



文章栏目：河流生态缓冲带保护修复专题

DOI 10.12030/j.cjee.202010043 中图分类号 X522 文献标识码 A

郝润昕, 薛李铭, 刘瑞霞, 等. 基于 VFSMOD 模型的不同情景下河流生态缓冲带的截留效果模拟[J]. 环境工程学报, 2022, 16(1): 47-55.
[HAO Runxin, XUE Liming, LIU Ruixia, et al. VFSMOD model-based simulation of interception by ecological buffer zone under different scenarios[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(1): 47-55.]

基于 VFSMOD 模型的不同情景下河流生态缓冲带的截留效果模拟

郝润昕^{1,2}, 薛李铭³, 刘瑞霞¹, 孙菲¹, 李晓洁¹, 袁鹏^{1,✉}, 周岩梅²

1. 中国环境科学研究院, 流域水环境污染综合治理研究中心, 北京 100012; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 3. 嘉兴市嘉善生态环境监测站, 嘉兴 314100

摘要 采用植被缓冲带模型(VFSMOD)对不同情景下河流生态缓冲带(简称“缓冲带”)的截留效果进行了模拟,考察了土壤可蚀性、土壤质地、坡度、径流源区长度、缓冲带宽度等对缓冲带拦截效果的影响。结果表明:随着土壤可蚀性因子(K 因子)变大,土壤可蚀性增强,缓冲带泥沙输入量变大;坡度变大,拦截效率下降,在坡度分别为1%、3.5%、9%和30%的条件下,达到60%的径流截留效率(RIR),缓冲带的宽度分别需要43.9、50.6、52.9和68.8 m;当RIR达到60%,砂质黏壤土、粉质黏壤土、壤土和黏土所需缓冲带的宽度为109.2、114.6、50.6、128.7 m;径流源区长度越长,缓冲带拦截效率越低。上述模拟结果可为缓冲带的设计提供参考。

关键词 面源污染; 河流生态缓冲带; VFSMOD 模型; 截留效率

农业面源污染(简称“面源污染”)具有影响范围广、作用时间长、隐蔽性强等特点。目前,全球30%~50%的地表水体受到面源污染的威胁^[1-5]。河流生态缓冲带(简称“缓冲带”)是位于天然水体与污染区域之间,对面源污染物具有拦截、渗透、吸附、固化、降解作用的屏障区域^[6]。构建缓冲带可实现对面源污染的阻控,还具有较好的生态价值、美学价值,实现水土保持等功效。已有学者研究表明,缓冲带对于径流的拦截效率为40%~100%^[7-10],因此,缓冲带被认为是阻控营养物和农药等面源污染的最佳管理措施之一^[11]。20世纪80年代,美国自然资源和环保局将缓冲带作为最佳管理措施以减少面源污染带来的影响^[12],美国农业部也提出了国家保护缓冲带的倡议^[13]。在我国,构建缓冲带逐渐称为缓解城市或面源污染的重要手段^[14]。缓冲带坡度、土壤特性、降雨强度、入流污染物的浓度和性质、入流流量、植被属性、规模、土地利用等多种因素均会对污染物的阻控效率产生影响。其中,缓冲带宽度尤为重要。通常,缓冲带宽度适宜与否直接影响其阻控效率的高低。因此,合理确定缓冲带的宽度是有效控制面源污染的关键^[15]。在缓冲带的设计过程中,不同因素对其污染物截留效率的影响是极其复杂的,数学模型是对其进行研究的重要工具。

土壤和水评价工具(soil and water assessment tool, SWAT)是常用于模拟面源污染的模型之一,因其模拟效果较好已被广泛应用^[16-17]。但SWAT在模拟缓冲带截留效果方面有一定的缺陷,即不

收稿日期: 2020-11-12; 录用日期: 2021-04-26

基金项目: 生态环境部业务专项(22110302005)

第一作者: 郝润昕(1993—), 男, 硕士研究生, haorunxin002@163.com; ✉通信作者: 袁鹏(1979—), 女, 博士, 研究员, yuanpeng@cracs.org.cn

能模拟地表径流路径,仅考虑了缓冲带宽度对截留效率的影响^[18]。植被缓冲带模型(vegetative filter strips modelling, VFSSMOD)由 MUNOZ-CARPENA 等开发^[19],该模型已在北美的沿海平原^[20]和北卡罗莱纳州皮埃蒙特^[21]得到了验证,作者使用当地的自然事件数据对模型进行了测试,取得了很好的模拟效果。GHARABAGHI 等^[22]的研究也表明,模型预测值与入渗量、流出量和泥沙捕集效率的实测值之间存在显著的线性关系。自模型发布以来,在国外已经得到了广泛的应用和功能扩展。DOSSKEY 等^[23]利用该模型探讨了缓冲带面积与水沙截留效率的关系,研究表明,对于阻控可溶性污染物,在更陡峭的坡度、更细的土壤质地和更高的通用土壤流失方程(USLE)中的覆盖和管理因子(C因子)条件下,需要更大的缓冲带面积。

