

植被过滤带的净化效果 研究及数学模拟

邓娜 李怀恩 李家科 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

植被过滤带的净化效果 研究及数学模拟

邓娜 李怀恩 李家科 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内容提要

植被过滤带是控制非点源污染的“最佳管理措施”之一。本书系统地总结了作者及其研究团队近年来在国家自然科学基金项目、国家重大水专项渭河课题、陕西省重点学科建设项目等资助下的研究成果。全书共分7章，以野外条件下的径流模拟试验为基础，研究了植被过滤带的净化效果及其影响因素，建立了植被过滤带净化效果与主要影响因素之间的定量关系。通过植被过滤带的净化机理分析，提出了植被过滤带对泥沙和非点源污染物净化效果的模拟模型，总结了植被过滤带设计的适宜方法。本书内容层层递进，步步深入，自成体系。本书在理论方面丰富了面源末端治理的植被过滤带技术，可进一步促进我国非点源污染研究和治理。

本书部分研究成果已在陕西沔河流域得以应用，具有广阔的应用前景。本书可供环境科学与工程、水文学与水资源、水土保持、农业土木工程等领域的科技工作者及研究生参考和借鉴。

图书在版编目（CIP）数据

植被过滤带的净化效果研究及数学模拟 / 邓娜, 李怀恩, 李家科著. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2016.3
ISBN 978-7-5170-4198-6

I. ①植… II. ①邓… ②李… ③李… III. ①植物—作用—环境污染—污染防治—数学模拟—研究 IV. ①X506

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第054439号

书 名	植被过滤带的净化效果研究及数学模拟
作 者	邓娜 李怀恩 李家科 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: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	枣庄市大有文化传媒有限公司
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10.25印张 242千字
版 次	2016年3月第1版 2016年3月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	32.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

随着经济的发展、人口的增长，水体污染的问题越来越突出，要从根本上解决水污染问题，必须高度重视非点源污染的控制和治理。控制非点源污染的方法很多，国内外实践证明：治理非点源污染的基本途径之一是生态技术。植被过滤带便是目前比较通用的控制和治理非点源污染的主要生态工程措施之一。

植被过滤带是位于污染源区与受纳水体之间的植被区域，可以有效地拦截滞留泥沙和泥沙吸附态污染物，也能有效地削减污染物的负荷量，显著减少非点源污染的影响。植被过滤带已是控制非点源污染的“最佳管理措施”之一。本书通过野外条件下的径流模拟试验、辅以理论分析的方法，探索植物物种及其配置方式、入流流量、带宽、坡度、入流污染物浓度及土壤初始含水率等因素对植被过滤带净化效果的影响，建立净化效果与主要影响因素之间的定量关系，提出植被过滤带对泥沙和非点源污染物净化效果的模拟模型，总结植被过滤带设计的适宜方法。取得主要成果如下。

(1) 对植被过滤带净化效果及其影响因素进行了研究。

1) 在本书试验条件下，植被过滤带对地表径流中悬浮固体、颗粒态氮、颗粒态磷、总氮和总磷的削减效果都较好，削减主要是物理拦截过程。植被过滤带能有效地削减溶解态氮、溶解态磷的负荷量；但过滤带对地表径流中溶解态氮、磷的浓度变化影响较小，当径流中溶解态氮、磷浓度较高时，通过表层土壤吸附的溶解态氮、磷浓度有所削减。

2) 不同植被配置下的植被过滤带净化效果排序为：草地过滤带 > 灌草植被

过滤带 > 灌草植被过滤带 (灌木较多) > 空白带。三种草地过滤带的净化效果排序为: 野生自然草本 > 白三叶草过滤带 > 紫苜蓿过滤带, 人工植被的植株密度较小, 其对非点源污染物的净化效果较差。

3) 各植被过滤带对地表径流中非点源污染物的净化效果均随入流流量的增大而降低, 且流量的变化对草本群落欠发达的沙棘-草本植物过滤带和坡度较大的植被过滤带的净化效果影响较大。通过进行模拟暴雨径流过程试验, 定性定量分析了径流量与植被过滤带净化效果的关系。通过比较恒定入流与自然放水入流条件, 可知各植被过滤带在恒定入流条件下的净化效果优于自然放水情况下的去除效果。

4) 随着带宽的增加, 植被过滤带对污染物的削减率增大, 但增加带宽与削减效果并不成比例。坡度为 2% 的植被过滤带主要在前 10m 拦截泥沙和颗粒态污染物。

5) 分析了植被过滤带非点源污染及其对净化效果的影响。植被过滤带内坡面和表层土壤的初始情况 (污染量和干湿度) 以及入流流量是植被过滤带产生非点源污染的主要因素, 非点源污染的产生是植被过滤带净化效果降低的主要原因。对于坡度为 2% 的植被过滤带, 入流单宽流量控制在 $0.004\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 内是较为合理的。

