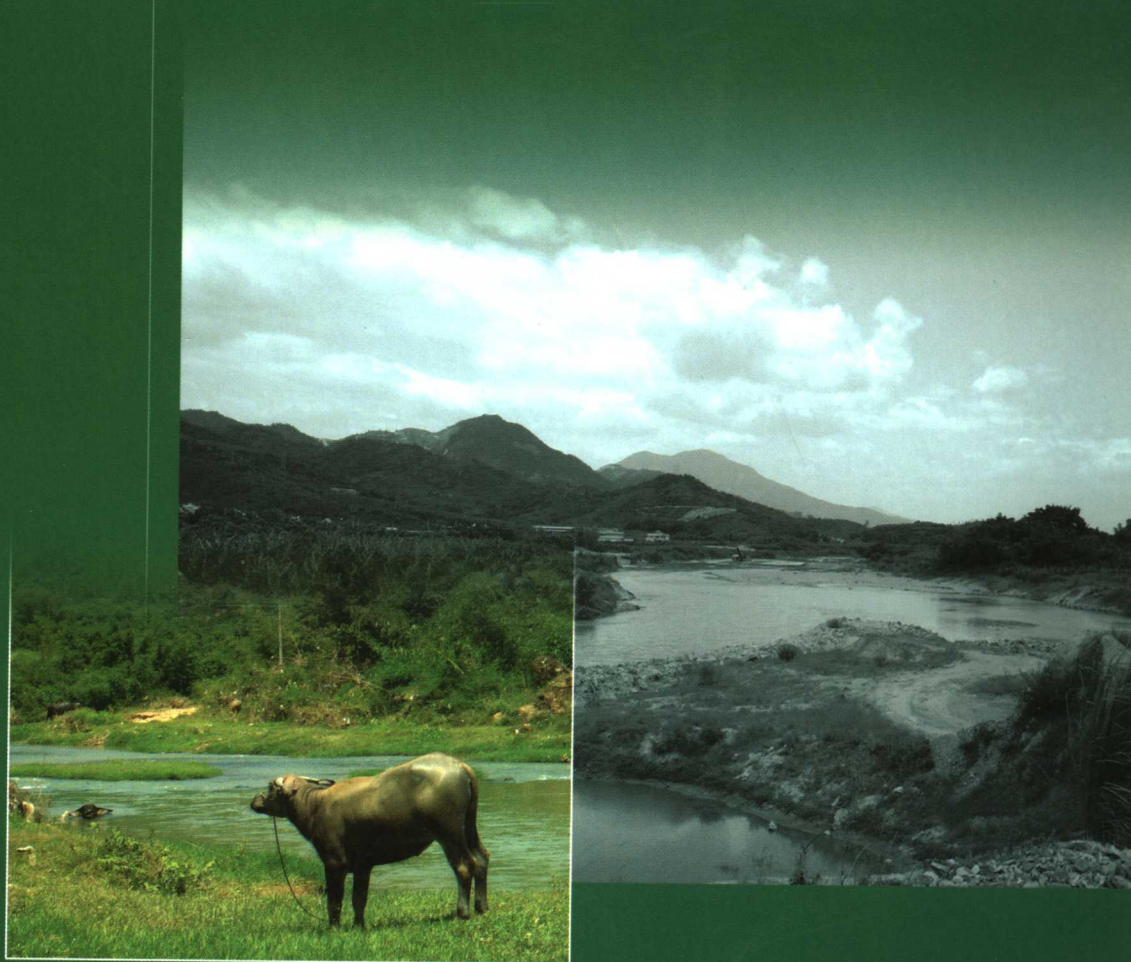




洪华生 张玉珍 曹文志 著

九龙江五川流域 农业非点源污染研究



科学出版社

www.sciencep.com

九龙江五川流域农业 非点源污染研究

洪华生 张玉珍 曹文志 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是通过在小流域的定位研究,系统、综合监测地表水和地下水水质,获取了流域大量的基础数据,并将有关水量平衡法、非点源污染模拟模型和地理信息系统技术运用于研究流域农业非点源污染的研究中,着重论述流域降雨、产流的特征;分析探讨了流域暴雨径流氮磷流失规律及农田土壤氮素的渗漏特征;估算了地下水氮的浓度变化以及氮的渗漏负荷量,模拟了流域氮磷等的流失负荷。并在其定量评价管理措施的基础上,考虑非点源污染发生过程,从源和汇的过程提出了流域的非点源污染的控制措施,为九龙江水环境的综合整治提供了科学依据。

