

生态护岸面源污染物截污效率简化计算模型*

杨星¹, 王蔚²

(1. 江苏省水利科学研究院, 江苏南京 210017;
2. 江苏省水利工程建设局, 江苏南京 210029)

摘要: 生态护岸面源污染物截污效率的量化研究对生态护岸建设和管理具有重要的意义, 为此, 定义了生态护岸截污效率概念并建立了其简化计算模型, 同时, 利用常熟地区不同下垫面条件下的人工降雨模拟试验, 进一步分析得到了模型中降雨径流污染物浓度、降雨径流含沙量, 径流泥沙所吸附的污染物质量浓度的经验公式, 最后应用该模型对常熟市金泾塘河道治理中拟采用的梯级潜流式生态护岸进行了截污效率计算, 结果显示: 利用该模型计算的新型生态护岸综合截污效率达到了 75.4%, 和试验数据基本一致; 作为一种护岸环境效益的量化分析方法, 模型的建立具有明显的工程意义。

关键词: 生态护岸; 面源污染; 截污效率; 计算模型; 人工降雨试验; 经验公式

中图分类号: TV143 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2015)05-0090-06

Simplified Calculation Model of Non-Point Source Pollution Removal Efficiency by Ecological Embankment

YANG Xing¹, WANG Wei²

(1. Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, China;
2. Jiangsu Water Conservancy Project Construction Bureau, Nanjing 210029, China)

Abstract: Quantitative study of non-point source pollution removal efficiency is of significance in effective management of ecological embankment construction. Therefore, this work put forward a new concept of pollution removal efficiency of ecological embankment and the simplified calculation model. Meanwhile, several empirical formulas of key variables in this model were deduced based on the rainfall simulation tests under different ground cover in Changshu City, including pollutant concentrations in runoff water, sediment concentrations in runoff water and pollutant mass concentrations of sediment in runoff water. As one case study for the ecological embankment with a gradient and subsurface treatment system used for Jinjingtang River in Changshu City, the results showed the comprehensive pollution removal efficiency could reach 75.4%, which was in good agreement with experimental data. As a kind of quantitative analysis method of environmental benefits of ecological embankment projects, the establishment of the model had obvious engineering significance.

Key words: ecological embankment; non-point source pollution; pollution removal efficiency; calculation model; rainfall simulation tests; empirical formula

生态护岸是固岸技术的一种^[1-2]。在保有传统硬质材料护岸型式基本功能前提下, 生态护岸加强了护岸的生态保护功能、水边景观功能、文化内涵

表达功能等, 即能达到削弱护岸工程对自然水体环境生态胁迫性的目的, 又能很好地满足人们临水亲水的需求, 更能体现一定的区域水文化内涵, 符合

* 收稿日期: 2015-03-11

基金项目: 江苏省水利科技资助项目(2012064)

作者简介: 杨星(1978年生), 男; 研究方向: 水资源与水环境、港口、海岸及近海工程; E-mail: ydaxue@163.com

现代治河理念,得到了广泛的研究和应用,并取得了丰硕的成果,其中在护岸材料、构造型式、植草技术、行洪影响分析等方面,尤显突出。以生态护岸构造型式为例,基于天然石材、木材、植被等的常用型式就有堆石、石笼、活木桩(live staking)、灌丛垫(brush mattress)和活枝捆垛(live fascine)等数十种^[3-6]。20世纪80年代发明的三维土工网植草技术,2000年加拿大籍韩国人金博士与中国张逸阳博士共同发明研制的生态袋、各种生态砖、生态混凝土、可降解土工布等绿色材料的出现^[7-9],废弃物绿色材料加工工艺的发展^[10],以及对生态护岸行洪影响、结构安全性能等方向的深入研究^[11-13],进一步推动了生态护岸综合技术的发展。此外,生态护岸型式的多样化,还促进了以层次分析法(AHP)为代表的生态护岸优化选型技术的发展^[14]。