6) 随着坡度的增加, 植被过滤带对非点源污染物的净化效果降低, 且在大流量入流时, 净化效果降低更加明显。

7) 在一定范围内, 污染物的浓度越高, 植被过滤带的净化效果越好; 但入流污染物浓度越大, 出流污染物浓度也相应地增加。

8) 土壤含水率较低时能削减较多的地表径流量, 但加大了径流中污染物的浓度。

(2) 定量分析了植被过滤带净化效果与影响因素之间的关系。植被过滤带影响因子的关联度由大到小排序为: 流量因素 > 带宽因素 > 植被条件 > 入流浓

度因素 > 土壤初始含水量因素。植被过滤带净化效果与其带宽的关系方程为对数形式；植被过滤带对非点源污染物的浓度削减率与入流流量的拟合公式为幂函数的形式。利用多元非线性回归模型、灰色系统模型和多层感知器神经网络模型模拟植被过滤带的净化效果，结果表明：统计模型率定误差较小，而检验误差较大，但能模拟出植被过滤带对污染物的浓度削减率随影响因素的变化趋势，且模拟植被过滤带对污染物负荷削减率的误差比污染物浓度削减率的误差要小。利用逐步回归对影响因素变量筛选结果显示，浓度削减率方程中剔除了土壤初始含水量变量；负荷削减率方程中剔除了土壤初始含水量、入流浓度因子；负荷削减率较大程度地取决于水量的削减量，入流浓度对其影响较小。多层感知器神经网络模型基本能确定出 SS 和 TP 的浓度削减率随各影响因素的变化情况。

（3）在对植被过滤带的流态分析中可知，在试验条件下植被过滤带的水流流态多为缓流，植被过滤带的坡度对流态的影响比较显著；植被过滤带的植被选择和配置，对消减水流能量，降低水流流速很重要；在试验条件下植被过滤带要达到对水流消能减速的很好的效果，带宽要达到 10m 以上，植被过滤带中缓而浅的水流对植被过滤带中的污染物有着更好的净化效果。从 COD 在植被过滤带中浓度变化过程来看，各植被过滤带在不同流量、不同入流浓度下的 COD 沿程削减趋势线呈波动状，出口浓度有“相聚”的趋势，即随着带宽的增加和入流时间的延长，各植被过滤带出流 COD 浓度将稳定在某一值附近。另外，根据相关性分析，水样中的氮、磷污染物与 SS 有着很高的相关度，即污染物多是附着在泥沙颗粒上随水流迁移的。因此，在治理非点源污染中，减少水土流失，降低泥沙颗粒向水体转移是重点。

（4）数学模型是植被过滤带研究与规划设计的重要手段。基于分析植被过滤带进出口水流中泥沙粒径的特征，揭示了植被过滤带对径流中悬浮固体的净化机理，构建了植被过滤带对悬浮固体净化效果的模拟模型，即利用 MUSLE 模

型与植被过滤带机理模型 VFSMOD 耦合模拟。由野外试验实测数据验证知,该耦合模型对植被过滤带出流悬浮固体浓度的模拟精度绝大多数在 $\pm 20\%$ 以内,模拟值与实测值的判定系数 R^2 为 0.98,且耦合模型精度优于 VFSMOD 模型,能够满足植被过滤带规划设计的要求,可用于国内植被过滤带的规划设计。基于植被过滤带对径流中颗粒态和溶解态污染物的净化机理,构建了植被过滤带对颗粒态和溶解态污染物净化效果的模拟模型,经验证,其模拟偏差大部分在 $\pm 20\%$ 之内,其中对颗粒态污染物的模拟精度较高,可用于植被过滤带设计的参考。

(5) Green-Ampt 模型预测植被过滤带对水量的消减效果较好,预测值和实测值较接近;在放水试验条件下,入流流量的大小和土壤含水率的高低都对植被过滤带水量削减有较大影响;在入流流量较小,植被过滤带的植被配置和植被条件优良,植被带初始含水量较低的情况下,植被过滤带中径流的下渗量较大。GRAPH 数学模型基本上能模拟出不同带宽下植被过滤带中溶解态磷浓度随时间的变化和植被过滤带带宽的影响。