本书可供环境科学、地理学以及其他相关学科的科技工作者及大专院校师生阅读,也可供农业、资源、生态等领域的科技与教育工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

九龙江五川流域农业非点源污染研究/洪华生,张玉珍,曹文志著. —北京:科学出版社,2007.1
ISBN 978-7-03-018270-8

I. 九... II. ①洪... ②张... ③曹... III. 农业环境—非点污染环境—研究—漳州市 IV. Z322.257.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 149847 号

责任编辑:李 瑾 / 责任校对:连秉亮
责任印制:刘 学 / 封面设计:一 明

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>

南京展望文化发展有限公司排版

江苏省句容市排印厂印刷

科学出版社出版 各地新华书店经销

*

2007年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007年1月第一次印刷 印张:12 $\frac{3}{4}$ 插页:4

印数:1—2 200 字数:165 000

定价:32.00 元

前 言

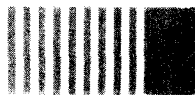
流域农业活动对氮磷等肥料的过量施用引起了水资源及近海环境的污染,已成为当今国内外研究的热点和亟需解决的难点问题。近十多年来,以洪华生教授为首的研究团队,依托厦门大学海洋环境科学国家重点实验室和环境科学研究中心的软硬件设施,瞄准了这日益突出的流域农业非点源污染问题,利用多学科综合、技术集成和耦合等国内外先进的研究手段,在九龙江流域对该问题进行了比较深入、系统的综合研究。本书是整个九龙江流域农业非点源污染研究的部分内容。

研究系统地引入了国外用于农业非点源管理和政策制定的 AGNPS 模型,并成功应用于该流域的模拟研究,在模型输入参数选取上,充分考虑了东南地区自然条件和农业耕作方式、大气干湿沉降量,并将畜牧养殖和村庄的生活污染也作为非点源污染的要素综合考虑到模型中去,使模型模拟结合更切合实际。

在流域尺度上,识别了研究流域地表径流非点源氮磷负荷的主要来源及其定量贡献。氮磷的流失具有明显不同的机制和来源,肥料输入氮的流失是总氮的主要流失来源,而地表径流作用是引起总磷流失的主要因子。

全年氮磷的流失主要集中于7至9月暴雨和特大暴雨集中的时期,主要是由几场特大暴雨所引起的。该期间所流失的总氮、总磷和泥沙量分别占全年总流失量的95%、87%和93%以上。氮一般以可溶性态形式流失,而磷则主要以颗粒态形式流失。

农田土壤氮磷渗漏的监测表明渗漏水中氮素形态主要以硝态氮为主,但在施用有机肥的地块一些时段出现氨态氮高于硝态氮浓度。与已有的研究相比,该区域氨氮浓度表现相对较高,对地下水的污染不容忽视。



