

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.02.11

植被过滤带的污染物去除效率研究进展

庾从蓉^{1,2}, 段佩怡¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:探讨植被过滤带(vegetative filter strips, VFS)污染物去除效率与VFS特征参数(长度、坡度、植被类型)、污染物特性之间的关系,归纳了计算VFS污染物去除效率的经验模型和物理模型。结果表明,VFS长度与污染物去除效率呈一定的相关关系,坡度改变对污染物去除效率无明显影响,农药的有机碳吸附系数对污染物去除效率有较大的影响;VFS去除效率经验模型可以依据VFS的长度来估算污染物质的去除效率,同时可以计算不同粒径泥沙的去除效率,针对氮、磷、农药也能估算不同去除方式(如下渗、吸附等过程)的贡献率;耦合了水文模型与污染物去除机制的物理模型也在逐步完善中,VFSMOD就是代表。未来需要加强VFS对其他面源污染物如胶体、纳米颗粒物去除效率的研究,关注VFS在流域尺度上的污染物去除效率。

关键词:植被过滤带;污染物;污染物去除效率;数值模型;研究进展

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2018)02-0068-07

Quantitative research advance on vegetative filter strips for non-point source pollution control

YU Congrong^{1,2}, DUAN Peiyi¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China)

Abstract: This paper analyzes the experimental data in the literature and summarizes the quantitative calculation VFS removal efficiency of the experience, physical model. The experimental results show that there is a certain correlation between the VFS length and the removal efficiency. The slope change has no significant effect on the removal efficiency, and the organic carbon adsorption coefficient of the pesticide has a great influence on its removal. At present, the empirical model of VFS removal efficiency can estimate the removal efficiency of pollutants by the length of VFS, calculate the removal efficiency according to the composition of sediment, and can also calculate the contribution of infiltration and adsorption for nitrogen, phosphorus and pesticide removing from VFS. The mechanism of VFS removal of contaminants is well understood, and the physical model based on the removal mechanism is gradually being refined. VFSMOD is one of the representatives. In the future, there is a need to strengthen the VFS quantitative study of other non-point source pollutants such as colloids, nanoparticle studies, and VFS's effect on pollutant removal at basin scale.

Key words: vegetative filter strips; field experiment; pollutants removal efficiency; numerical simulation; research advance

植被过滤带(vegetative filter strips,VFS)是设立在面源污染源与水体之间的一道拦截关卡,旨在减少降雨径流中危害水质的污染物含量。国内外研究表明,VFS对泥沙^[1]、氮磷^[2]、农药、微量元素^[3]等污染物质有良好的拦截效果,对保护水体有着重要的作用。VFS的主要特征参数有长度(沿径流方向)、宽度(垂直径流方向)和植被类型,同时,坡度、土壤类型、污染物特性等也是重要影响因素。随着我国对水环境保护的日益重视及《水污染防治行动计划》的发布,VFS在海绵城市建设中得到应用^[4],VFS在我国水环境保护中的作用日益明显^[5-6]。为了对VFS在我国的应用提供理论指导,对其研究进展进行系统的归纳与总结十分有必要。

国内关于VFS研究进展的文献中,王良民等^[7]最先总结了VFS的发展历史、结构、污染物控制机理;陶梅等^[8]通过列举的方式总结了VFS对污染物的净化效果和VFS的最佳宽度;郑瑞伦等^[9]也采用了列举的方式对VFS阻控除草剂的效果、影响因素进行了总结。这些研究虽然能加深对VFS的了解,但得到的结论不够全面,不能对VFS的实际应用提供具体指导。国内的研究也缺乏对VFS去除效率经验模型以及基于污染物在VFS中传输机理的数值模型的发展回顾。笔者首先统计分析室内以及野外实验的结果,判定VFS特征参数(VFS长度、坡度以及植被种类)和污染物质的特性对污染物去除效率的影响;然后总结国内外关于VFS去除效率的经验模型、物理模型,以期给VFS特征参数的设计提供参考。

1 VFS对污染物的去除方式

VFS的作用机理是增加下渗和减小流速。下渗的增加是由于植物的根系作用提高了土壤的水力传导度,流速的减小则是因为植被增加了地表糙度。下渗的增加直接导致溶解态污染物的减少,而地表径流速度的减小,会延长污染物的停滞时间,加强沉积和吸附等过程,从而减少污染物含量。基于作用机理、污染物的性质,笔者把不同的污染物在VFS中的去除方式进行总结,见表1^[10-13]。从表1中可看出,VFS对泥沙的主要去除方式是滞留,对氮、磷和农药的主要去除方式为下渗,其次是吸附。