(6) 对植被过滤带的设计方法进行了探讨。植被过滤带宜采用乔灌木相结合的立体结构,稳固河岸的植被宜选用当地乔灌木种,拦截颗粒态污染物的植被宜选择当地的自然草本,或者近地面密集度较高的草本。带宽的设计宜采用数学模型的方法。试验统计模型是针对西北地区的试验结果而统计出的经验方程,可为西北区域的植被过滤带的设计提供量化依据,但不适用于其他区域。VFSMOD 和 MUSLE 耦合模型能够较好地模拟植被过滤带对泥沙的削减效果,因此可据其计算不同植被过滤带带宽下的净化效果。植被过滤带带宽增大到 10m 左右以后,其对泥沙的去除率增加幅度较小,且坡度较大(15° 以上)的坡面不适合设置植被过滤带。

全书由邓娜、李怀恩、李家科统稿,李怀恩定稿。第 2 章由邓娜、李怀恩、李家科、史冬庆撰写;第 3 章由李怀恩、邓娜、李家科、杨寅群、史冬庆、汪

磊等撰写；第4章第4节由邓娜、常明、李怀恩、李家科撰写；第5章第1节、第2节、第7节由常明、李怀恩、李家科撰写；其他章节均由邓娜撰写。

本书对植被过滤带净化效果的影响因子和净化效果的模拟等方面进行了探索与研究。其研究成果在理论方面丰富了不同地区及不同条件下植被过滤带的净化机理和模拟方法，在一定程度上促进了我国植被过滤带技术的研究，具有广阔的应用前景。希望本书对非点源污染控制和治理的研究有所帮助。

本书的研究工作和出版得到了国家自然科学基金项目（50979090，51279158）、国家水体污染控制与治理科技重大专项渭河课题专题（2009ZX07212-002-004-002）和陕西省自然科学基金重点项目（2015JZ013）共同资助，谨致谢忱！

由于作者水平有限，书中谬误在所难免，望广大读者给予批评指正。

作者

2015年7月

目 录

前言

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国外植被过滤带技术研究概况.....	2
1.3 国内研究现状与存在的主要问题.....	9
1.4 研究内容及技术路线.....	10
第 2 章 植被过滤带试验概况.....	15
2.1 试验场概况.....	15
2.2 试验方法.....	20
2.3 试验开展概况.....	23
2.4 植被过滤带净化效果评价方法.....	24
第 3 章 植被过滤带的净化效果及其影响因素研究.....	25
3.1 植被条件对植被过滤带净化效果的影响.....	25
3.2 入流水文条件对植被过滤带净化效果的影响.....	28
3.3 带宽对植被过滤带净化效果的影响.....	40
3.4 植被过滤带非点源污染及其对净化效果的影响.....	44
3.5 影响植被过滤带净化效果的其他因素.....	50
3.6 本章小结.....	53
第 4 章 植被过滤带净化效果与影响因素之间的定量关系.....	55
4.1 影响植被过滤带净化效果的主要因素识别.....	55
4.2 不同植被过滤带的带宽与净化效果的关系.....	57
4.3 不同植被过滤带的入流流量与净化效果的关系.....	62
4.4 植被过滤带净化效果的统计模拟.....	64
4.5 本章小结.....	74
第 5 章 植被过滤带的净化机理分析与数学模拟.....	75
5.1 植被过滤带的水文过程分析.....	75
5.2 植被过滤带对非点源污染物的净化机理分析.....	86
5.3 植被过滤带净化效果的数学模拟模型的建立.....	96
5.4 植被过滤带对地表径流中悬浮固体净化效果的模拟.....	105
5.5 植被过滤带对颗粒态污染物净化效果的模拟.....	112

5.6	植被过滤带对溶解态污染物净化效果的模拟.....	115
5.7	GRAPH 模型对溶解态磷净化效果的模拟.....	118
5.8	本章小结.....	125
第 6 章	植被过滤带的设计方法探讨.....	127
6.1	植被的选择.....	127
6.2	带宽的设计.....	128
6.3	其他设计建议.....	137
6.4	本章小结.....	138
第 7 章	结论与建议.....	139
7.1	主要结论.....	139
7.2	主要创新点.....	142
7.3	不足之处和建议.....	143
参考文献		145

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

自然界各类水体污染基本都是由非点源污染和点源污染共同造成的,二者占总污染的比重有所不同。目前,点源污染治理已初显成效,从而使非点源所占的比重越来越大,例如:美国研究指出其非点源污染量是污染总量的 2/3;荷兰农业非点源污染提供的总氮、总磷量分别占水污染总量的 60%和 40%~50%^[1]。在我国,随着农业迅速发展,非点源污染也日趋严重,在多数水域中,非点源污染负荷占水体污染的比重已经超过点源污染负荷,调查结果表明:在云南滇池来自非点源污染的悬浮固体占 94%,总氮占 57%,总磷占 58%^[1];又如天津于桥水库、太湖和北京密云水库等水域,非点源污染负荷比例也超过点源污染负荷。因此要从根本上解决水污染问题,必须高度重视非点源污染的控制和治理。