前言

设计和构建了一些管理措施,并利用模型进行评价。在对模型参数进行敏感性分析基础上,进行了各方案的实施前后效果的定量评价。

本研究所建立的方法和所取得的成果可为进一步深入定量研究整个九龙江流域农业非点源污染控制提供理论基础,整体研究思路可为国内其他流域相关研究提供借鉴与参考。

由于农业非点源污染是近几年在我国出现的环境问题,研究基础比较薄弱,研究方法尚欠完善。本研究虽取得了一些进展,但仍属于探索阶段,不足之处,敬请读者指正。

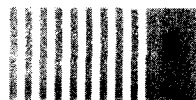
著者

2006年5月

目 录

前 言

第 1 章 绪论	1
1.1 非点源污染概述	1
1.1.1 非点源污染概念及特征	1
1.1.2 农业非点源污染问题	2
1.2 国内外农业非点源污染研究进展	3
1.2.1 农业非点源污染发生机制的研究	4
1.2.2 农业非点源污染模型的研究	12
1.2.3 农业非点源污染控制与管理研究进展	20
1.3 农业非点源污染研究中存在的主要问题	24
1.4 研究目的、研究内容和技术路线	25
1.4.1 研究背景	25
1.4.2 目的及意义	27
1.4.3 研究内容及技术路线	27
第 2 章 研究区概况	29
2.1 九龙江流域概况	29
2.2 五川流域概况	30
2.2.1 地理位置与地质地貌	30
2.2.2 气象条件	31
2.2.3 土壤和植被条件	32
2.2.4 水土流失状况	35
2.2.5 农业种植状况	35
2.3 试验小区的概况	36
第 3 章 降雨及径流泥沙产生特征	38
3.1 前言	38



3.2 试验设计与方法	38
3.2.1 水文监测与样品采集	38
3.2.2 悬浮泥沙的分析方法	39
3.3 结果与讨论	40
3.3.1 降雨特征分析	40
3.3.2 产流特征	46
3.3.3 悬浮泥沙特征	51
3.4 小结	54
第4章 农田地表径流氮磷流失特征分析	55
4.1 前言	55
4.2 试验设计与方法	55
4.3 氮磷流失特征分析	56
4.3.1 次降雨氮磷流失特征	56
4.3.2 次降雨的氮磷浓度变化特征	57
4.3.3 不同土地利用类型氮磷的输出变化规律	69
4.4 降雨量与农田地表径流氮磷流失负荷的关系	72
4.5 径流深与单位面积氮磷负荷输出的关系	74
4.6 无降雨时期与暴雨期间氮磷浓度的比较	76
4.7 氮磷浓度沿程变化特征	77
4.8 小结	79
第5章 农田氮素渗漏特征及渗漏量的估算	80
5.1 前言	80
5.2 氮素渗漏特征	81
5.2.1 试验设计方案	81
5.2.2 样品的采集与分析	82
5.2.3 结果分析与讨论	83
5.3 氮素渗漏量的估算	95
5.3.1 土壤有关的物理参数的测定	96
5.3.2 作物田间蒸散量的确定	101
5.3.3 地表径流量估算	105

5.3.4	土壤剖面含水量增量估算	106
5.3.5	渗漏水量的确定	106
5.3.6	氮素负荷估算	107
5.3.7	结果与讨论	110
5.4	小结	110
第6章	试验区地表径流非点源氮磷的模拟	112
6.1	前言	112
6.2	模型的选择	112
6.3	AGNPS 模型介绍	113
6.3.1	AGNPS 基本组成	113
6.3.2	AGNPS 网格的划分和输入输出参数	114
6.3.3	模型原理	115
6.4	模型参数的确定	120
6.4.1	GIS 支持下的流域基础空间数据库的建立	121
6.4.2	试验区的概化和网格划分	122
6.4.3	模型的地形参数提取	123
6.4.4	土壤质地	123
6.4.5	土壤可蚀性因子 K	125
6.4.6	作物管理因子 C	127
6.4.7	管理因子 P	128
6.4.8	水文参数的确定	128
6.4.9	模型氮磷输入参数的确定	133
6.5	模型的调试	145
6.5.1	模拟结果	145
6.5.2	结果讨论	151
6.6	模型验证	152
6.7	试验区全年农业氮磷输出的估算	154
6.8	小结	162
第7章	五川流域农业氮磷管理措施方案的模拟	164
7.1	前言	164



7.2 模型参数的敏感性分析	164
7.2.1 敏感性分析参数的选取	165
7.2.2 敏感性结果	166
7.2.3 敏感性分析	170
7.3 最佳管理措施的构建	171
7.4 农业非点源污染的控制方案	175
7.4.1 氮磷源的控制	176
7.4.2 潜在污染物汇的控制	180
7.5 小结	183
 参考文献	 184