以上研究成果显示,国内外生态护岸建设分别经过短期、长期的发展,都积累了相当的理论基础和实践经验,若只从技术应用角度来看,两者之间的差距不大,主要的存异点在设计理念上,国外发达国家更关注生态护岸的固岸抗侵蚀功能和维系河岸自然属性功能,所以侧重于生态护岸的工程材料、结构安全设计等层面。国内因为当前河流污染、生态系统退化等存在的实际问题,而更寄希望于生态护岸在河流生态系统修复、入河污染物处理等方面的建设成效,已有的研究成果,如,刘盈斐^[15]通过鱼类对孔隙的选择实验,提出多孔栖息单元式生态护岸结构并研究新型生态护岸修建后的鱼类数量变化趋势;蔡婧^[16]针对上海城市地表径流的水质特征,研究了生态护岸提高生物多样性的效益以及生态护岸作为滨岸植被缓冲带控制面源污染的效益研究,都是围绕这两方面的内容进行的。但是现阶段研究成果的匮乏,理论认识又远远落后于工程实践认识,导致生态护岸的生态效益、环境效益的分析与设计,更多地只是依赖定性的和经验的的东西,而缺乏定量的依据,其建设成效不尽人意的实例不乏出现,这也是生态护岸建设目前面临的主要瓶颈问题。

综上,针对生态护岸在“生态修复”、“污染物处理”等方面即没有明确的建设要求,也没有规范化、标准化设计依据的现实情况,并特别考虑到降雨径流污染是河流水体污染的主要原因之一,对河流生态环境已经构成严重威胁。在污染物处理方面,虽然国外学者早在20世纪90年代初,就针对湿地、砂滤等系统提出了一些表征污染物去除率

的简易方程式,但尚不能直接应用在生态护岸上,生态护岸截污效率计算模型匮乏已成为制约生态护岸设计技术发展的障碍之一,亟待进行研究。为此,定义了生态护岸的截污效率,提出了生态护岸面源污染物截污效率简化计算模型,为生态护岸环境效益定量性的分析与设计提供一种新的数学方法。

1 模型的建立

1.1 截污效率模型的初步建立

设污染物 x 任意计算时段 Δt (s)进入护岸系统的总量为 M_{It} (kg),对应的护岸系统截留的污染物总量为 M_{Et} (kg),则护岸系统 Δt 时段污染物 x 的平均截污效率 P (%)可用公式(1)计算

$$\bar{P} = \frac{M_{Et}}{M_{It}} \times 100\% \quad (1)$$

污染物 x 进入护岸系统的总量 M_{It} 可以分为径流携带的可溶性部分和径流泥沙吸附的非可溶部分,按公式(2)计算

$$M_{It} = \bar{Q}_{It} \bar{S}_{It} \bar{C}_{st} \Delta t \times 10^{-6} + \bar{Q}_{It} \bar{C}_{It} \Delta t \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中, \bar{Q}_{It} 为计算时段 Δt 内,进入护岸系统的平均降雨径流量(m^3/s); \bar{S}_{It} 为计算时段 Δt 内,进入护岸系统的降雨径流平均含沙量(kg/m^3); \bar{C}_{st} 为计算时段 Δt 内,径流泥沙所含污染物 x 的平均质量浓度(mg/kg); \bar{C}_{It} 为计算时段 Δt 内,降雨径流所含的溶于水中的污染物 x 的平均质量浓度(mg/L)。

污染物 x 护岸系统的截留总量 M_{Et} 主要受2个因素的影响,包括护岸系统截砂的能力、护岸系统截留径流中可溶性污染物的能力,可以按公式(3)计算

$$M_{Et} = M_{1t} + M_{2t} \quad (3)$$

式中, M_{1t} 为计算时段 Δt 内,截砂作用截留的污染物 x 的平均质量(kg); M_{2t} 为计算时段 Δt 内,护岸系统截留的溶在水中的污染物 x 的平均质量。