对于非点源污染的控制,应优先采用那些能使潜在污染物保留在原地(即防止污染物离开它们的源区)的管理措施。国内外的实践证明,生态技术是控制和治理非点源污染的基本途径之一,主要是充分利用土壤、植被和水体的自净能力,降低氮、磷和泥沙等污染物的污染。目前控制和治理非点源污染的主要生态工程技术措施之一便是植被过滤带(Vegetative Filter Strips, VFS)^[2]。美国基于研究结果已制定了相关的法律法规。1978年,植被过滤带被列为控制非点源污染的“最佳管理措施”。美国、加拿大和新西兰分别把建设植被过滤带列入国家政策中,政府加以资助来保护水体系统,英国及其他欧洲国家也积极研究和提倡建设植被过滤带。

植被过滤带是位于污染源与受纳水体之间的植被区域,可以有效地拦截和滞留泥沙、泥沙吸附态氮磷污染物,也能有效地削减污染物的负荷量,显著减少非点源污染对环境的影响^[2]。Dickey等^[3]认为植被过滤带是草地或者以草覆盖的水道等植被区域系统。这些区域系统可使径流中的污染物被拦截过滤、沉淀、下渗和被植物吸收。Phillips^[4]定义植被过滤带为把污染源区与地表水体分开的植被带。通常植被缓冲带(Vegetative Buffer Strips)与植被过滤带通用,但植被过滤带较常用。此外,在很多文献里把植被过滤带称之为过滤带(Filter Strips or Filter Zones)^[2]、缓冲带(Buffer Strips or Buffer Zones)^[6-7]、河岸缓冲带(Riparian Buffer Strip)^[5]、河岸植被带(Riparian Vegetation Zone)^[8]等。

在我国,植被过滤带技术研究还比较缺乏,工程实践较少,但这项技术在美欧等国已经有很长的历史,形成了比较完善的技术措施体系,而由于国情的不同,我国在进行非点源治理时

并不能照搬国外的相关标准或技术规范。因此,在参考借鉴国际先进研究成果的基础上,探索符合中国实际的植被过滤带构建技术,应用于我国的非点源污染控制和治理是一项非常有意义的工作。

1.2 国外植被过滤带技术研究概况

植被过滤带作为一种生态工程技术开始于 20 世纪 60 年代中期。Wilson^[9]所进行的试验是最早的研究之一,其结果表明沉淀物多少及沉淀物颗粒大小与过滤带宽度有关;1980 年 Foster 等人导出了植被过滤带中颗粒沉淀方程^[10];1985 年 Clinnick 认为,植被过滤带可以减缓地表径流的流速,有利于除去沉淀和一些沉淀附着的污染物^[11];1989 年 Phillips 提出植被过滤带还能提高土壤的下渗能力,有助于可溶性污染物进入土壤^[4]。随着非点源污染问题日益受到人们的关注,相关研究逐渐增多,涉及植被过滤带的作用机理、模型、影响因子分析、渗入土壤后的养分归宿、效益比较、设计等方面研究。

1.2.1 植被过滤带的影响因素研究

构建植被过滤带的设计要素包括植物的选择、植被的配置、过滤带形状和大小等,植被过滤带的过滤效应会随其构建要素的变化而明显不同。影响植被过滤带对非点源污染物净化效果的因素很多,主要有植被条件、入流水文条件^[12]、坡度、带宽、污染物特性、过滤带土壤理化性质^[13]以及过滤带的生物学特征等,所有要素共同影响着植被过滤带的净化效果。

1.2.1.1 植被类型

根据植被类型的不同,植被过滤带主要有林木过滤带、灌木过滤带、草地过滤带以及由两种或者两种以上植被构成的混合过滤带(也称复合过滤带)。草地过滤带在拦截悬浮固体(泥沙)和颗粒态污染物方面效果显著,且投资较少,容易管理,因而得到了普遍的应用^[14,15]。美国农业部(Natural Resources Conservation Service, NRCS)制定了植被过滤带相关标准,将植被过滤带定义为“位于扰动土地或农田与受纳水体之间的草本植被区域”^[16]。草地过滤带又分为野生自然草本和人工种植的草本,其中自然草本通常具有较好的泥沙净化效果,但是由于草本植被根系浅且生物量小,限制了其拦截壤中流及其养分的效果。而更复杂的生物环境系统——灌木过滤带、林木过滤带和复合过滤带,其根系发达,能改善土壤渗透性,且能稳固河岸和提供野生动物生存环境等^[17]。混合过滤带往往被称为多物种河岸缓冲带,能够充分发挥不同植被物种的优势,且应用到美国的部分地区,综合效果较好^[18]。不同类型植被对过滤带过滤效果的影响不同(表 1.1)。

