前, 我国农业面源污染日益严重, 尤其是广大农村地区过量使用农用化学品, 对大气、水体、土壤等环境造成污染是导致农村生态环境恶化的主要原因之一^[16]。据环保部门调查数据显示, 全国受农业面源污染的耕地约有 1.5 亿亩^[17], 巢湖、太湖、滇池等重要湖泊的水体质量也因污染而极度恶化^[18]。总的来说, 我国农业面源污染存在以下几大突出问题: 一是农业面源污染范围广、程度高, 覆盖全国农业主产区, 并呈继续蔓延的态势^[19]; 二是目前农业面源污染研究集中在氮磷污染上, 如何控制其他痕量农业污染物, 如有机污染物与重金属等的研究相对较少^[20]; 三是目前的研究多集中在对污染物受纳水体的综合治理上, 而这种针对面源污染的末端治理方式对于污染源头的环境改善无济于事^[21]。

1.1.3 农业面源污染与生物炭

秸秆通常指玉米、小麦、水稻、大豆和其他农作物在收获后剩余的部分。中国农业活动中产生的秸秆资源十分丰富, 为世界上秸秆总量的 20%~30%。据统

*亩为非法定单位, 1 亩 $\approx$ 666.7m²。

计,我国秸秆年产量已突破 8×10^8 t。农村传统处理秸秆的方法使得相当大的一部分秸秆资源没有得到合理的开发和利用。传统上,我国农村处理农作物秸秆的方式包括以秸秆代替煤、秸秆还田、秸秆饲料和露天燃烧等几种形式。秸秆代替煤作为燃料,即直接燃烧秸秆以利用其能源,是一种低效率的能源利用途径。秸秆还田,即将农作物秸秆堆积沤制成有机肥料,以增加有机质和提高土壤肥力并改善土壤结构,但有些秸秆不易腐烂,影响播种质量。秸秆饲料,即农作物秸秆在自然条件下是一种劣质饲料。有些秸秆质地粗硬,适口性差,采食率极低。露天燃烧,即将农作物秸秆在露天燃烧以加快收种和清除残余物的速度。虽然无机营养物质如钾、磷及微营养物将返回土壤中,但会破坏秸秆的所有有机物及营养物。长此以往,不但会造成土壤肥力下降,而且更重要的危害是增加温室气体排放,造成大气污染。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告表明,农业生产活动排放的 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等温室气体总量介于电热生产和尾气之间,成为全球温室气体的第二大重要来源。

生物炭(biochar)是指生物质在无氧条件下高温热解后的固态产物的统称。在环境管理方面生物炭的作用包括:①土壤改良:生物炭表面凹凸不平,内部孔隙结构发达,可以截留土壤中的污染物(如农药),同时生物炭可以提供作物生长所需的营养元素,减少化肥施用量,可作为天然的土壤改良剂;②减轻温室效应:添加到土壤中的生物炭因其特殊的化学和生物惰性使得土壤中的有机碳得以保存,并吸附和固定有机物质、黏土矿物,对土壤中的有机质起到稳定和固持的作用,因此,通过生物质(如农作物秸秆)转化为稳定的碳(如生物炭)的形式保存在土壤中,是 CO_2 减排增汇的根本途径之一;③农业废弃物管理:可将农业废弃物(如秸秆)经过碳化处理转化为生物炭和生物质能,不但减少直接燃烧带来的污染,还可以减轻秸秆储存和运输的成本。

农村种植固废生物质的资源化处理和利用引起了社会的普遍重视,其中生物炭资源化利用是秸秆处理的有效途径^[22]。生物炭是指生物质在无氧条件下高温热解后的固态产物^[23]。在环境管理方面生物炭具有管理农业废弃物、改良土壤质量、修复受污土壤、减轻温室效应、固持营养元素、提高作物产量等作用^[24]。尤其是生物炭还田对农业面源污染的控制作用及土壤改良效果越来越受到研究者的青睐,已有大量研究成果证实了其在控制氮、磷等污染物流失方面的积极作用^[25]。随着土壤与受纳水体中污染物浓度与负荷不断上升,污染物种类日渐繁多,人们研究的重点也逐渐由氮、磷等传统污染物转向生物炭对痕量农业面源污染的控制效果上^[26]。因此以农业废弃物为来源的生物炭,对环境保护以及在农业方面的应用具有深远的影响。