虽然 VFSSMOD 模型在国外较为成熟,但针对国内的立地条件,对其进行验证、应用的研究仍然很少。本研究采用 VFSSMOD 模型,模拟不同因素对缓冲带截留效率的影响,主要从土壤质地、坡度等方面对缓冲带在特定条件下对径流和沉积物的拦截效果进行模拟,并与现有的缓冲带研究相比较,以期对基于面源污染阻控功能的缓冲带设计提供参考。

1 研究方法

1.1 VFSSMOD 模型的组成

VFSSMOD 是一个基于风暴和现场立地条件的模型,主要包括 2 个部分:一是估算径流汇流区的流量和污染物负荷,二是估算缓冲带对径流流量和污染物负荷的削减量^[24]。该模型主要包括 4 个模块(见图 1):1)入渗模块,主要功能为计算土壤中的水量平衡;2)地表径流模块,能计算出入渗土壤表面的径流深度及径流速度;3)污染物输移模块,模拟污染物沿缓冲带的纵向迁移及削减过程;4)颗粒物过滤模块,用于模拟颗粒物沿缓冲带纵向的运移及沉积过程。

1.2 模型参数的选择

1)通用参数的确定。VFSSMOD 通用参数包括 8 个(见表 1)。其中,在中雨条件下,单次降雨量选择 25 mm。依据美国农业部给出的曲线号参考指南(第 2 版)^[25],曲线号为 88 号,其对应的源区条件为农业源区、成排农作物、中等土壤透水性。依据《土地利用现状调查技术规程》对平坡、缓坡和陡坡的定义,径流坡度分别选择 1%、3.5%、9% 和 30%。根据土壤质地的差别,对土壤侵蚀 K 因子进行计算;模拟单块径流源区长度选择 200 m,面积为 0.1 hm²。其他参数选择模型默认推荐值。

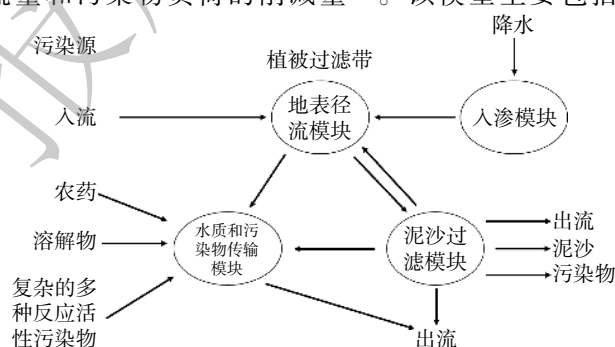


图 1 VFSSMOD 模型的组成

Fig. 1 Components of VFSSMOD

表 1 通用参数的相关内容

Table 1 General parameter determination

总降雨量/mm	降雨持续时间/h	曲线号	风暴类型	径流源区长度/m	径流源区坡度	径流源区面积/hm ²	土壤侵蚀K因子/((kg·N ⁻¹ ·h·m ⁻²))
25	1	88	II	200	1~30	10	推荐值

2)地表径流参数的确定。模型中地表径流参数包括 10 个,其中缓冲带宽度设置为 3~170 m。缓冲带长度和坡度与径流源区宽度和坡度相同,分别为 500 m 和 1%~30%。其他参数选择模型默认推荐值。参数确定值见表 2。

3)模型土壤参数确定。土壤参数共 5 个(见表 3)。其中,根据 SAXTON 等^[26]在土壤质地不同的条件下得到的实验数据确定土壤的饱和导水率,其他参数选择模型默认推荐参数。

表 2 地表径流参数

Table 2 Surface runoff parameters

宽度/m	长度/m	计算节点数	时间加权系数	算法选择标记	库朗数	迭代次数	输出要素标记	各段曼宁系数/(s·m ^{-1/3})	各段坡度/%
3~170	500	57	0.5	3	0.8	350	1	0.4	1~30

注：库朗数为调节计算的稳定性与收敛性的参数；曼宁系数为反映管渠壁面粗糙情况对水流影响的参数。

4) 缓冲带性能参数。参数值选择依据 CHEN 等^[27] 以假俭草为代表性植被的计算结果，其他参数选择模型默认推荐值 (见表 4)。

5) 泥沙特性参数确定。根据土壤质地计算得到泥沙孔隙率，其他数据选择模型默认推荐值 (见表 5)。

表 3 土壤参数

Table 3 Soil parameters

土壤饱和导水率/(m·s ⁻¹)	湿润峰处平均吸力/m	土壤初始含水率	土壤饱和含水率	最大表面贮水量/m
推荐值	推荐值	推荐值	推荐值	0

表 4 缓冲带性能参数

Table 4 Ecological buffer zone parameters

过滤介质茎秆间距/cm	过滤介质修正糙率/(S·cm ^{-1/3})	过滤介质高度/cm	泥沙淤满过滤带后裸露表面的糙率/(S·cm ^{-1/3})	沉积楔坡度及表面糙度变化反馈标记
1.35	0.016	15	0.02	1