表 1.1 不同植被过滤带的作用效应

目的	草本过滤带	灌木过滤带	林木过滤带
拦截降雨	高	高	高
下渗径流	高	中	中
过滤泥沙	高	低	低
过滤颗粒态污染物	高	低	低
过滤溶解态污染物	低	低	中
稳固河岸	低	高	高
改善景观	中	中	高
为动物改善栖息地	中	中	高

1.2.1.2 宽度

植被过滤带一般位于污染源的下坡，多为长方形，沿坡面水流方向的长度叫作植被过滤带的带宽。植被过滤带带宽通常由过滤带植被条件（包括植被密度和高度）、过滤带的坡度、过滤带的坡面侵蚀速率、入流泥沙浓度、入流泥沙颗粒粒径分布、污染源特性以及与入流径流量等因素决定^[16]。

带宽是影响植被过滤带净化效果的最重要的因素之一。植被过滤带的宽度决定了其生态服务功能，不同的宽度其发挥的效应是不一样的。较宽的植被过滤带使得径流在其上面的滞留时间也较长，提供了充足的净化时间和净化面积，使污染物和植被过滤带充分接触并得到大量的削减，因此植被过滤带的净化效果和带宽是呈正比关系的，即植被过滤带越宽，净化效果越好；但在实际生产活动中，往往会受到土地资源和资金的限制，植被过滤带的宽度也不能太大，而且植被过滤带有一个最大的有效带宽，其后增加植被过滤带的宽度并不能明显提高净化效果^[19-20]。因此，设计和建设植被过滤带时必须首先考虑如何确定合适的宽度，使过滤效果好且符合当地经济条件。表 1.2 是美国农业部自然资源保护局（USDA-NRCS，2004）推荐植被过滤带的坡度和其最小宽度的技术指南。

表 1.2 植被过滤带的坡度和最小宽度

坡度	最小宽度
1%~3%	25 ft (7.62m)
4%~7%	35 ft (10.67m)
8%~10%	50 ft (15.24m)

资料来源：standards and specification No.393, USDA-NRCS Field office technical guide, 2004。

Orlando 进行的试验表明: 15ft (4.57m) 宽的草地过滤带能削减地表径流中 55% 的总氮和 60% 的总磷^[21]。Daniels 等的研究显示: 9.1m 宽的草地过滤带能去除地表径流中 76% 的悬浮固体^[22]。Dillaha 等的试验结果显示: 在漫流条件下, 9.1m 的过滤带能削减养畜场废水中 91% 的悬浮固体、74% 的氮和 69% 的磷, 而 4.6m 的过滤带能削减养畜场废水中 81% 的悬浮固体、64% 的氮和 58% 的磷^[19]。美国农业部自然资源保护局颁布的过滤带标准规定: 至少需要 6.1m 植被过滤带带宽用以削减悬浮固体和颗粒态的污染物; 至少需要 9.1m 带宽用以削减溶解态污染物^[16]。此外美国环保局认为, 以控制城市非点源污染为目的的过滤带最小带宽为 7.6m^[23]。

1.2.1.3 坡度

植被过滤带坡度也是影响其净化效果的重要因素。坡度直接影响了植被过滤带的糙率系数和径流的冲刷能力, 进而影响了地表径流的产生和非点源污染的负荷量。在坡度较小的植被过滤带上能有效地延长降雨径流的水力停留时间, 使得非点源污染在植被过滤带中得到充分的截留和净化。相关研究表明: 坡度越陡使得地表径流的流速也就越快, 在植被过滤带上停留时间也较短, 直接影响植被过滤带对泥沙和一些非点源污染物的净化效率, 当水流流速较大时还会对坡面产生侵蚀作用, 因此坡度是影响流速的重要因子, 在设计植被过滤带时必须加以考虑。

Patty^[24]、Schmitt^[25]和 Sheridan^[26]的试验研究表明: 坡度在 3%~15% 时, 对 SS 的去除率为 56%~97%。美国环保局推荐植被过滤带的坡度最高不要大于 5%, 不推荐大于 15% 的坡度, 较大的坡度易导致坡面的水流形成集中水流, 不利于形成均匀的薄层水流。