第 1 章 绪 论

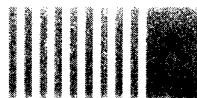
1.1 非点源污染概述

1.1.1 非点源污染概念及特征

水环境的污染可分为点源污染(point source pollution)和非点源污染(non-point source pollution)。点源污染主要包括工业废水、污水处理厂的出水和城市生活污水,通常在排污口或排污管道直接向河流、海洋或湖泊(水库、坑塘)等集中排放,它是水体污染早期最主要的表现形式。点源污染具有来源易于识别、易于控制等特点。而非点源污染却不同,它是指在较大范围内,在降雨径流的冲刷和淋溶作用下,大气、地面和土壤中的污染物以分散的、微量的形式进入地表及地下水体,并在水体富集,从而导致的水环境污染。

非点源污染的产生是由自然过程引发,并在人类活动影响下得以强化的过程。降雨径流过程是造成非点源污染的最主要的自然原因,而人类的土地利用活动才是非点源污染的最根本原因。一方面,人类开垦土地,砍伐森林,使它们变为农田、牧场、城市、工业区。这些土地利用变化活动改变了地表的植被覆盖,改变了土壤的质地、成分,改变了土地的渗透和蒸发特征,改变了影响径流汇集的地形特征,其结果就是改变了流域的水文和侵蚀过程,加剧了水土流失,对水体水质造成了威胁。另一方面,人类在进行农业活动中,大量施用化肥、农药等农业化学品。这些化学品中只有很少的一部分被农作物吸收,其余大部分残留在土壤中,成为潜在的污染源。

与点源污染相比,非点源污染的发生机制要复杂得多,其主



第1章 绪 论

要有以下特征^[1]：

1) 发生时间具有随机性。由于非点源污染的影响因子,如降雨、植被类型、气候、地质地貌等分布的随机性,决定了非点源污染的形成具有较大随机性。

2) 发生方式具有间歇性。这造成无法在产生源处对非点源污染进行监测,其真正的产生源也难以或无法追踪,导致对污染物的监测、控制和处理困难而复杂。

3) 发生时机具有潜伏性和滞后性。非点源的潜伏性和滞后性是指污染物的形成和污染的发生并不是同步进行的。在降雨来临之前,农业化学品的施用和其他污染物在土地上的积累都不会造成对水体的污染,这一段时间是非点源污染的潜伏期。一旦暴雨来临,潜伏期内累计的污染物就会迅速随径流流失,造成水体的污染。潜伏期越长,土地表面积累的污染物就可能越多,暴雨发生时所形成的污染负荷就可能越强。这也解释了为什么在干湿季节明显的地区,雨季来临的前几场暴雨所造成的污染负荷是全年中最高的。

4) 发生机制具有复杂性。非点源污染的发生与传输机制涉及了多个学科的研究领域,其中包括气象学、水文学、水力学、土壤学、土壤侵蚀学、土壤化学等,其复杂性远远超过了点源污染。非点源污染机制的复杂性给非点源污染的监测、非点源污染模型的建立和非点源污染的控制提出了巨大的挑战。

1.1.2 农业非点源污染问题

一般将非点源污染分为城市和农业(农村)两大类,其中农业非点源污染包括农田中的化肥、农药,家畜粪便,生活污水,农田水土流失,水产养殖,大气干湿尘降,林区地表径流等造成的水体污染。不同类型的污染在发生机制上既有相似之处,又有各自的特点,类型之间的界限往往是模糊的。

在所有的非点源污染中,由于农业活动的广泛性和普遍性,

农业活动被认为是产生地表水和地下水非点源污染的主要原因。在美国,非点源污染占总污染量的 2/3,而农业活动(农田、牧场)占非点源污染的 57%~75%^[1, 2],Chesapeake Bay 海湾就是一个由于非点源污染而使水体产生明显退化的典型例子。1983 年的研究表明,进入 Chesapeake Bay 海湾 69%的氮和 30%的磷来源于非点源污染。欧洲因农业活动输入到北海河口的总氮、总磷分别占入海通量的 60%、25%^[3]。