2 VFS 污染物去除效率与各因素的关系

对应不同的研究方法^[14],VFS对污染物的去除效率计算有两种方法:一种是VFS中污染物浓度变化值或进、出口的比值;另一种是研究区(有VFS)与对照区(无VFS,即裸地)出口的污染物浓度的比

表 1 各污染物在 VFS 中的去除方式

污染物	去除方式					
	下渗	根系摄取	生物化学转化	滞留	稀释	吸附
氮	✓	✓	✓	✓	✓	✓
磷	✓	✓	✓	✓	✓	✓
农药	✓		✓	✓	✓	✓
微量元素	✓		✓	✓	✓	
地表径流	✓			✓		
泥沙				✓		
胶体	✓			✓	✓	✓

值。通过控制VFS的特征参数,可以使VFS的去除效率达到一定标准。笔者对文献中已有的实验结果进行统计,以更全面地分析VFS特征参数(长度、坡度、植被类型)、污染物特性和污染物去除效率之间的关系。

2.1 长 度

相比其他拟合关系,对数^[21]或指数关系^[22]更能从理论上解释VFS污染物去除效率与长度的关系。因此,将从文献[10,11,13,15-20]中提取的数据(图1(a)~(c)):VFS对总悬浮颗粒(TSS)、农药、TN、TP去除效率及相应的VFS长度,进行对数拟合。这里把文献中的泥沙和难溶的无机悬浮物、有机悬浮物一并考虑,将其统称为总悬浮颗粒物(TSS)。图1(d)为图1(a)~(c)中3种拟合关系的对比图。从图1(d)可以发现,农药对VFS长度的增加响应最灵敏,TSS和TN、TP的去除效率随VFS长度的增加变化较缓慢。这是因为TSS主要去除方式是沉积,径流中粒径较大、容易去除的颗粒基本上都被截留在前4m,粒径较小的泥沙颗粒比较难去除,因此在4m之后,去除效率随VFS长度增加不明显;TN、TP主要的去除方式是下渗,从水文角度看,下渗量是随着VFS长度增加而均匀增加的;农药由于较大的吸附能力,VFS长度对其的影响比对TN、TP更明显。

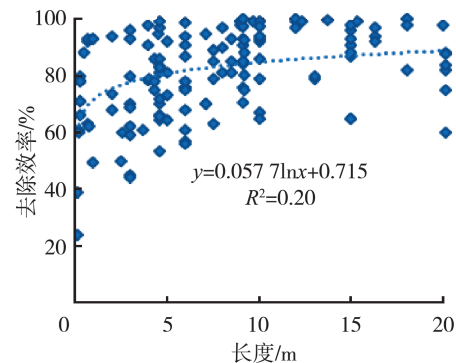
在实际应用中,需根据情况通过模拟得到合适的VFS长度,但图1的结果可供参考。对TSS、农药和TN、TP来说,要达到80%以上的去除效果,VFS长度分别需达到4m,6m和20m。

2.2 坡 度

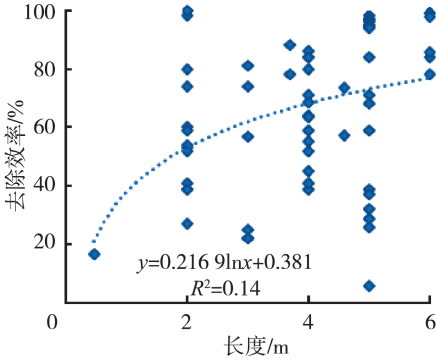
大部分研究认为坡度的增大会减弱VFS对污染物的去除效率,但也有研究认为坡度对VFS的污染物去除效率没有影响。根据文献[10,11,13,15-20]中提取的数据得到坡度与污染物去除效率关系图(图2),发现污染物去除效率和坡度的相关关系较弱,这和Yuan等^[21-23]的结论相同。根据曼宁公式,明渠水流的流速与坡度成正相关($V \sim S^{0.5}$),因此坡度增大,流速增大,减短滞留时间,且增大了