1.2.1.4 植被过滤带的土壤条件

各地土壤类型千差万别, 不同土壤对水流下渗及对溶质运移转化的影响不尽相同。如: 砂土下渗能力大, 地表径流少, 但其拦阻污染物的能力也较差, 因此溶质在砂壤土中停留时间较短, 从而植被过滤带对溶解态氮的净化效果较差; 而对于黏土, 其下渗速率小, 但滞留污染物的能力较高。

不同的土壤结构也影响土壤拦阻污染物的能力^[27]。当土壤中不透水层在土壤剖面中间时, 土壤中地下水位往往随降雨或灌溉而波动, 从而存在碳来源, 且其土壤水分易饱和, 导致土壤缺氧, 有利于发生反硝化反应, 从而加大养分转换。当不透水层位于土层底部, 阻挡土壤中的水向下流动, 使得地下水位比较稳定, 其反硝化作用较小。而当土壤中不透水层较浅 (约 1~2m) 时, 植被过滤带中溶解态污染物主要渗入地下径流中而被带出过滤带^[28]。

1.2.1.5 水文特征

很多研究者在研究植被过滤带中水流的运动方式时假设水流是薄层的均匀流, 但是在现实中, 很多种植地区坡度并不是均匀一致的, 往往会导致集中水流, 从而会使得流速增加, 因此净化效率也就大幅度的减小。Dillaha (1986) 等人曾在保护区计划项目里分析了一些草地过滤带的净化试验, 试验结果表明: 绝大多数的植被过滤带在集中水流情况下净化效率并不理想^[29]。因此为了保持较高净化效率, 进入植被过滤带的水流应是薄层均匀流。另外, 降雨强度

和土壤前期含水量也是一个很重要的因素。由于降雨强度和土壤前期含水量直接影响了植被过滤带中的下渗能力,当降雨量较小时,土壤的初始含水量较低,其径流的下渗量较大,随径流迁移的一些溶解态的污染物更容易随径流进入土壤,同时径流量的减少也使得污染物的负荷有一定程度的减小;当降雨量较大时,土壤容易达到饱和,下渗速度就会变小,因此植被过滤带的净化效率将较低。

1.2.2 植被过滤带的过滤机理研究

植被过滤带过滤污染物的基本机理包括:拦截地表径流中悬浮固体及其携带的吸附态污染物;溶解态氮磷下渗后被植被吸收;土壤颗粒对氮磷污染物的吸附;由于土壤中微生物的作用,对污染物进行了转化、降解和固定。

非点源污染的主要特征是产生和携带有颗粒态污染物或溶解态污染物的地表径流。植被过滤带的植被拦截径流,可以显著降低径流流速,并促进径流下渗,从而减少悬浮固体及其携带的污染物的搬运量,因此草地过滤带对悬浮固体的过滤效率普遍较高^[30]。Wilson (1967)是最早提出并研究了泥沙去除的人之一,给出了在较为平坦的坡上去除砂土、粉砂、黏土的最佳距离,该研究认为:宽度,含沙浓度,流速,坡度,植被条件(植被高度、密度以及植被的淹没度)都影响悬浮固体的削减效率,但是并没有建立这些参数与净化效率之间的关系^[31]。Neibling 和 Alberts (1979) 利用田间试验研究了在薄层水流的情况下,草带对总输沙量的影响,试验结果表明:相当多的泥沙沉积在草带前段,91%的泥沙在草带前 0.6m 发生了沉淀,其中有 37% 的黏土颗粒,并认为只要植被不被淹没,泥沙的过滤效果很好,但是在很大的流量下会淹没植被并且导致过滤效果很差^[32]。Barfield 和 Albrecht (1982), Hayhes 和 Hairston (1983) 等人认为过滤带对悬浮固体的过滤效率大部分都达到 90% 以上,并且认为过滤效果由沉淀物的大小,植被带的坡度、长度、渠道、植被密度等决定^[14]。而林木过滤带对污染物的拦截作用较草地过滤带差,是由于树冠较大遮挡了阳光,使林下缺少茂密的草本植被。据 Smith 报道,在一片松树林带中,由于缺少好的地被物,导致水土流失加重^[33]。因此,在林冠不郁闭的林木过滤带中,茂密的林下草本植被可接受足够阳光,促使其发育,更利于拦截污染物。