表 5 泥沙过滤模型泥沙特性参数

Table 5 Sediment characteristic parameters of sediment filtration model

入流泥沙浓度/(g·cm ⁻³)	入流泥沙颗粒分级数	入流泥沙的中值粒径/cm	沉积泥沙的孔隙率	入流泥沙粗沙百分数	泥沙密度/(g·cm ⁻³)
推荐值	7	推荐值	推荐值	0.50%	推荐值

1.3 缓冲带截留效率的计算方法

不同条件下，缓冲带的截留效率通常由径流截留效率 (runoff interception ratio ,RIR) 和颗粒物的截留效率 (sediment interception ratio ,SIR) 表示，分别按式 (1) 和 (2) 计算。

$$RIR = \frac{V_1}{V} \times 100\% \quad (1)$$

式中： V_1 为缓冲带内径流截流量， m^3 ； V 为流入缓冲带内的总径流量， m^3 。

$$SIR = \frac{m_1}{m} \times 100\% \quad (2)$$

式中： m_1 为缓冲带内颗粒物截流量， kg ； m 为源区进入缓冲带内总的沉积物量， kg 。

对于同一条件下，不同宽度缓冲带的 SIR 和 RIR 采用公式 (3) 进行拟合。

$$y = a(1 - e^{-bx}) \quad (3)$$

式中： y 为 SIR 和 RIR； x 为缓冲带宽度， m ； a 和 b 为拟合参数。

2 模拟结果与讨论

2.1 土壤质地对土壤可蚀性的影响

土壤可蚀性可定义为“土壤颗粒或集聚体被降雨、径流、表面流、风或霜等侵蚀、分离或转移的敏感性”^[28]。影响可蚀性的 2 个最重要的土壤特性是入渗能力和结构稳定性，这 2 个参数受土壤性质的影响，如有机质含量、土壤质地、黏土颗粒含量、不透水层厚度等。土壤可蚀性代表着土壤对侵蚀作用的敏感性，用 K 值来定量描述土壤的可蚀性。在缓冲带研究中，鲜有提到土壤可蚀性的差异及其对缓冲带性能的潜在影响。而实际上，土壤可蚀性会影响径流源区输送到缓冲带的泥沙量。 K 因子采用公式 (4) 进行估算。

$$K = 0.1317[TF(12 - OM) + SF + PF] \quad (4)$$

式中： K 为土壤可蚀性因子， $(\text{kg}\cdot\text{N}^{-1})\cdot(\text{h}\cdot\text{m}^{-2})$ ； TF 为质地因子； OM 为有机质百分比； SF 为结构因子； PF 为渗透因子。

如图2所示， K 因子变大，土壤可蚀性增强，缓冲带泥沙输入量变大。其中，粉质壤土、砂质黏壤土等的 K 因子较大，缓冲带泥沙输入量也最大。在缓冲带设计中，要充分考虑泥沙输入量增大对缓冲带截留效果的影响，对于泥沙输入量大的土壤，需要定期对淤积在缓冲带内的泥沙进行清理，避免大量泥沙堆积，从而造成对内径流流动均匀性的影响，进而降低缓冲带对污染物的削减效率。

2.2 土壤质地对缓冲带截留效果的影响

土壤质地和结构对缓冲带阻控氮磷营养物向地表水迁移有较大影响^[29-32]。许多学者研究了不同形态的氮磷在不同质地土壤中的吸附规律和特性，而系统地研究土壤质地、结构或组成对缓冲带截留效率的影响仍鲜见报道^[33]。

土壤质地直接影响土壤的渗透性能，进而影响缓冲带的截留效果。在渗透能力强的土壤上，缓冲带的地表径流产生潜力最低。BARFIELD等^[34]的研究结果表明，土壤中硝酸盐、氨氮和可溶性磷的截留效率与土壤入渗量呈显著相关。利用VFSMOD模型进行模拟(见图3)的结果表明，当坡度为3.5%时，在其他条件不变的情况下，不同土壤质地的土壤中沙粒含量越高，其渗透能力越强，拦截效率越高，对径流的截留能力就越强。如图4所示，对于50 m宽的缓冲带，渗透性较好的沙壤土和壤质细沙的径流截流效率超过90%。而土壤质地对SIR的影响并不大，其截留效率均可达到近100%。对于5 m和10 m宽的缓冲带，土壤质地对颗粒物的截留效率有较大影响，其中壤土的SIR最差，黏壤土次之。