M_{1t} 和 M_{2t} 分别按公式(4)和公式(5)计算

$$M_{1t} = \bar{K}_{It} \bar{Q}_{It} \bar{S}_{It} \bar{C}_{st} \Delta t \times 10^{-6} \quad (4)$$

$$M_{2t} = \bar{K}_{2t} \bar{Q}_{It} \bar{C}_{It} \Delta t \times 10^{-3} \quad (5)$$

式中, \bar{K}_{It} 为计算时段 Δt 内,护岸系统平均截砂效率(取值0~1); \bar{K}_{2t} 为计算时段 Δt 内,护岸系统对溶于水中的污染物 x 的平均截污效率(取值0~1)。

当 Δt 足够小的时候,护岸系统 Δt 时段污染物 x 平均截污效率 \bar{P} 即为 t 时刻系统的截污效率,同时,各时刻的含沙量、污染物浓度等的平均值也可以理解为 t 时刻的数值,于是将上述公式(2)~公式(5)代入公式(1),得到 t 时刻系统截污效率 P 的计算公式(6)

$$P = \frac{K_{1i}S_{1i}C_{st} + 1000K_{2i}C_{1i}}{S_{1i}C_{st} + 1000C_{1i}} \times 100\% \quad (6)$$

式中, K_{1i} 为护岸综合截砂效率 (取值 0 ~ 1); K_{2i} 为护岸对溶于水中的污染物 x 的综合截污效率 (取值 0 ~ 1); C_{1i} 为降雨径流所含溶在水中的污染物 x 的质量浓度 (mg/L); C_{st} 为径流泥沙所含污染物 x 的平均质量分数 (mg/kg); S_{1i} 为进入护岸系统的降雨径流含沙量 (kg/m^3)。公式中的参数受下垫面条件、降雨强度等影响很大, 下面一一讲解。

1.2 C_{1i} 求解公式推导

降雨径流所含污染物浓度的大小受下垫面条件、降雨强度、降雨量、降雨频次等综合因素的影响, 理论上难以直接求解, 于是根据实测数据寻求经验公式成为解决的手段。为此, 基于以下实际情况: ①降雨对下垫面表层污染物的冲刷、稀释和溶解等作用主要发生在降雨径流形成的初期, 所以尽管径流污染物质量浓度会随着降雨过程呈现出一定的随机性和波动性, 但总体下降的趋势不会改变; ②雨强越大, 雨水对地表的冲刷作用越强, 则降雨径流携带的污染物就越多。所以, 一定范围内, 降雨量与污染物质量浓度呈正相关关系。但是, 降雨对污染物还有稀释的作用, 超出一定雨强范围后, 在相同的污染物累积量条件下, 雨强越大, 雨水对污染物的稀释作用越强, 径流中污染物的质量浓度就会降低, 降雨量与污染物质量浓度呈负相关关系; ③水利工程上, 设计降雨重现期一般 ≥ 20 年一遇 (与市政排水设计区别), 所以用于分析的实测数据应取较大降雨强度的情况; 并通过在常熟河网地区不同下垫面进行人工降雨模拟试验, 推求获得 C_{1i} 经验公式 (7)。其中人工降雨装置采用南京南林电子科技有限公司设计的 NLJY-10: 降雨高度 4 m; 雨滴直径分布范围为 1.7 ~ 2.8 mm; 有效降雨面积为 4 m^2 ; 试验雨强分别选择 10、20、50 mm/h; 连续降雨历时 120 min; 检测污染物仅考虑 TP、TN。

$$C_{1i} = \frac{\alpha^3(\gamma - \beta)^2}{(i - \beta)^2 + 4\alpha^2} \times \frac{a^3}{(t - b)^2 + a^3} \quad (7)$$

式中, α 、 β 、 γ 、 a 、 b 是参数, i 是降雨强度变量 (mm/h), t 是时间变量 (min)。

下面验证公式的合理性:

1) 公式 (7) 中的 $\frac{\alpha^3(\gamma - \beta)^2}{(i - \beta)^2 + 4\alpha^2}$ 表示径流污染物质量浓度的峰值, 根据同一场地不同雨强下人工降雨实测峰值, 试算看是否能取得最佳的参数 α 、 β 、 γ 数值。仅给出常熟金泾塘南港塘段菜地人

工模拟降雨试验试算结果, 参考表 1 和图 1, 显示: ①计算的污染物峰值和实测数据几乎完全吻合; ②当 $i \rightarrow +\infty$, 峰值 $\rightarrow 0$, 若不考虑雨水自身的污染物含量, 这一趋势也是合理的; ③当 $i = 0$ 时, 计算峰值 $\neq 0$, 可以将 $i = 0$ 时计算峰值作为径流污染物质量浓度的阈值。

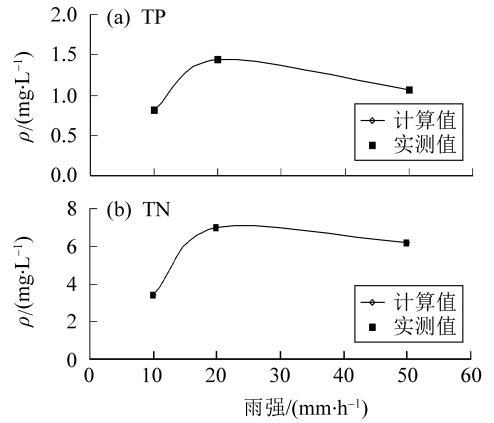


图 1 径流污染物峰值计算值和实测值对比

Fig. 1 Comparison of calculated values and experimental values of of the peak of pollutant concentration

表 1 降雨径流污染物质量浓度计算公式参数

Table 1 Calculation parameters for formula (7)

类别	α	β	γ	a	b
TP	8.69	32.37	33.37	9.36	14.40
TN	6.51	34.19	37.26	8.51	22.50

2) 公式 (7) 中的 $\frac{a^3}{(t - b)^2 + a^3}$ 表示污染物变

化趋势, 乘上已经确定的峰值, 则可根据不同雨强下人工降雨实测污染物质量浓度过程, 试算看是否能取得最佳的参数 a 、 b 值, 使得按公式 (7) 计算出的污染物变化过程相似于实测数据。仅给出常熟金泾塘南港塘段菜地人工模拟降雨试验试算结果, 且仅考虑污染物输出质量浓度较大的 20 mm/h 降雨过程, 参考表 1 和图 2, 计算的污染物过程和实测数据拟合度好, 显示了公式 (7) 的适用性和合理性。

1.3 S_{1i} 求解公式推导

降雨泥沙的产生过程包括雨滴的击溅起沙、片蚀、沟蚀以及径流搬运等过程, 机理上十分复杂, 理论上也难以直接求解, 为此, 基于以下实际情况: ①降雨量越大, 雨滴对地表的打击扰动作用越强, 则侵蚀力越大, 泥沙流失也就越多, 所以高强度的降雨在径流形成初期更容易形成较大的含沙量; ②径流泥沙含量随着产流过程存在一定的波

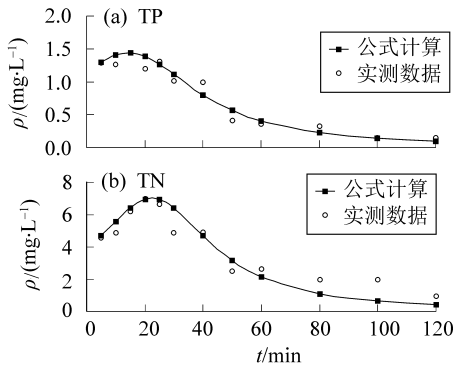


图 2 径流污染过程计算值和实测值对比 (雨强: 20mm/h)
Fig. 2 Comparison of calculated values and experimental values of the rainfall pollution process (Rainfall intensity: 20mm/h)