可溶性污染物主要通过随径流下渗到土壤中来实现一定的净化,其净化效果相对较差。Doyle (1977) 等人利用牛粪来模拟污染源,在一块 5m×7m、坡度为 10% 的试验场上进行了试验,试验采用的植被物种是牛毛草,试验场的土壤类型是粉砂壤土,分析了可溶性的污染物在 0.5m、1.5m 和 4m 三个断面处的浓度,试验结果表明:可溶性的磷和硝氮在前 0.5m 浓度分别削减了 9% 和 0%,在 1.5m 处浓度分别削减了 8% 和 57%,在 4m 处浓度分别削减了 62% 和 68%;但是由于沉积的有机氮的分解使得氨氮的浓度随着距离的增加而增加^[34]。Bingham (1978) 等人研究表明当植被过滤带的长度和源区长度比值为 1 时,能将污染物的负荷减少为背景浓度;对总磷、总凯氏氮、硝氮和总氮的去除率分别为 25%、6%、28% 和 28%^[35]。

对于溶解态氮进入土壤后的归宿,许多研究显示:通过植物吸收和反硝化作用这两种氮转换和固定的方式,植被过滤带能削减地下径流中的硝氮^[36-39];且大部分结果表明,林木过滤带

对降低土壤中的硝氮要比草本过滤带好^[37-38]。反硝化作用又称脱氮作用,是反硝化细菌在缺氧条件下,还原硝酸盐,释放出分子态氮或一氧化二氮的过程,因此能减少土壤中的硝氮量。影响土壤反硝化作用的因素有:土壤通气和水分状况,土壤温度,土壤中的碳源、氮源以及土壤 pH 值等,因此在不同的土壤环境中,反硝化作用是不同的,而且随时间变化而变化。Haycock 等研究显示:法国一处河岸林木过滤带反硝化作用为 $56 \sim 104 \text{ kgN}/(\text{a} \cdot \text{hm}^2)$,且冬春季具有较高的反硝化率,而由于地下水位低,较低的反硝化速率发生在夏秋季^[39]。而在新西兰的两处河岸区研究显示:植被过滤带的下坡位置反硝化速率较低,而上坡位置反硝化速率较高,这是因为靠近水体的植被过滤带下坡位置土壤中硝氮水平较低,限制了反硝化反应,即氮源对反硝化有重要的影响^[33]。

磷是另一种重要的非点源污染物。农田集水区磷的搬运主要随泥沙迁移,泥沙吸附态磷的输出可能多于总磷的 70%^[40]。植被过滤带能有效地拦截地表径流中的悬浮固体,因此大部分泥沙吸附态磷将被拦截在植被过滤带系统中。在铝、铁含量较高的腐殖质土壤中,通过腐烂物质的吸收,溶解态磷也有可能从地表径流中被移除^[41]。研究显示:林木过滤带能使磷浓度减少 50%~80%,草本过滤带对磷的浓度削减率能达到 61%~83%^[40-43]。因地表径流中磷主要以颗粒态磷形式存在,植被过滤带能有效削减地表径流中的磷。Rabin (2009) 监测了植被过滤带中 1.2m 下壤中流和地表径流中硝氮,总磷和正磷的迁移和净化效果,研究结果表明,地表径流中正磷和总磷的浓度削减率分别为 75%和 70%,在壤中流中总磷和正磷的浓度也有所减小,但是壤中流中硝氮的浓度相对于进口处的地表径流中的浓度有所增加^[44]。此外,在植被过滤带的起始部位往往会出现磷的最大截留量,而当表层土壤对磷的吸附达到饱和时,地表径流中的磷将不会被削减,而停留在土壤中的磷也将被淋滤到径流中去^[45]。近几年已发表的一些文章,如 Blanco-Canqui (2004) 等人^[46]; Tate (2006) 等人^[47]; Chung S J (2010) 等人^[48],也证明了植被过滤带在减少非点源污染方面效果显著。

植被过滤带对径流中的农药也能起到一定的拦截作用。Katy (2008)、Smith (2008) 等人研究了 10 种植物分别对毒死蜱 (CP)、百菌清 (CT)、喷达曼萨林 (PE) 和戊唑醇 (PR) 这 4 种杀虫剂的净化效果,试验结果表明虹膜蓝旗 (*Iris versicolor*)、东部加马草 (*Tripsacum dactyloides*) 和大布卢斯特姆 (*Andropogon gerardii*) 为最佳的 3 种植物,对 4 种农药的去除率分别为 76% CP、94% CT、48% PE 和 33% PR; 47% CP、95% CT、17% PE 和 22% PR; 52% CP、91% CT、19% PE 和 30% PR^[49]。Rhode 等进行的试验表明,草地过滤带可以降低地表径流中 86%~96% 的除草剂氟乐灵,植物能吸收约 1/2 的除草剂^[50]。另外,植被过滤带地表径流中重金属的含量也会随泥沙的沉积和植被的吸收而减少^[51]。