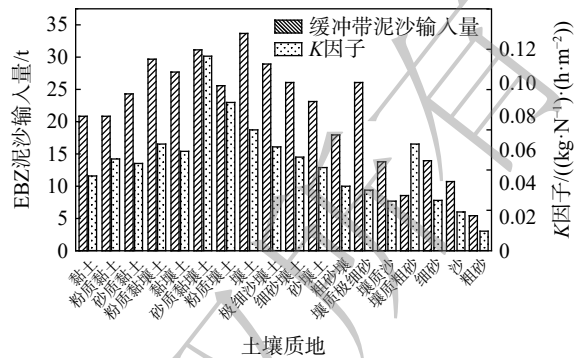


图2 缓冲带泥沙输入量和K因子随土壤质地变化图
Fig. 2 Ecological buffer zone sediment input and change of K factor change with soil texture

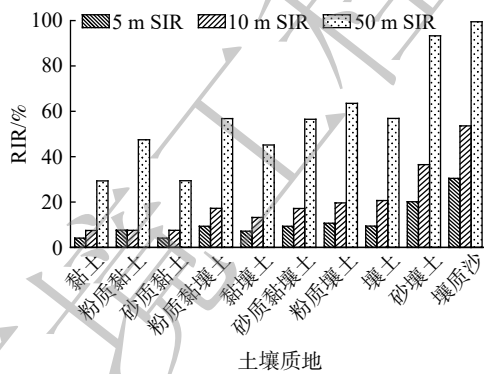


图3 土壤质地对缓冲带径流截留效率的影响
Fig. 3 Effect of soil texture on runoff interception ratio in ecological buffer zone

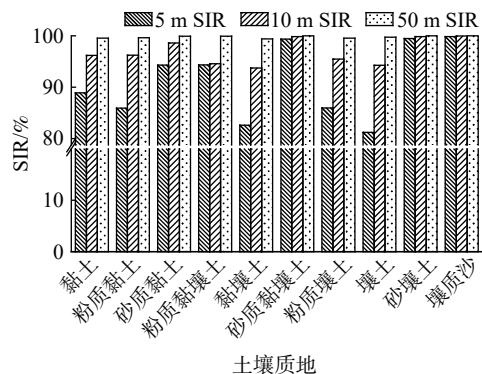


图4 土壤质地对缓冲带颗粒物截留效率的影响
Fig. 4 Effect of soil texture on sediment interception ratio of ecological buffer zone

在不同土壤质地条件下，应用公式(3)对不同宽度缓冲带的RIR进行拟合，拟合方程参数见表6，拟合曲线如图5所示。方程拟合系数均大于0.97，说明方程与公式(3)拟合程度高。当坡度为3.5%时，在其他条件不变的情况下，不同土壤质地、缓冲带宽度对RIR的影响规律不同。对砂质黏壤土、粉质黏壤土、壤土和黏土而言，壤土的径流截留效果最好，黏土的截留效率最差。随

着缓冲带宽度的增加，砂质黏壤土、粉质黏壤土和壤土的径流截留效率先急速上升，后基本保持不变；而黏土径流截留效率基本呈线性均匀增加。当 RIR 达到 60% 时，砂质黏壤土、粉质黏壤土、壤土和黏土构成的缓冲带所需宽度为 109.2、114.6、50.6 和 128.7 m。土壤质地对 SIR 的影响小，10 m 宽缓冲带的 SIR 可达 99% 以上。

实际上，由于土地利用空间的限制，并不能构建很宽的缓冲带。当主要目标为颗粒物时，10 m 宽的缓冲带可达到 90% 以上的截留效率；当主要目标为溶解性污染物时，将缓冲带宽度增至 50~70 m，可达到 40% 以上的截留效率。

表 6 不同土壤质地径流截留效率的拟合方程参数
Table 6 Fitting results of runoff interception efficiency of different soil texture

土壤质地	<i>a</i>	<i>b</i>	调整后 <i>R</i> ²
砂质黏壤土	110.359±6.808	7.36±3.57×10 ⁻⁴	0.976 3
粉质黏壤土	117.875±8.399	0.006 35±6.82×10 ⁻⁴	0.989 5
壤土	99.384±1.142	0.016 92±4.58×10 ⁻⁴	0.996 5
黏土	116.378±11.335	0.005 7±7.975×10 ⁻⁴	0.985 0