TSS 的临界沉降数,从而减弱了 VFS 的污染物去除效果。但流速对坡度的改变响应应较弱,如当坡度 S 增大 10 倍时,流速才增大 3 倍,因此在研究的坡度

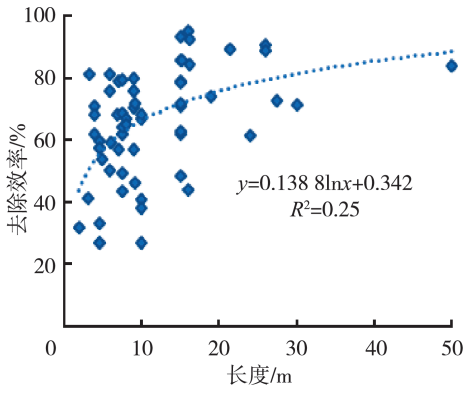
范围之内(2% ~ 15%),坡度对污染物去除效果的影响不大。总体而言,坡度的增加会降低 VFS 对污染物质的去除效率,但是影响不明显。



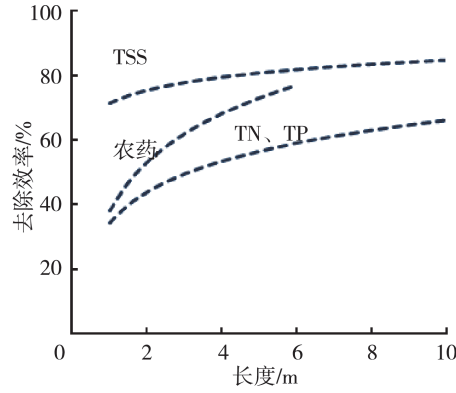
(a) TSS



(b) 农药

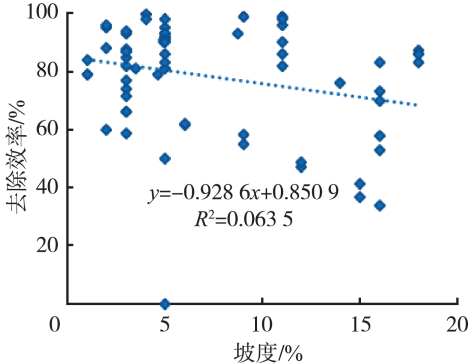


(c) TN、TP

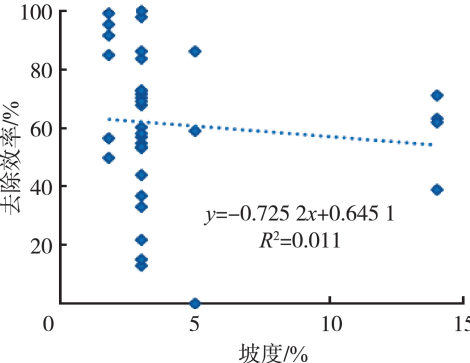


(d) 拟合关系对比

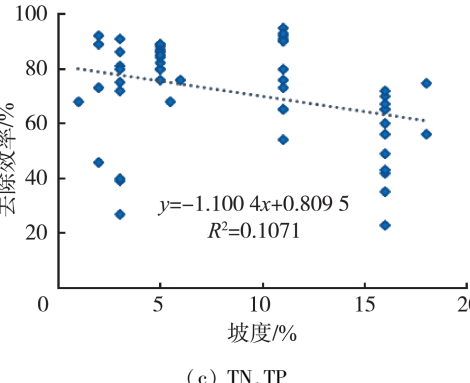
图1 VFS 长度与 TSS、农药、TN 与 TP 去除效率关系及其拟合关系对比



(a) TSS



(b) 农药



(c) TN、TP

图2 VFS 对 TSS、农药、TN 及 TP 的去除效率和坡度的关系

2.3 植被类型

植被类型通过植物形态、生物量及根系作用影响污染物去除效率。生物量越大,曼宁系数越大,则流速越小,根系作用越强,下渗量越大,越有利于污染物的去除。Fasching 等^[24]发现生物量大的多年生植物比冷季植物的污染物去除效果更好;Yang 等^[25]认为植被覆盖面积会影响 VFS 对污染物的去除效率。这里的生物量是指与水流接触的部分,如草本 VFS 效果优于沙棘灌木过滤带^[26]。有研究认为匍匐生长、茎干成网络状的植物形态污染物去除效果更好(如三叶草^[27]),其次具有分蘖能力的植物