1.2.3 植被过滤带的模型研究

数学模型是进行植被过滤带设计的重要工具,其中很多模型被用来模拟田间尺度下植被缓冲带的净化效率。在 20 世纪 70 年代, Kentucky 大学的研究人员基于实验室条件下的人工草地过滤带泥沙输移方式提出了计算泥沙净化效果的 GRASSF 模型^[52-55]; Wilson 等改进了

GRASSF 模型并将其整合到 SEDIMENT II 模型里,这个模型考虑了 3 种不同坡度的植被过滤带,还提出了计算出流流量曲线的简单算法^[56]。Williams 和 Nicks (1988) 等人使用 CREAMS 模型来评价植被缓冲带中地表径流对土壤侵蚀,泥沙和污染物运移控制的影响^[57];但 CREAMS 模型的水文计算部分并没有考虑过滤带引起的流量和峰值的变化,故其适用性受到了质疑^[58]。Lee (1989) 等人提出了 GRAPH 模型并分析一次降雨过程中植被过滤带中径流和磷的迁移^[59]。Hayes 和 Dillaha (1992) 提出利用 GRASSF 模型和 WEPP 模型估算植被过滤带对泥沙的拦截能力^[60]。Nikolaidis (1993) 等人利用分布式模型预测了河岸带水文过程中的氮肥和生物地球化学循环^[61]。1990 年美国 Florida 大学的研究人员^[62-64]在 Kentucky 算法的基础上开发了一个田间尺度的机理模型——VFSMOD。该模型与 GRASSF 和 SEDIMENT 相比做了较大改进,运用运动波方程计算径流深度和流量,用 Green-Ampt 公式计算径流的入渗量,再使用 Einstein 推移质运动公式计算植被过滤带的出流泥沙截留效果。VFSMOD 作为一个计算植被过滤带对地表径流中悬浮固体过滤效果的模型,近年来在美国、加拿大、欧洲的一些国家成功地得到了检验和应用^[62-69],如:1999 年 Muñoz-Carpena 等人在美国的北卡罗莱纳州^[62]、Gharabaghi (2000) 和 Abu-Zreig (2001) 在加拿大^[66,67]、Sabbagh (2009) 和 Kuo Y. M. (2009) ^[68-69] 在美国中西部等不同地域分别使用了 VFSMOD 模型对不同宽度下的过滤带过滤效果进行了模拟,模拟效果均较好。2005 年 VFSMOD 模型作为最佳管理措施被美国环保局用来评价植被过滤带的净化效率。但是该模型是用来计算草地过滤带对地表径流中泥沙的净化效率的,较难模拟其他污染物的削减效果。Kuo Y. M. 等^[68]应用 VFSMOD 模型模拟了磷酸盐采矿区域的植被过滤带对 P 的移除效果,由于 PP 占 TP 的比例较大,而且与 SS 有较好的相关性,因此能较好地模拟 TP、PP 的去除效果,另外应用 DP 输入输出过滤带的质量守恒方程模拟出流中 DP 的含量,其中土壤中 DP 的释放量仅考虑降雨径流溶解表层土壤中磷灰石的过程。此外,VFSMOD 模型是田间尺度的简单模型,不能从流域尺度上进行模拟分析。

目前计算氮磷等污染物质去除效率的模型较少,其中最典型的模型是由 Lowrance 等人开发的河岸生态系统管理模型(The Riparian Ecosystem Management Model, REMM) ^[70]。REMM 模型是目前对植被过滤带净化效果描述较详细的模型,能够计算出植被过滤带在不同植被、坡度、带宽和土壤条件下对径流中污染物的净化效果,包括以下子模型:地表径流的水文子模型,泥沙输移子模型,碳、氮、磷的输移子模型,植被的生长情况模拟等^[71]。但 REMM 模型仍存在一些问题,主要有:①模型参数多,需要的数据量较大,实际应用起来较困难。②REMM 模型未考虑影响植被过滤带净化效果的季节因素。以往研究表明季节是影响植被过滤带去除氮素效果的重要因素之一:在冬天,植物处于休眠状态,且可作为碳的来源,土壤中氮量的降低主要取决于微生物和反硝化作用;而春天为植物的生长季节,土壤中氮量的去除主要为植物吸收,植物在 9 月左右其体内氮素浓度将达到最高水平^[72]。③REMM 模型不能从流域尺度上进行模拟分析。该模型也是基于田间尺度或小区域的模拟模型,目前还不能从流域尺度上进行模拟。④植被过滤带削减氮素的重要因素和制约因素在该模型中较难确定。从植被过滤带净化机理可知净化氮素的效果取决于很多因素,如:为达到最好的过滤效果,土壤中应有适当的含水