注：*a*和*b*为式(3)中的拟合参数。

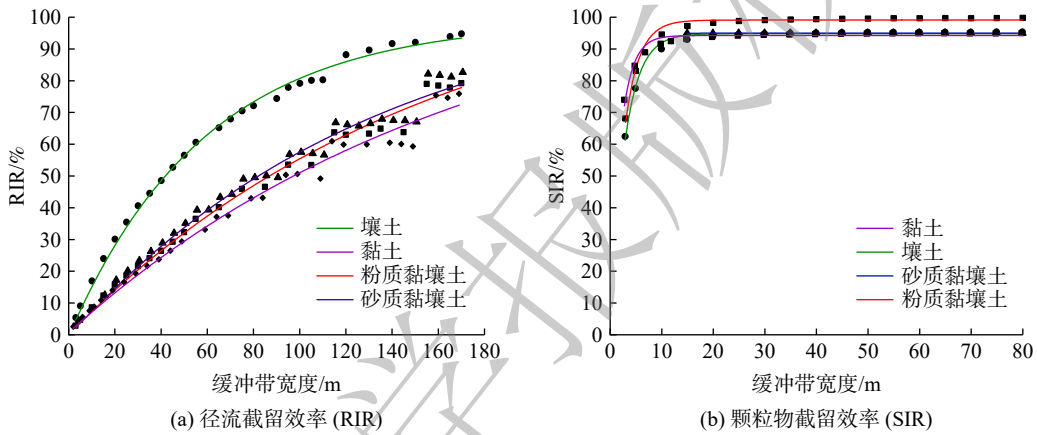


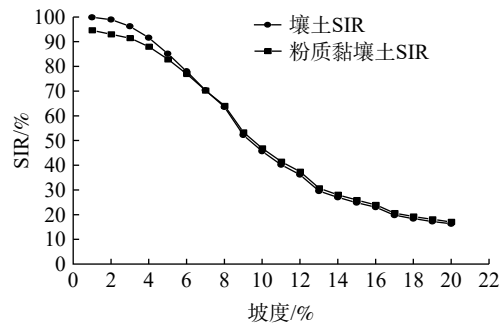
图 5 不同土壤质地缓冲带宽度对截留效率的影响

Fig. 5 Effect of width of ecological buffer zone with different soil textures on runoff interception ratio

2.3 坡度对缓冲带截留效果的影响

随着坡度的增加，地表径流流速会变大，径流入渗时间会减少，缓冲带的颗粒物截留效率会降低^[35]。坡度较陡的径流会对地表土壤产生剪切冲刷力，导致土壤侵蚀，从而降低缓冲带对颗粒物和污染物的削减效率。图 6 反映了以壤土和粉质黏壤土为例（其他模型参数相同），不同坡度对 SIR 的影响。当以坡度为单一变量时，随着坡度的增加，SIR 不断下降。具体而言，当坡度从 1% 增至 4% 时，SIR 下降较慢。这与 DARCH 等^[29]的研究一致，即当坡度增加（1.75%~3.49%）时，活性磷、非活性磷和总磷的截留率并无差异。只有当坡度增加，且水流强度超过特定阈值时，坡度才是影响缓冲带捕集效率的重要因素。坡度从 4% 到 12% 时，SIR 快速下降；坡度从 13% 增至 20% 时，尽管 SIR 仍在下降，但下降幅度明显放缓。这说明坡度很大时，坡度增加对 SIR 的影响已很小。

采用公式 (3) 拟合的曲线，其拟合度 (*R*²) 均大于 0.993，其他参数见表 7。如图 7(a) 所示，在缓冲带宽度较小的情况下，坡度对 RIR 的影响很小。这可能是由于宽度较窄的缓



注：土壤质地为壤土，缓冲带宽度为 10 m。

图 6 不同坡度对 SIR 的影响

Fig. 6 Effect of different slopes on sediment interception ratio

冲带内径流量大, 缓冲带 RIR 较差, 无法对径流起到有效拦截作用。当坡度从 1% 升至 3.5% 时, RIR 下降较快。坡度从 3.5% 升至 9%, RIR 下降幅度变小; 坡度从 9% 升至 30% 时, RIR 下降幅度变大。整体而言, 坡度上升会使缓冲带 RIR 下降, 当坡度升至一定程度后, 下降幅度则放缓。如图 7(b) 所示, 不同坡度条件下 SIR 的差别较大, 坡度越大颗粒物截留效果越差。当缓冲带宽度超过 30 m 时, 坡度对 SIR 的影响很小。

在土壤质地为壤土, 坡度为 1%、3.5%、9% 和 30% 的条件下, 要达到 60% 的 RIR, 缓冲带宽度分别为 43.9、50.6、52.9 和 68.8 m; 要达到 80% 的 RIR, 缓冲带宽度分别需要 74.6、87.6、95.6 m。进一步地, 当缓冲带宽度小于 40 m 时, 其 RIR 快速上升; 缓冲带宽度大于 40 m 时, 随着其宽度的增加, RIR 上升趋势明显放缓。