动, 但总体随着降雨过程的渐趋结束而呈现下降趋势; ③参考一般的降雨重现期设计条件, 仅考虑大暴雨情况。通过 1.2 节的人工降雨模拟试验, 推求获得 S_{it} 计算公式如下

$$S_{it} = [\varphi \ln(\theta i) + \varepsilon] \times (0.01ct + d)^3 \quad (8)$$

式中: φ 、 θ 、 ε 、 c 、 d 是参数; i 是降雨强度变量 (mm/h); t 是时间变量 (min)。下面验证公式的合理性。

1) 公式中的 $\varphi \ln(\theta i) + \varepsilon$ 表示径流泥沙含量的峰值, 根据同一场地不同雨强下人工降雨实测峰值, 试算看是否能取得最佳的参数 φ 、 θ 、 ε 数值。仅给出常熟金泾塘南港塘段菜地人工模拟降雨试验试算结果 (图 3, $\varphi = 3.20, \theta = 14.14, \varepsilon = -8.30$), 显示: ①计算的径流泥沙峰值和实测数据吻合良好; ②降雨强度较低阶段, 峰值增长很快, 随着降雨强度的不断增大, 增长趋势逐渐减缓, 与试验结果相似; ③当 $i < 0.95$ 时, 计算峰值 < 0 , 此时径流泥沙含量计算值已经没有工程意义。

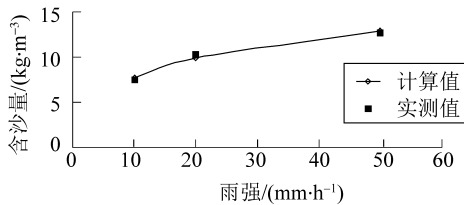


图 3 径流泥沙峰值计算值和实测值对比
Fig. 3 Comparison of calculated values and experimental values of the peak of sediment concentration

2) 公式 $(0.01ct + d)^3$ 表示径流泥沙变化趋势, 乘上已经确定的峰值, 则可根据不同雨强下人工降雨实测泥沙含量过程, 试算看是否能取得最佳的参数 c 、 d 值, 使得按公式 (8) 计算出的径流

泥沙含量变化过程相似于实测数据。仅给出常熟金泾塘南港塘段菜地人工模拟降雨试验试算结果, 且仅考虑 20 mm/h 降雨过程 (图 4, $c = -0.33, d = 1.05$), 计算的径流泥沙变化过程和实测数据拟合度好, 显示了公式 (8) 的适用性和合理性。

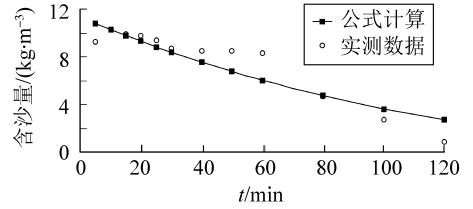


图 4 径流泥沙计算过程和实测过程对比
Fig. 4 Comparison of calculated values and experimental values of the sediment concentration process

1.4 C_{st} 求解公式推导

降雨径流形成过程中, 土壤中的一部分污染物溶解于水中, 由地表径流运载汇入河道; 另一部分非可溶性污染物, 直接通过径流泥沙载体运输汇入河道, 成为潜在的污染源。将人工降雨试验区域随机采集的土样, 参照相关检测规范进行前处理, 之后作为待检测土样: ①各取少量待检测土样做土壤 TP、TN 的检测; ②各取 100 g 待检测土样, 分别加入 500 mL 蒸馏水, 用玻璃棒充分搅拌 (图 5), 最大释放土壤中的可溶性污染物, 之后检测水中的 TP、TN 值; ③所得结果按公式 (9) 分别计算土壤污染物 TP、TN 中各自可溶性部分占比, 结果参考表 2。