(如黑麦草)污染物去除效果也较好^[28]。此外,一些植物有特定功能,如柳枝稷能吸收氮磷等^[29],三叶草等植物的根系作用比较强。因此,在选择植被类型时,应该优先选择生物量大、根系作用强、形态复杂的植物,并结合需要去除的污染物加以选取,以提高污染物去除效率。

2.4 污染物特性

VFS 对不同性质和类型污染物的去除效果不一样。VFS 对泥沙的去除效果优于其他污染物,且对 TSS 而言,平均粒径较大的颗粒比粒径较小的容易去除。相同平均粒径下,粒径分布越均匀,VFS 对泥沙去除效果越好。从 Sabbagh 等^[30] 总结的农药有机碳吸附系数(K_{oc})和农药去除效率的关系(图3)可以看出, K_{oc} 在 0 ~ 220 L/kg 的范围内, K_{oc} 抑制农药去除。 K_{oc} 超越1 250 L/kg 后有促进作用^[30-31]。

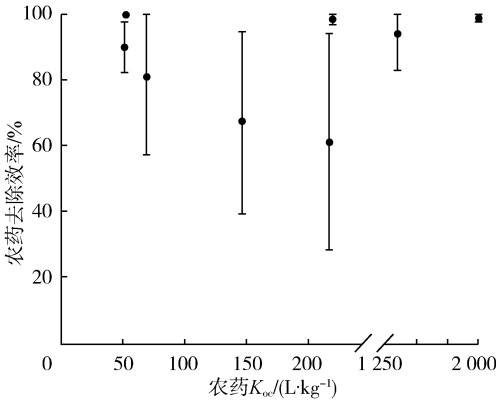


图3 农药有机碳吸附系数和去除效率

3 计算 VFS 污染物去除效率的经验模型和物理模型

3.1 经验模型

基于实验数据,研究者和工程师建立了定量估算 VFS 污染物去除效率的经验模型,本文选取了其中具有代表性的进行分析比较。

3.1.1 污染物去除效率和 VFS 长度关系的经验模型

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

式中: y 为污染物去除效率; x 为 VFS 长度, m; a 、 b 为经验参数。

该模型^[22,25]将其他因素(坡度、土壤类型等)的影响归结到参数 a 和 b 中,适用于泥沙和溶解态污染物。模型提供不同条件下 a 、 b 的经验值,见表 2。该模型能计算不同长度的 VFS 的污染物去除效率,但依赖于经验参数的获取。

3.1.2 计算 VFS 对黏土、粉砂、砾石去除效率的经验模型

除了能计算 VFS 对泥沙的总体拦截效果,SCVFS (sediment composition vegetative filter strip)

表 2 模型中 a、b 的经验参数

宽度/ m	植被管理措施 因子	坡度/ %	土壤 类型	污染物 类型	经验参数	
					a	b
400	0.5	2	粉沙质壤土	水	22.923 9	0.0124
200	0.5	10	粉沙质壤土	泥沙	41.854 3	0.0362
400	0.5	2	细砂壤土	水	95.009 8	0.0250
400	0.5	2	粉沙质壤土	泥沙	95.525 9	0.0511
200	0.5	2	粉沙质壤土	泥沙	97.318 4	0.1103
200	0.15	2	粉沙质壤土	泥沙	97.004 1	0.3133

注:0.5 代表耕作,0.15 代表不耕作表面覆盖作物残留。

模型^[28]能分别计算流出 VFS 中的黏土、粉砂和砾石的含量,其计算公式分别为

$$A_{clay} = \frac{10}{\lambda} c_1 \left(A_{0clay} \frac{\lambda}{10} \right)^{c_2} F_{clay}^{c_3} R^{c_4} (L - 4)^{c_5} \tag{2}$$

$$A_{silt} = \frac{10}{\lambda} c_6 \left(A_{0silt} \frac{\lambda}{10} \right)^{c_7} F_{silt}^{c_8} R^{c_9} (L - 4)^{c_{10}} \tag{3}$$

$$A_{sand} = A_{total} - A_{clay} - A_{silt} \tag{4}$$

式中: A_{clay} 、 A_{silt} 、 A_{sand} 、 A_{total} 分别为出口处的黏土、粉砂、砾石含量和泥沙总含量; A_{0clay} 、 A_{0silt} 、 A_{0sand} 、 A_{0total} 分别为无 VFS 时出口处的黏土、粉砂、砾石含量和泥沙总含量; L 、 λ 分别为 VFS 的长度和坡地的长度; F_{clay} 、 F_{silt} 分别为无 VFS 时黏土和粉砂占总输沙量的比例; R 为降雨条件下的侵蚀程度; $c^1 \sim c^{10}$ 为经验参数。