表 7 不同坡度径流拦截效率拟合方程

Table 7 Effect of widths of and ecological buffer zones with different slopes on runoff delivery ratio

坡度	<i>a</i>	<i>b</i>	调整后 <i>R</i> ²
1	104.475±1.082	0.197±5.826×10 ⁻⁴	0.993
3.5	100.928±0	0.016 5±3.9	0.996
9	91.130±0.863	0.193±4.829×10 ⁻⁴	0.995
30	77202±0.519	0.019 9±3.855×10 ⁻⁴	0.997

注: *a*和*b*为式(3)中的拟合参数, 式(3)为 $y = a(1 - e^{-bx})$ 。

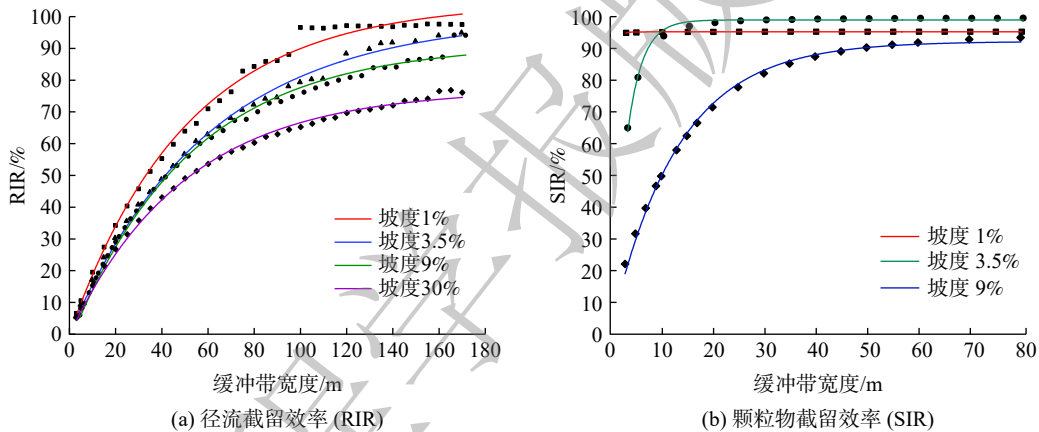


图 7 不同坡度缓冲带宽度对拦截效率的影响

Fig. 7 Effects of different slope and ecological buffer zone widths on runoff delivery ratio

2.4 径流源区长度对缓冲带截留效果的影响

图 8 反映了当土壤质地为壤土时, 在坡度为 3.5%, 其他条件不变的情况下, 不同径流源区长

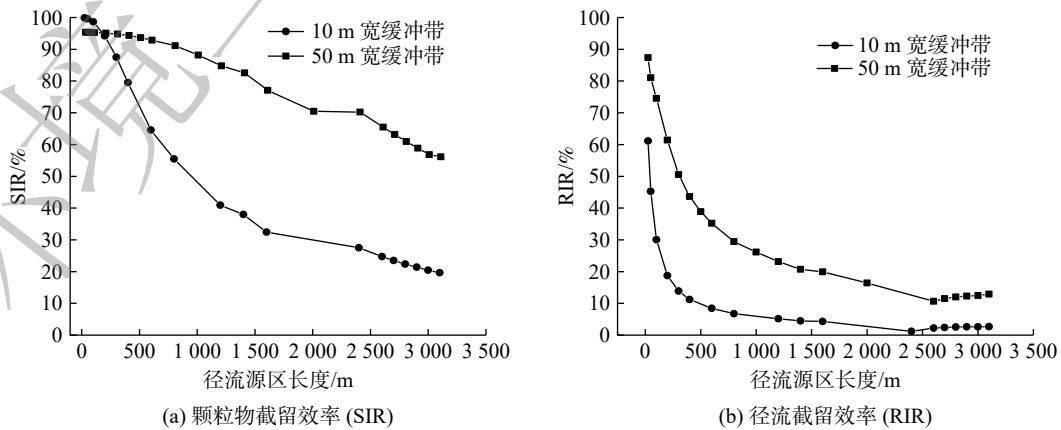


图 8 不同径流源区长度对拦截效率的影响

Fig. 8 Effect of different lengths of runoff source area on interception efficiency

度对截留效率的影响。当径流源区长度增大, 则 RIR 和 SIR 均会下降。随着径流源区长度的增大, SIR 无明显拐点。当径流源区长度小于 200 m 时, 无论是 10 m 宽还是 50 m 宽的缓冲带, 其 SIR 均大于 95%。而 RIR 随径流源区长度的增大, 其变化存在明显拐点。当径流源区长度小于 500 m 时, RIR 快速下降; 当径流源区长度大于 500 m, RIR 小于 50%; 随径流源区长度继续增大, RIR 下降幅度减小。其可能原因是: 径流源区长度越长, 汇入缓冲带的径流量增大, 导致缓冲带的截留效率下降。