表 2 试验区土壤 TP 和 TN 可溶性部分占比

Table 2 Ratio between soluble TP and TN in the soil

指标	$\xi/\%$	
	范围	平均值
TP	0.47 ~ 0.63	0.52
TN	1.31 ~ 1.80	1.56

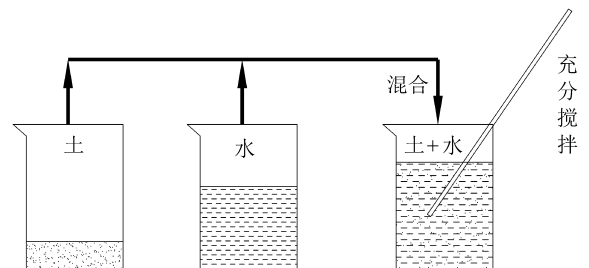


图 5 土壤污染物中可溶性比例试验
Fig. 5 Soluble contaminant test in the soil

$$\xi = \frac{V_{\pm} C_{\pm}}{M_{\pm} C_{\pm}} \times 100\% \quad (9)$$

式中, ξ 为土壤某种污染物中可溶性部分所占的百分比(%); $M_{\pm} C_{\pm}$ 为土壤某种污染物质的质量(mg), 其中, M_{\pm} 为土壤质量(kg, 本例为 0.1 kg), C_{\pm} 为土壤中某种污染物质的质量分数(mg/kg); $V_{\pm} C_{\pm}$ 为水中某种污染物质的质量(mg), 其中 V_{\pm} 为水体体积(L, 本例为 0.5 L), C_{\pm} 为某种污染物质的质量浓度(mg/L)。

以上结果显示: ①试验区土壤污染物质的可溶性部分占比稳定在一定的范围内; ②试验区土壤总的污染物质中, 可溶性部分仅占到 1% 左右, 其余不可溶性部分占到 90% 左右, 也间接说明了对径流泥沙拦截的重要性。所以, 可以将 C_{st} 表达如公式(10), 是合理的。

$$C_{st} = \xi C_{\pm} \quad (10)$$

1.5 截污效率模型的说明

综上, 将 C_{1t} 的表达式(7)、 S_{1t} 的表达式(8)、 C_{st} 的表达式(10) 带入公式(6), 同时, 通过试验、经验公式等可以确定系数 K_{1t} 、 K_{2t} 数值, 则可求得护岸系统的综合截污效率 P 。需要说明的是: ①生态护岸环境效益定量分析缺乏足够的理论基础和研究成

果, 所以其截污效率计算公式建立在经验公式推导基础上; ②水利工程上的设计降雨重现期较大, 本节所分析的各类公式一般适用于一定暴雨等级的情况; ③公式中主要系数的确定, 还需要针对不同地域不同土地利用形式, 在下一阶段展开进一步的试验研究, 最终给出系数查算图表。

2 生态护岸截污效率计算模型实例应用

因建设单位和设计单位可研需要, 对常熟市金泾塘河道治理中拟采用的一种新型生态护岸—梯级潜流式生态护岸(参考图 6) 进行截污效率计算。其截污设计思路参考了土壤渗滤和潜流式湿地污水处理技术, 不仅在其内部构筑了砂石填料和梯级跌水坎, 还在外部构筑了截雨沟和生态袋, 其中截雨沟即用于输送降雨径流进入砂石填料, 又兼顾沉砂截污的作用; 连续设置的梯级跌水坎则是为了增强砂石填料去污效果, 即一方面利用其阻水作用, 增大污染物的水力停留时间, 一方面利用坎槽的蓄水作用, 提供可吸附污染物的微生物生存或维持微生物活力的富含有机质的水体环境; 砂石填料则具有比较有效的渗滤截污作用; 生态袋上生长的植被也用于截污作用。