我国的农业非点源污染情况也不容乐观。近年来我国水环境污染中,除了点源外,非点源也占有相当的比重。我国农业化肥的施用率已较高,一些地区化肥的施用量高到惊人的地步,加上我国化肥利用率较低,损失的氮磷很容易随径流冲刷进入河流或淋失进入地下水,导致饮用水水质问题和水体的富营养化问题。在我国农业集约化地区,农村地表水和地下水硝态氮的超标率正在上升,这与化学氮肥及养殖场厩肥的大量投入紧密相关。据马立珊在江苏吴县 76 个农村饮用水调查中得到研究结果,硝态氮的超标率为 38.2%,亚硝态氮的超标率为 57%^[4];张维理调查了北京 14 个县 69 个点地下水硝酸盐含量,结果显示饮用水硝态氮含量半数以上超过国际 10 mg/L 标准^[5]。我国 1986~1990 年调查的 20 个湖泊中,有 13 个湖泊和水库处于富营养化状态,占 65%;处于中营养转向富营养化状态的共 4 个,占 20%;处于贫营养状态的只有 3 个,仅占 15%。这与美国 20 世纪 70 年代中期湖泊水质富营养化状况颇为接近^[6]。进一步的研究表明,我国大多数湖泊,尤其是东部湖泊,农业非点源污染负荷已占 50%以上^[7]。张夫道研究京津地区排污流入渤海的氨态氮 8 720 t,因化肥流失的氮为 8 000 t,使受污染的海水浓度与污水接近^[8]。

总之,国内外的研究表明农业非点源污染问题已日益突出。

1.2 国内外农业非点源污染研究进展

对非点源污染的研究,始于 20 世纪 60 年代,在美、英等一些



发达国家率先兴起。70年代以后,在世界各地逐渐受到重视。近年来取得了不少进展。

1.2.1 农业非点源污染发生机制的研究

农业非点源污染的迁移转化机制是进行模型定量研究及控制治理的基础。近年来,许多学者从动态过程的角度对农业非点源污染进行了深入研究。作为一个连续的动态过程,农业非点源污染的形成主要由以下几个过程组成:降雨径流过程、土壤侵蚀过程、地表溶质溶出过程和土壤溶质渗漏过程,这4个过程相互联系、相互作用。

1. 降雨径流的研究

径流与非点源污染关系紧密,对径流的量化研究作为水文学的重要组成部分发展较早,理论及模型较成熟。无论是农业非点源引起的地下水污染还是地表水污染,都与土壤水文过程有着密切的关系。

在径流的形成过程中,下渗是一个非常重要的因素,因此国外很早就开始对次降雨中的水分下渗进行了研究。比较著名的是 Hort 入渗方程^[9]、Phillip 入渗方程和 Green-Ampt 入渗方程^[10],虽然前两个都是较为简化的水文模型,但是至今仍被广泛地应用,并且影响着一些复杂的流域径流计算机模型。

在一次降雨中,并非流域内的所有地区都能产生地表径流而带来非点源污染。因此许多学者从水文学、水动力学的角度出发,研究作为暴雨事件响应的径流动力形成的产汇流特性,重点是对其产流条件的空间差异性进行研究,有助于深刻揭示农业污染的形成。有代表性的有早期美国水土保持局在20世纪50年代提出的SCS法^[11],由于综合考虑影响径流形成的下垫面的空间差异性(土壤前期含水量、土地利用类型、土壤渗透性、降雨量大小),而被广泛应用于非点源污染研究。CREAMS^[12]、AGNPS^[13]

和 SWAT^[14]等模型都采用了 SCS 法。Lutz 法^[15]对 SCS 法进行了修正,考虑了包括基流因子的前期土壤水分状况,这样使得 Lutz 法比原 SCS 法更能较好地模拟水文参数。后来一些学者在模型使用中将 SCS 法改为 Lutz 法^[16, 17]。我国在这方面的工作主要是对该模型应用^[18~20]。从 60 年代初期以来,我国学者还从我国的具体情况出发,提出了许多有特色的产流计算方法,其中代表性的模型有蓄满产流模型、流域平均下渗率分配曲线相结合的蓄满产流、超渗产流以及综合产流等理论。由于适合我国国情,也被用于区域农业非点源污染计算^[21~23]。此外我国学者赵人俊建立了著名的新安江模型^[24],但还未应用到非点源污染的研究中。