3 结论

1) 在不同的立地条件下, 缓冲带对径流和污染物的阻控效率有很大差别。影响缓冲带污染物截留效率的最主要因素是坡度和土壤质地等因素, 其决定了缓冲带的设计宽度。要达到相同水平的截留效率, 截留溶解态污染物的缓冲带宽度要大于截留颗粒态污染物所需的缓冲带宽度。

2) 缓冲带泥沙输入量与 K 因子相关。粉质壤土、砂质黏壤土的泥沙输入量大, 需要定期对淤积在缓冲带内的泥沙进行清理, 避免缓冲带内大量的泥沙堆积, 影响缓冲带内径流流动的均匀性, 进而降低缓冲带污染物的截留效率。坡度越大, RIR 和 SIR 越小。不同的土壤质地对缓冲带截留效率有较大影响。实际上, 由于土地利用空间限制, 并不能构建很宽的缓冲带。

3) 当以截留颗粒物为主要目的时, 10 m 宽的缓冲带截留效率为大于 90%。当以截留溶解性污染物为主要目的时, 将缓冲带宽度增至 50~70 m, 可达到 40% 以上的截留效率。土壤质地为壤土时, 在坡度为 3.5%、其他条件不变的情况下, 径流源区长度上升, RIR 和 SIR 均会下降。

参考文献

- [1] KRONVANG B, GRAESBOLL P, LARSEN S E, et al. Diffuse nutrient losses in Denmark[J]. *Water Science and Technology*, 1996, 33(4/5): 81-88.
- [2] 王立, 马放, 吴洁婷, 等. 基于菌根技术的“三段式”农业面源污染防治研究展望[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(6): 6-10.
- [3] LIU G D, WU W L, ZHANG J. Regional differentiation of non-point source pollution of agriculture-derived nitrate nitrogen in groundwater in northern China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2005, 107(2/3): 211-220.
- [4] GUO W X, FU Y C, RUAN B Q, et al. Agricultural non-point source pollution in the Yongding River Basin[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 254-261.
- [5] PIVOKONSKY M, NACERADSKA J, KOPECKA I, et al. The impact of allogenic organic matter on water treatment plant operation and water quality: A review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2016, 46(4): 291-335.
- [6] ARORA K, MICKELSON S K, BAKER J L, et al. Herbicide retention by vegetative buffer strips from runoff under natural rainfall[J]. *Transactions of the Asae*, 1996, 39(6): 2155-2162.
- [7] ABU-ZREIG M, RUDRA R P, LALONDE M N, et al. Experimental investigation of runoff reduction and sediment removal by vegetated filter strips[J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18(11): 2029-2037.
- [8] CHEN H, GRIENEISEN M L, ZHANG M. Predicting pesticide removal efficacy of vegetated filter strips: A meta-regression analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 548-549: 122-130.
- [9] DORIOZ J M, WANG D, POULENARD J, et al. The effect of grass buffer strips on phosphorus dynamics: A critical review and synthesis as a basis for application in agricultural landscapes in France[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 117(1): 4-21.
- [10] CHAUBEY I, EDWARDS D R, DANIEL T C, et al. Effectiveness of vegetative filter strips in controlling losses of surface-applied poultry litter constituents[J]. *Transactions of the Asae*, 1995, 38(6): 1687-1692.
- [11] WANG L M, WANG Y H. Research and application advances on vegetative filter strip[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9): 2074-2080.
- [12] YU C, DUAN P, YU Z, et al. Experimental and model investigations of vegetative filter strips for contaminant removal: A review[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 126: 25-36.
- [13] DUCROS C M, JOYCE C B. Field-based evaluation tool for riparian buffer zones in agricultural catchments[J]. *Environmental Management*,