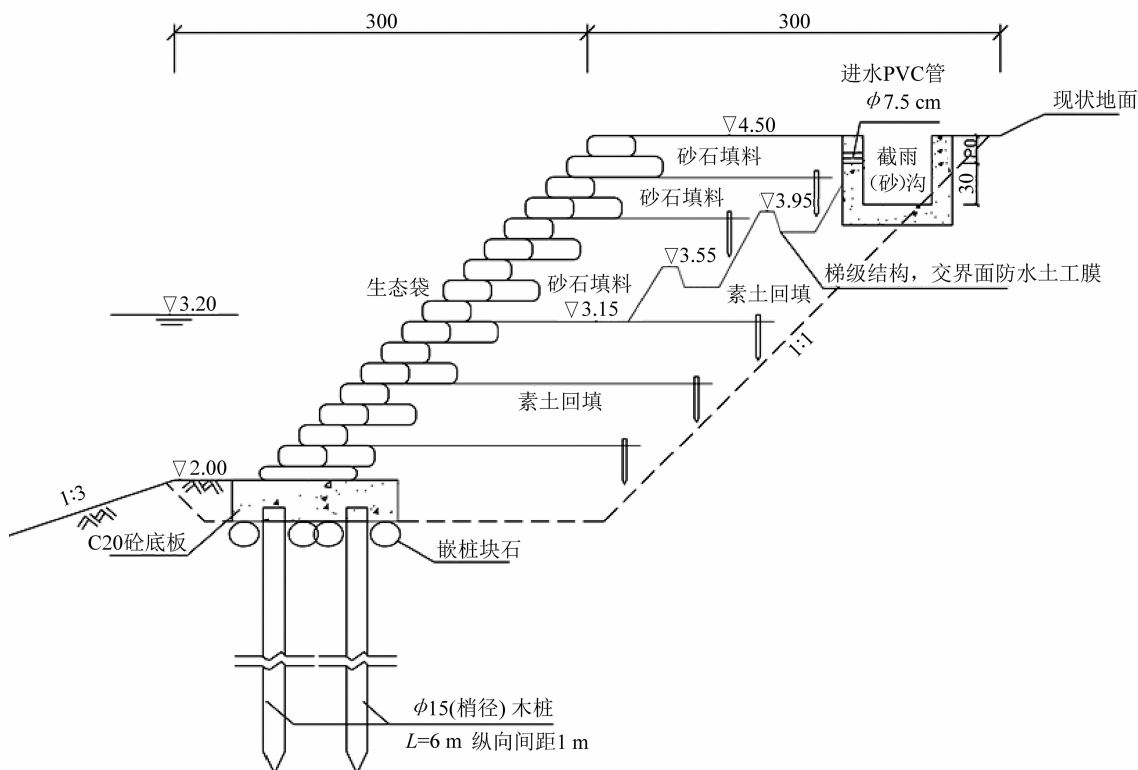


图 6 梯级潜流式生态护岸断面结构

Fig. 6 Cross-sectional structure of the ecological riverbank

以 TP 为例,20 mm/h 设计降雨强度条件下,参考已有的前期试验成果^[17],梯级潜流式生态护岸综合截砂效率 $K_{11} = 0.83$,对溶于水中的 TP 的综合截污效率 $K_{21} = 0.21$,另外 C_{11} 、 S_{11} 、 C_{s1} 分别按公式(7)、公式(8)、公式(10)计算,其中主要系数参考表 1,计算成果参考图 7,梯级潜流式生态护岸综合截污效率为 75.4%,与试验结果基本一致^[17],为生态护岸的合理规划和科学设计提供了数据支撑和定量分析方法。

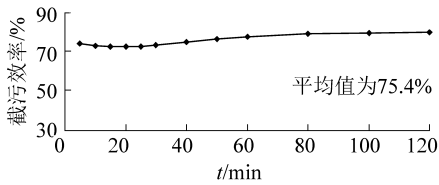


图7 梯级潜流式生态护岸综合截污效率

Fig.7 Efficiency of pollutant elimination of the ecological riverbank

3 结论与展望

从环境效益角度,生态护岸还停留在经验设计阶段,缺少定量分析的数学方法,为此,本文进行了生态护岸面源污染物截污效率简化计算模型的研究,主要结论与展望如下:

1)提出了生态护岸截污效率的概念,分析推导了其计算模型。同时,通过开展常熟河网地区不同下垫面条件下的人工模拟降雨试验,进一步分析得到了模型中降雨径流污染物浓度、降雨径流含沙量,径流泥沙所吸附的污染物质量浓度的经验公式,为生态护岸的规划和设计提供了定量分析的数学方法。

2)利用生态护岸截污效率计算模型,对常熟市金泾塘河道治理中拟采用的一种新型生态护岸—梯级潜流式生态护岸进行了截污效率计算,为金泾塘河道治理的相关建设单位和设计单位提供了必要的参考数据。

3)文中推求的生态护岸截污效率计算模型中的主要参数仅适合常熟地区,其它地区的适宜参数获取尚需要经过进一步的试验,以参数查算图表的形式给出,以方便今后使用。

4)总的来说,生态护岸截污效率简化计算模型建立过程依据的实测数据以及一般性的降雨面源污染规律,是主要针对中小河流的,对于较大河流情况,还有待进一步分析其合理性。

参考文献:

- [1] LI M H, EDDLEMAN K E. Biotechnical engineering as an alternative to traditional engineering methods: A biotechnical streambank stabilization design approach [J]. Landscape and Urban Planning, 2002, 60(4): 225 - 242.
- [2] SUDDUTH E B, MEYER J L. Effects of bioengineered streambank stabilization on bank habitat and macroinvertebrates in urban streams [J]. Environmental Management, 2006, 38(2): 218 - 226.
- [3] BARITEAU L, BOUCHARD D, GAGNON G, et al. A riverbank erosion control method with environmental value [J]. Ecological Engineering, 2013, 58:384 - 392.
- [4] 王艳颖,王超,侯俊,等.木栅栏砾石笼生态护岸技术及其应用[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(3):251 - 254.
- [5] LI X, ZHANG L, ZHANG Z. Soil bioengineering and the ecological restoration of riverbanks at the Airport Town, Shanghai, China [J]. Ecological Engineering, 2006, 26(3): 304 - 314.
- [6] FROTHINGHAM K M. Evaluation of stability threshold analysis as a cursory method of screening potential streambank stabilization techniques [J]. Applied Geography, 2008, 28(2): 124 - 133.
- [7] 郝伟,武雷,李清曼.基于生态砖构建的新型河堤结构及位移分析[J].水利与建筑工程学报,2012,10(5): 41 - 44.
- [8] FENNIS S. Design of ecological concrete by particle packing optimization [D]. Delft University of Technology, 2011.
- [9] VISHNUDAS S, SAVENIJE H H G, ZAAG P, et al. The protective and attractive covering of a vegetated embankment using coir geotextiles [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2006, 10(4): 565 - 574.
- [10] 何池全,智光源,钱光人.建筑垃圾制作植被生态混凝土的实验研究 [J]. 建筑材料学报,2007,10(5): 592 - 597.
- [11] 张玮,钟春欣,应瀚海.草皮护坡水力糙率实验研究 [J]. 水科学进展,2007,18(4):483 - 489.
- [12] 谭水位,陈文学,吴一红,等.柔性护坡袋抗冲性能试验研究 [J]. 水利学报,2013,44(3):361 - 366.
- [13] 魏林春,樊建超,罗仁安,等.绿化生态混凝土双向力学性能实验研究 [J]. 上海大学学报:自然科学版,2006,12(6):647 - 655.
- [14] 王越.河道不同生态护岸型式的适用性研究 [D]. 武汉:长江科学院,2012.
- [15] 刘盈斐.多空生态护岸的实验分析与设计研究 [D]. 大连:大连理工大学,2007.
- [16] 蔡婧.河道生态护岸的工程设计与生态效益研究 [D]. 上海:上海大学,2008.
- [17] 杨星.基于生态护岸的降雨径流污染处理系统研究与应用 [R]. 江苏省水利科学研究所,2013.