在流域汇流计算方面,国内外提出了各种各样的模型与方法。其中,单位线类是我国目前应用最广泛的方法之一,特别是 Nash 瞬时单位线模型^[25]在全国各地得到了广泛的应用^[26~28]。但是 Nash 模型也存在一些明显的不足,如在物理概念上不尽合理(假定净雨全部集中在流域顶端),用于北方干旱地区时出现峰值偏小。

流域水文模型是 20 世纪 50 年代以后逐步发展起来的新的水文技术,它是计算机技术和系统理论发展的产物,其主要特点是把流域降雨径流形成过程作为一个系统,降雨是它的输入,流域出流过程、实际蒸散发过程及土壤含水量过程是输出。这类模型在人类活动对水文影响等研究中已逐步成为一个重要的工具。现在已涌现出了大量的流域水文模型,其中较著名的有美国的 Stanford 模型^[29],它是 1966 年由 Stanford 大学开发的一种机制模型,该模型可模拟降雨、融雪、植物截流、入渗、蒸散发、坡面漫流、壤中流、地下径流、土壤蓄积、河槽流等一系列自然过程; Sacramento 模型是被水文界广泛采用的一个流域模型,它可以用来模拟降雨后流域出口断面的径流形成过程,对产流部分的模拟是该模型的核心部分,由于模型运算所需的数据量较大,在具体应用上还不够广泛; SHE (system hydrologique european) 模



型^[30],属于连续的分散机制模型,可用于模拟融雪过程、蒸散发、地下水流和沟道水流、饱和及非饱和产流的地表径流,在欧洲应用相当广泛。

我国学者也开始逐渐将国外的流域水文模型应用到我国非点源污染研究中去,如郑丙辉利用 Sacramento 模型建立了流域非点源污染负荷模型,应用到湖泊生态效应的研究中^[31]。

2. 土壤侵蚀的研究

土壤侵蚀过程是农业非点源研究的重要内容。土壤侵蚀的研究历史很久,但是真正从非点源污染角度出发的土壤侵蚀研究,首推 20 世纪 60 年代后期用于坡地侵蚀模拟估算长期平均土壤流失的美国通用土壤流失方程 USLE (universal soil loss equation)^[32]。该方程综合考虑影响土壤侵蚀的五大因素(降雨因子、土壤侵蚀因子、地形因子、作物因子和管理因子),并被不断地修正和扩展为 RUSLE (revised universal soil loss equation) 方程^[33]。与 USLE 相比,RUSLE 方程模拟的精度和范围有了大幅度提高。由于并非所有侵蚀的泥沙都会进入受纳水体,国外学者采用“黑箱”方法,提出基于统计和经验基础上的泥沙传输比(DR)的概念。直到 80 年代后期,从机制上对土壤侵蚀、沉降过程的研究得到了较大的发展,用 WEPP (water erosion prediction project)取代了 USLE。与 USLE 相比,WEPP 是一种基于物理过程的模型^[34, 35],被称为“新一代土壤侵蚀预报模型”。

我国对土壤侵蚀的研究做了大量的工作,代表性的有黄土高原的水土保持研究工作,并利用资料提出了较为实用的经验型区域性土壤侵蚀模型^[36, 37]。此外,还对 USLE 模型修正后运用,如杨子生等^[38]和阮伏水等^[39]分别利用该模型对我国南方花岗岩侵蚀的土壤流失进行了研究。

3. 地表溶质溶出过程的研究

国外早期的研究主要是关于农业非点源污染物氮磷元素在

农田中的径流流失量及对水体的影响;后期的研究主要是以减少污染输出的角度研究氮、磷元素从农田中的径流流失机制和规律。研究结果总结归纳为以下几个方面:

(1) 氮磷流失与农田耕作状况关系

Gaynor 等人研究农田耕作方式对磷和土壤流失的影响,表明采用常规休闲耕作方式的农田,其磷的流失小于不休耕作农田,但土壤的流失要大得多。Gaynor、Findlay^[40]和 Sharpley^[41]等人通过对翻耕地的麦田研究表明,在免耕的麦田,总磷的流失量为 $2.3 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,且 49% 的总磷通过沉积物流失;而在翻耕的农田,总磷的流失量达 $6.8 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,且 98% 的总磷通过沉积物流失。

(2) 氮磷流失与作物生长季节的关系

Hubbard 等人^[42]对两个大量施肥的农业流域在作物生长和非生长季节氮磷和沉积物的径流流失研究表明,64%~86% 的沉积物流失发生在作物非生长季节;径流中 70%~95% 的氮,90%~98% 的磷随沉积物通过地表径流流失。

(3) 氮磷流失与降雨的关系

很多研究显示,氮磷的大部分流失发生在少数几次大暴雨中。暴雨径流中污染物浓度也比平时高得多,施用化肥到暴雨来临的时间间隔越短,流失量越大,其中氮的流失量可高达施用量的 15%。Schuman 等人^[43]研究表明,在作物耕作的最初时期,溶解态和颗粒态氮的流失最大,92% 的氮通过地表径流流失和 84% 的总磷通过泥沙态形式流失,大量施肥农田的总磷流失是正常情况下的 1.8 倍。Sharpley 等^[44]研究结果显示径流中 75%~95% 的总磷处于非溶解状态下;McDowell 等研究表明径流中 62% 的总氮和 93% 的总磷来自非溶解性的土壤颗粒^[45]。

(4) 氮磷流失与土地利用的关系

氮磷的流失与土地利用方式、化肥的投入集约程度等有关。Zampella 的研究表明,流域内土地利用集约越高,氮和磷的输出水平也相应地越高^[46]。美国和加拿大联合开展土地利用与五大

湖水质污染关系的研究,建立了各种单一土地利用类型的单位面积污染负荷的关系,探讨了多种因子(地形、土地利用程度、肥料、农药、气候条件等)对污染负荷的影响。

(5) 氮磷流失形态与地表径流的关系

大部分氮(8%~80%)、磷(7%~30%)以溶解态形式随地表径流流失。如 Benoit 等人早期的研究表明,磷基本上通过地表径流流失^[47];Culley 等人对连续种植玉米的研究表明,每年沉积物和总磷的流失分别达 407 kg/hm² 和 0.88 kg/hm²^[48],作物覆盖率和化肥施用量大大增加溶解态磷的流失;Ng 等人^[49]研究发现,磷的流失形式与径流量无关;但在径流早期,颗粒态磷的流失比例高于溶解态。

Sharpley 和 Smith^[41]研究了地表径流量与径流中磷浓度二者之间的关系,显示出二者之间具有较大的相关性,表明地表径流也是影响土壤养分磷流失的重要因子。

(6) 表土层污染物含量与径流氮磷浓度有一定关系

Romkens、Oiness 等人^[50, 51]的早期研究发现,径流中溶解态磷的浓度决定于土壤表层 0~5 cm 的磷含量;随后 Daniel^[52]、Kingery^[53]和 Sharpley 等人^[44]进一步研究表明:长期施肥会导致磷在土壤表层的积累,使得表层土的磷含量大大超过作物生长的需求量;颗粒态、溶解态及有效磷在径流中的浓度与土壤表层 0~1 cm 的磷含量有明显的正相关,这意味着与雨水及径流相互作用的土层甚薄。

(7) 与地表坡度及施肥量的关系

Ingram 和 Woolhiser^[54]研究表明,溶解态磷等迁移量随地表坡度及降雨动能的增大而增大;在坡长为 33~100 m 条件下,溶解态磷的迁移量也随坡长增大而增大;表层土壤的渗透率也会影响污染物的迁移,因为它影响混合深度和程度,特别在底土层导水率低时影响更大。

Romkens 和 Nelson^[50]研究发现,过磷酸钙化肥的使用量与径流中磷的流失量存在线性关系。Baker 和 Laflen^[55]通过模拟降