- 2003, 32(2): 252-267.
- [14] 李怀恩, 邓娜, 杨寅群, 等. 植被过滤带对地表径流中污染物的净化效果[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7): 81-86.
- [15] 钱进, 王超, 王沛芳, 等. 河湖滨岸缓冲带净污机理及适宜宽度研究进展[J]. *水科学进展*, 2009, 20(1): 139-144.
- [16] 赖格英, 于革. 太湖流域营养物质输移的模拟评估研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(2): 140-144.
- [17] 秦耀民, 胥彦玲, 李怀恩. 基于SWAT模型的黑河流域不同土地利用情景的非点源污染研究[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(2): 440-448.
- [18] 李冉. 浅层地下水对植生滤带削减面源氮磷污染物的影响及VFSMOD-W模型模拟研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019.
- [19] MUÑOZ-CARPENA R, ZAJAC Z, KUO Y M. Global sensitivity and uncertainty analyses of the water quality model VFSMOD-W[J]. *Transactions of the Asae*, 2007, 50(5): 1719-1732.
- [20] MUÑOZ-CARPENA R, PARSONS J E, GILLIAM J W. Numerical approach to the overland-flow process in vegetative filter strips[J]. *Transactions of the Asae*, 1993, 36(3): 761-770.
- [21] MUNOZ-CARPENA R, PARSONS J E, GILLIAM J W. Modeling hydrology and sediment transport in vegetative filter strips[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 214(1/2/3/4): 111-129.
- [22] GHARABAGHI B, RUDRA R P, WHITELEY H R, et al. Improving Removal Efficiency of Vegetative Filter Strips [M]. St Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 2000: 1-11.
- [23] DOSSKEY M G, HELMERS M J, EISENHAEUER D E. A design aid for sizing filter strips using buffer area ratio[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 66(1): 29-39.
- [24] LIM K J, PARK Y S, KIM M K, et al. Design of vegetative filter strip using web-based system with groundwater table and pesticide degradation analysis modules[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2018, 23(2): 10.
- [25] DOSSKEY M G, HELMERS M J, EISENHAEUER D E. A design aid for determining width of filter strips[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 63(4): 232-241.
- [26] SAXTON K E, RAWLS W J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1569-1578.
- [27] CHEN Z Q, STORM D E, SMOLEN M D, et al. Prioritizing nonpoint-source phosphorus loading using a grass-modeling system[J]. *Water Resources Bulletin*, 1994, 30(4): 589-594.
- [28] MCINTOSH P, LAFFAN M. Soil erodibility and erosion hazard: Extending these cornerstone soil conservation concepts to headwater streams in the forestry estate in Tasmania[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 220(1/2/3): 128-139.
- [29] DARCH T, CARSWELL A, BLACKWELL M S A, et al. Dissolved phosphorus retention in buffer strips: Influence of slope and soil type[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2015, 44(4): 1216-1224.
- [30] YANG F, YANG Y, LI H, et al. Removal efficiencies of vegetation-specific filter strips on nonpoint source pollutants[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 82: 145-158.
- [31] MILLER J J, CURTIS T, CHANASYK D S, et al. Effectiveness of soil in vegetated buffers to retain nutrients and sediment transported by concentrated runoff through deep gullies[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2016, 96(2): 154-168.
- [32] HARMEL R D, PAMPELL R, GENTRY T, et al. Vegetated treatment area (VTAs) efficiencies for E. coli and nutrient removal on small-scale swine operations[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2018, 6(2): 153-164.
- [33] PROSSER R S, HOEKSTRA P F, GENE S, et al. A review of the effectiveness of vegetated buffers to mitigate pesticide and nutrient transport into surface waters from agricultural areas[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 261: 110210.
- [34] BARFIELD B J, BLEVINS R L, FOGLE A W, et al. Water quality impacts of natural filter strips in karst areas[J]. *Transactions of the Asae*, 1998, 41(2): 371-381.
- [35] JIN C X, ROMKENS M J M. Experimental studies of factors in determining sediment trapping in vegetative filter strips[J]. *Transactions of the Asae*, 2001, 44(2): 277-288.

(责任编辑: 靳炜)

VFSSMOD model-based simulation of interception by ecological buffer zone under different scenarios

HAO Runxin^{1,2}, XUE Liming³, LIU Ruixia¹, SUN Fei¹, LI Xiaojie¹, YUAN Peng^{1,*}, ZHOU Yanmei²

1. Basin Research Center for Water Pollution Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. Jiashan Ecological and Environmental Monitoring Station of Jiaying, Jiaying 314100, China

*Corresponding author, E-mail: yuanpeng@craes.org.cn

Abstract Non-point source pollution has become an important water pollution source all over the world because of its complex process and wide range of influence. As one of the best management measures (BMPs) for non-point source pollution, ecological buffer zone (EBZ) has become a widely acknowledged solution. In this paper, the VFSSMOD model was used to evaluate the effect of ecological buffer zone under different scenarios. The influence of soil erodibility, soil texture, slope, length of runoff source area and width of buffer zone on the interception effect of ecological buffer zone was investigated. The results showed that the soil erodibility increased with the K factor, causing the increase of the silt input into the buffer zone. The greater the gradient, the lower the interception efficiency was. With the gradient of 1%, 3.5%, 9% and 30%, the width of EBZ was 43.9, 50.6, 52.9 and 68.8 m, respectively, for reaching RIR of 60%. At the same RIR, the width of EBZ was 109.2 m for sandy clay loam, 114.6 m for silty clay loam, 50.6 m for loam and 128.7 m for clay. The longer the length of runoff source area, the lower the interception efficiency of buffer zone was. The simulation results could provide reference for the design of ecological buffer zone.

Keywords non-point source pollution; ecological buffer zone; vegetative filter strips(VFSSMOD) modelling; interception efficiency