$c^1 \sim c^{10}$ 的经验值分别为 0.006、1.253、-0.547、0.320、-0.384、0.006、1.283、0.854、0.387、-0.519,适用于土壤有机物含量为 2% ~ 21%,平均值为 3%,黏土和粉砂的比例范围分别为 5% ~ 89% 和 10% ~ 80%,平均值分别为 33% 和 42%,平均空隙体积和孔隙度分别为 1.16 mg/m³ 和 53%,平均降雨强度为 0.62 mm/h 的情况。

3.1.3 基于去除方式建立的 VFS 污染物去除效率经验模型

部分研究^[30, 32-33]从污染物的去除方式出发,通过衡量不同去除方式的贡献量,建立 VFS 对农药、TP 去除效率的经验模型:

$$\Delta P = 24.79 + 0.54(\Delta Q) + 0.52(\Delta E) - 2.42 \ln(F_{pb} + 1) - 0.89C \tag{5}$$

$$\sqrt{101 - \Delta P} = 8.06 - 0.07\Delta Q + 0.02\Delta E + 0.05C - 2.17C_{at} + 0.02(\Delta Q/C_{at}) - 0.0003(\Delta Q/\Delta E) \tag{6}$$

$$\Delta T_{TP} = -30.1 + 0.78\Delta E + 0.50\Delta Q \tag{7}$$

式中: ΔP 、 ΔT_{TP} 分别为 VFS 对农药和 TP 的去除效率,%; ΔQ 、 ΔE 分别为流经 VFS 后流量和泥沙减小率,%; F_{pb} 为农药附着系数,表示溶解相和吸附到土壤颗粒的农药质量的比值; C 为黏土含量百分

数,% ; C_{at} 为农药种类。

公式(5)中,和 ΔQ 、 ΔE 成正相关,而溶解相农药越高(F_{ph} 越大)不利于吸附,黏土含量越高,由于黏土不易去除,即使农药吸附于泥沙颗粒上也不容易被去除。公式(6)中的结果显示 ΔP 和 ΔQ 、农药种类与 $\Delta Q/\Delta E$ 呈正相关,与其他因素呈负相关。公式(7)考虑了总磷的下渗和吸附。虽然3个模型(公式)对污染物去除效率有比较全面的估计,但需要已知 ΔQ 、 ΔE ,这也是不易得的参数,因此在使用时需要结合实验才能使用。

3.2 物理模型

经验模型有一定的局限性,尤其是经验参数的本地化存在局限。物理模型适用性更强,模拟精度更高。目前已经有了对泥沙、溶解态氮磷物质的传输机理模型。将降雨、水流运动和污染物运动模型加以耦合,就可以得到VFS污染物去除效率模型。目前耦合了水文模型和泥沙、溶质、农药传输模型的VFSMOD^[34],在国内外都有较广泛的应用^[23, 35]。常用的水文模型、泥沙以及溶质传输模型如下:

3.2.1 水文模型

VFS中的水流运动需考虑坡面流和下渗,坡面流用Saint-venant方程表示。由于VFS中的水流多为层流,Carpenna等^[34]用运动波来表示,Helmerts等^[36]考虑地形对VFS中径流运动的影响,则用扩散波表示。一维运动波和扩散波方程分别见式(8)~(9)。VFS中的下渗则用Green-Ampt等来表示。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(x,t) - f(x,t) \quad S_0 = S_f \quad (8)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(x,t) - f(x,t) \quad S_0 - \frac{\partial h}{\partial x} = S_f \quad (9)$$

式中: h 为水深,m; t 为时间,s; q 为流量, m^3/s ; x 为水流方向的距离,m; $r(x,t)$ 为 t 时刻的降雨强度, m/s ; $f(x,t)$ 为 t 时刻下渗率, m/s ; S_0 为地面坡降; S_f 为水力坡度。

3.2.2 泥沙运动模型

Kentucky模型描述了TSS在VFS中的运移过程,其概念模型见图4^[37]。TSS的运移区域分为楔形区和悬浮颗粒区,其中 $O(t)$ 为TSS沉积区,较大的颗粒在该区沉积,形成三角形区域; $A(t)$ 区域不发生TSS沉积,进入该区的TSS直接进入到了 $B(t)$;在 $B(t)$ 区,TSS随距离发生均匀沉积,颗粒较大颗粒先沉积;在 $C(t)$ 区的出口,推移质完全沉积;到达 $D(t)$ 区TSS的粒径较小,虽然也会沉积,但沉积量