1.1.4 存在问题

粮食安全在我国被置于优先地位,同时也导致了农药在农田的广泛应用。2013年我国的总播种面积达 $1.63 \times 10^7 \text{ hm}^2$,同时由于经济的快速发展,农业种植结构发生了很大变化^[27]。粮食作物和经济作物的播种面积保持平稳,而蔬菜和水果的播种面积快速增加^[28]。考虑到不同农作物种类在农药使用方面的差异,农业种植结构的时空变化对农药使用有直接的影响。众所周知,水田粮食作物、茶叶和水果主要在我国南方地区种植,而旱田作物则主要集中在我国北方地区^[29]。然而,有关农作物种类与农药使用时空特征的研究相对有限。我国单位面积农药使用量远超全球平均水平,约为后者的 2.5 倍。伴随着农药的大量和广泛使用,我国的地表水正遭受来自农药污染的风险。我国部分河流已经检测到农药残留^[30]。农药流失所带来的环境风险,已被我国环境保护部门置于优先考虑的难题^[31]。2015年,我国出台了《农业面源污染防治行动计划》,为未来我国农业面源污染的防控设置了具体目标^[32]。

三江平原作为我国重要的商品粮基地,是实现“国家新增千亿斤粮食建设规划”的核心区域^[33]。长期的农业耕作导致原本以湿地、林地和草地为主要景观的自然生态系统逐渐演变为以耕地为主的农业生态系统。由于区域可垦土地已变得十分有限,现有农业发展模式不得不把加大化肥使用量作为提高粮食产量的主要技术手段,这将进一步加深本区的农业面源污染输出^[34]。一方面,大规模的农田开发增加了农用化学品的投入量,导致面源污染问题加重,对土壤质量安全造成威胁,加之三江平原地势低平,大部分农田存在垄沟地埂,促进了降水的汇集与潜流的形成,加剧了地表径流和渗透对农田耕层土壤的冲刷与侵蚀,对当地的水质安全产生负面影响;另一方面,频繁的农业活动产生了十分丰富的生物质资源如秸秆等,而农村传统处理秸秆的方法以秸秆代替煤、秸秆还田、秸秆饲料等形式为主^[35],使得相当大一部分秸秆资源没有得到合理的开发和利用,长此以往,不但会造成土壤肥力下降,更有可能增加温室气体排放,造成大气污染^[36]。

1.1.5 研究意义

防控地表水农药污染将是未来一段时间内我国水污染控制领域关注的重点。以农业废弃物为来源的生物炭在环境保护以及在农业方面的应用具有深远的意义。研究我国农药流失特征及生物炭控制技术对于农业面源污染防治行动计划的实施是很有必要的。本研究以统计数据和实测数据为基础,采用建立清单、地理信息技术和模型模拟等方法对我国农药使用时空特征及典型流域农药流失模拟进行研究,估算了我国农药的使用量和流失量,分析了我国农药使用和流失的时间

变化特征和空间分布规律,开展了典型小流域农药流失的模拟研究,评估了流域农药污染控制措施对农药流失负荷的影响,旨在为我国地表水农药污染的防控提供科学的理论依据和决策支持。

农业中的生物质资源丰富,如作物秸秆可作为制备生物炭的原料。生物炭结构复杂,对农业面源污染物的吸附机制还不十分清楚。因此,研究生物炭的物理和化学结构特征与其对污染物吸附性能之间的关系,有助于准确预测和客观评价生物炭对农业面源污染物迁移、转化等行为的影响。同时,比较分析生物炭在水中和土壤中对污染物的吸附行为特性可为生物炭制备条件的优化以及将其作为环境修复剂提供理论指导和科学依据。通过正确认识土壤污染的机制和污染物迁移转化规律,能够为污染控制技术的研发和农业可持续管理提供科学依据^[37]。同时,将固体废弃物变废为宝,应用于土壤痕量污染物的原位稳定,在减轻固体废弃物处置压力的同时,能够降低农业面源污染物流失风险,进而降低水环境污染风险^[38]。针对三江平原农业开发过程中存在的生态环境问题,研究农药面源污染物流失转化特征及土壤改良技术,通过自主制备生物炭,改良制备工艺以及室内淋溶土柱模拟实验,探究生物炭对农田土壤中农药流失的控制效果,一方面从源头控制农业面源污染,另一方面重点研究生物炭对农业污染中的有机污染物的控制作用,降低农田典型痕量面源污染物给河流生态系统带来的潜在风险,取得经济效益和生态效益的双赢。

1.2 研究进展

1.2.1 农业面源污染研究

由于农业活动而大量施用的化肥、农药等农用化学品易导致农业开发地区不同程度的农业面源污染问题^[39]。非点源污染又称面源污染,它是指溶解或固体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河流、湖泊、水库、海湾等受纳水体,引起水体富营养化或其他形式的污染^[40]。美国《清洁水法修正案》(1997)的定义为:非点源污染是指污染物以广域的、分散的、微量的形式进入地表及地下水体。非点源污染研究是当今国际上环境问题研究的热点领域。美国是最早关注非点源污染治理的国家,1972年于《联邦水污染控制法》中首次明确提出控制非点源污染。1974年, *Characteristics and comparative magnitude of non-point sources* 中首次系统地阐述了非点源污染的特征和进入地表水体的污染负荷量级。欧盟于1989年明确提出非点源污染问题。在我国,高拯民于1980年在《土壤-植物系统的污染防治及净化功能》中第一次提到“非点源污染”概念,