很少。

该模型对TSS的沉积有具体的计算公式,Carpenna等^[34]的VFSMOD用该模型模拟了TSS在VFS中的传输,Helmerts等^[36]也用该模型模拟泥沙在坡地中的运动。但是某些研究表明,该模型不太适合模拟粒径较小的颗粒(如城市中的路面沙尘)^[38]。

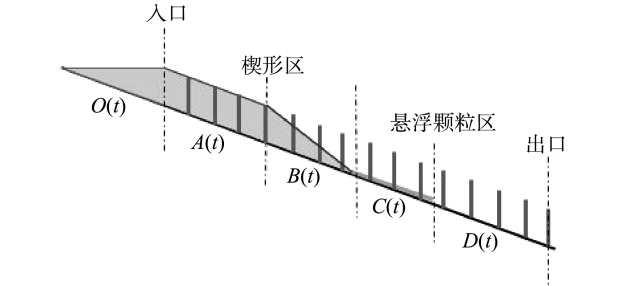


图4 TSS在VFS中的运移概念图

3.2.3 溶质运移模型

溶解态污染物的运动模型可以通过质量守恒定律得到,如Lee等^[39]提出的磷在VFS中传播的模型GRAPH,模型中磷的运动单元见图5。该模型考虑了对流、下渗、吸附解吸^[40]和生物摄取作用。通过对这一单元体进行物质守恒,列出如下等式:

$$y \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (qC)}{\partial x} + [f(t) + yK_m]C + yX(t,C,s) - Y(t) - Z(q,t) = 0 \quad (10)$$

式中各项代表的单元分别见图5。

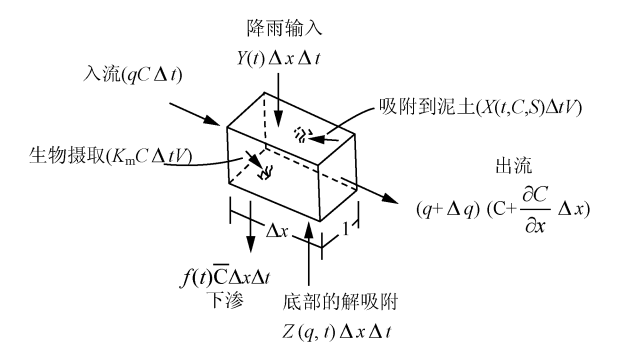


图5 溶解磷在地表水单元中运动的单元图

与磷的运动模型一样,农药和氮等物质的模型可以按照上面原则建立,但需要对氮、磷的生物化学反应过程、吸附过程有很好的了解与数学描述。由于这些过程复杂,目前这方面的研究还是不成熟的,这些模型的应用也存在一定的缺陷。

4 总结与展望

全面回顾了VFS对泥沙、氮、磷和农药的去除效率研究,对实验数据、经验模型、传输机理模型的研究成果做了总结。VFS对污染物的去除效率和VFS长度呈对数或指数相关关系,坡度的影响不明

显,农药的有机碳吸附系数对 VFS 污染物去除效率影响明显。经验模型能够按照泥沙的组分计算污染物去除效率,氮、磷的主要去除方式是下渗。

利用 VFS 缓解农业面源污染,一方面应该加强对其他污染物的研究,如胶体状的有机磷、大肠杆菌等,这类物质被忽视但影响明显;另一方面,考虑到国内的农田分布和城市面源污染特点,VFS 在流域尺度上的应用以及对污染物去除效率的定量化计算是新的需求。

参考文献:

[1] FLANAGAN K, BRANCHU P, RAMIER D, et al. Evaluation of the relative roles of a vegetative filter strip and a biofiltration swale in a treatment train for road runoff [J]. Water Science and Technology, 2017, 75 (4) : 987-997

[2] SCAVIA D, KALCIC M, LOGSDON R, et al. Multiple models guide strategies for agricultural nutrient reductions [J]. The Ecological Society of America, 2017, 15 (3) : 126-132

[3] LAMBRECHTS T, DE BRAEKELEER B C, FAUTSCH V, et al. Can vegetative filter strips efficiently trap trace elements during water erosion events? A flume experiment with contaminated sediments [J]. Ecological Engineering, 2014, 68: 60-64

[4] 夏军, 石卫, 王强, 等. 海绵城市建设中若干水文学问题的研讨 [J]. 水资源保护, 2017, 33 (1) : 1-8. (XIA Jun, SHI Wei, WANG Qiang, et al. Discussion of several hydrological issues regarding sponge city construction [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (1) : 1-8. (in Chinese))

[5] 章二子, 易明珠, 何华, 等. 塘坝整治上游水土拦截植被过滤带适宜宽度的理论计算研究 [J]. 江苏水利, 2017 (9) : 28-33. (ZHANG Erzi, YI Mingzhu, HE Hua, et al. Theoretical calculation study on appropriate width of upstream soil and water conservation intercepting vegetative filter strips in dam regulation [J]. Jiangsu Water Resources, 2017 (09) : 28-33. (in Chinese))

[6] 姜仁贵, 解建仓. 城市内涝的集合应对体系 [J]. 水资源保护, 2017, 33 (1) : 17. (JIANG Rengui, XIE Jiancang. Urban waterlogging collection system [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (1) : 17. (in Chinese))

[7] 王良民, 王彦辉. 植被过滤带的研究和应用进展 [J]. 应用生态学报, 2008, 19 (9) : 2074-2080. (WANG Liangmin, WANG Yanhui. Research and application advances on vegetative filter strips [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19 (9) : 2074-2080. (in Chinese))

[8] 陶梅, 萨仁娜. 植被过滤带防治农业面源污染研究进展

[J]. 山西农业科学, 2012, 40 (1) : 91-94. (TAO Mei, SA Renna. Research progresses in control of agricultural non-point pollution by vegetative filter strips [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2012, 40 (1) : 91-94. (in Chinese))

[9] 郑瑞伦, 庞卓, 王庆海. 植被过滤带阻控除草剂污染的研究与应用进展 [J]. 杂草学报, 2017, 35 (1) : 1-7. (ZHENG Ruilun, PANG Zhuo, WANG Qinghai. Research and application advances on the control of pesticide pollution with a vegetative filter strip [J]. Journal of Weed Science, 2017, 35 (1) : 1-7. (in Chinese))

[10] GHARABAGHI B, RUDRA R P, GOEL P K. Effectiveness of vegetative filter strips in removal of sediments from overland flow [J]. Journal of Water Quality Research, 2006, 41 (3) : 275-282.

[11] VIANELLO M, VISCHETTI C, SCARPONI L, et al. Herbicide losses in runoff events from a field with a low slope: role of a vegetative filter strip [J]. Chemosphere, 2005, 61 (5) : 717-725.

[12] VIAUD V, MEROT P, BAUDRY J. Hydro chemical buffer assessment in agricultural landscapes: from local to catchment scale [J]. Environmental Management, 2004, 34 (4) : 559-573.

[13] KRUTZ L J, SENSEMAN S A, DOZIER M C, et al. Infiltration and adsorption of dissolved atrazine and atrazine metabolites in buffalograss filter strips [J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32 (6) : 2319.

[14] GIL J S K. Determination of removal efficiency using vegetative filter strips based on various efficiency evaluation methods [J]. Environment of Earth Science, 2015, 73: 6437-6444.

[15] DILLAHA T A, RENEAU R B, MOSTAGHIMI S, et al. Vegetative filter strips for agricultural nonpoint source pollution control [J]. American Society of Agricultural Engineers, 1989, 32 (2) : 513-519.

[16] 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 and Environment, 2006, 117: 4-21.

[17] REICHENBERGERE S, BACH M, SKITSCHAK A, et al. Mitigation strategies to reduce pesticide inputs into ground and surface water and their effectiveness: a review [J]. Science of The Total Environment, 2007, 384 (1/2/3) : 1-35.

[18] PAN C, MA L, SHANGGUAN Z. Effectiveness of grass strips in trapping suspended sediments from runoff [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35 (9) : 1006-1013.

- [19] ARORA K, MICKELSON S K, HELMERS M J, et al. Review of pesticide retention process occurring in buffer strips receiving agricultural runoff [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2010, 3 (46) : 25-34.
- [20] AL-WADAIEY A, WORTMANN C S, FRANTI T G, et al. Effectiveness of grass filters in reducing phosphorus and sediment Runoff [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2012, 223 : 5865-5875
- [21] YUAN Y, BINGNER R L, LOCKE M A. A review of effectiveness of vegetative buffers on sediment trapping in agricultural areas [J]. Ecohydrology, 2009, 2 (3) : 321-336
- [22] DOSSKEY M G, HELMERS M J, EISEHAUER D E. A design aid for determining width of filter strips [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 63 (4) : 232-241
- [23] ABU-ZREIG M. Factors affecting sediment trapping in vegetated filter strips: simulation study using VFSSMOD [J]. Hydrological Processes, 2001, 15 (8) : 1477-1488
- [24] FASCHING R A, BAUDER J W. Evaluation of agricultural sediment load reductions using vegetative filter strips of cool season grasses [J]. Water Environment Research, 2001, 73 (5) : 590-596
- [25] 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
- [26] 马艺坤, 杨方社, 李怀恩, 等. 不同参数下植被过滤带对径流中农药的净化效果研究 [J]. 生态环境学报, 2017, 26 (5) : 876-882. (MA Yikun, YANG Fangshe, LI Huaen, et al. Experimental study on the purification effects of vegetative filter strips on the pesticide under the different parameters [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26 (5) : 876-882. (in Chinese))
- [27] LAMBRECHTS T, FRANCOIS S, LUTTS S, et al. Impact of plant growth and morphology and of sediment concentration on sediment retention efficiency of vegetative filter strips: flume experiments and VFSSMOD modeling [J]. Journal of Hydrology, 2014, 511 : 800-810
- [28] LOBO G P, BONILLA C A. A modeling approach to determining the relationship between vegetative filter strip design and sediment composition [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 237 : 45-54
- [29] 孙彭成, 高建恩, 王显文, 等. 柳枝稷植被过滤带拦污增效试验初步研究 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35 (2) : 314-321. (SUN Pengcheng, GAO Jianen, WANG Xianwen, et al. Effectiveness of switchgrass vegetative filter strip in intercepting pollutants and promoting plant biomass [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35 (2) : 314-321. (in Chinese))
- [30] SABBAGH G J, FOX G A, KAMANZI A, et al. Effectiveness of vegetative filter strips in reducing pesticide loading: quantifying pesticide trapping efficiency [J]. Journal of Environment Quality, 2009, 38 : 762-771
- [31] WATANABE H, GRISMER M E. Numerical modeling of diazinon transport through inter-row vegetative filter strips [J]. Journal of Environmental Management, 2003, 69 (2) : 157-168
- [32] 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
- [33] FOX G A, PENN C J. Empirical model for quantifying total phosphorus reduction by vegetative filter strips [J]. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2013, 56 (4) : 1461-1469
- [34] OZ-CARPENA R M, PARSONS B J E, GILLIAM J W. Modeling hydrology and sediment transport in vegetative filter strips [J]. Journal of Hydrology, 1999, 214 : 111-129
- [35] 潘岱立, 赵西宁, 高晓东, 等. 基于 VFSSMOD 模型的黄土坡面生草带产流产沙动态模拟 [J]. 农业工程学报, 2017, 33 (8) : 119-125. (PAN Daili, ZHAO Xining, GAO Xiaodong, et al. VFSSMOD-based runoff and sediment yield simulation on loess slope with vegetation filter strips [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33 (8) : 119-125. (in Chinese))
- [36] HELMERS M J, EISENHAUER D E. Overland flow modeling in a vegetative filter considering non-planar topography and spatial variability of soil hydraulic properties and vegetation density [J]. Journal of Hydrology, 2006, 328 (1/2) : 267-282
- [37] HAYES J C, BARFIELD B J, BARNHISEL R I. Performance of grass filters under laboratory and field conditions [J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27 (5) : 1321-1331.
- [38] DELETIC A. Sediment transport in urban runoff over grassed areas [J]. Journal of Hydrology, 2005, 301 : 108-122.
- [39] LEE D, DILLAHA T A, SHERRARD J H. Modeling phosphorus transport in grass buffer [J]. Journal of Environmental Engineering, 1989, 115 (2) : 409-427
- [40] 王晓宇, 盛晟, 孔进, 等. 河流植物群落下底泥中碳氮磷和重金属富集效应分析 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2017, 41 (2) : 20-26. (WANG Xiaoyu, SHENG Sheng, KONG Jin, et al. Accumulation of carbon, nitrogen, phosphorus and heavy metals in sediment under plant communities in river [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2017, 41 (2) : 20-26. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-12-20 编辑: 彭桃英)