

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

章二子, 易明珠*, 何 华, 林 洁, 陈 庠

(江苏省江宁区水利局, 江苏 南京 211100)

摘要: 植被过滤带是防治水土和养分流失、减少氮磷污染物流入水体的重要途径, 确定过滤带的最佳宽度是研究过滤带合理建设的关键问题之一。为确定合适的过滤带宽度, 通过 Overcash 方法计算得出, 在总长度为 50 m 的坡面上, 当分别要求输出 VFS 的污染物降至入流浓度或负荷量的 85% 时, 要求过滤带宽度分别达到 1.20 m 或 1.41 m; 当要求将流入浓度为 $11.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 降至流出浓度为 $7.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 或将污染物输移量减少至 $0.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 要求过滤带宽度分别达到 2.60 m 或 2.95 m。采用 Phillips 水文模型计算则要求宽度达到 2.79 m。在理论计算基础上确定过滤带宽度为 3.0 m。采用 VFS 宽度为 3 m 的过滤带进行野外试验, 实测值与计算值一致性较好, 平均减少污染物至入流浓度的 34.6%, 减少污染物输入负荷量的 30.6%, 控制流入浓度为 $11.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 至流出为 $7.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 减少污染物输移量 $0.274 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

关键词: 植被过滤带; 宽度; 定量计算; 试验

中图分类号: S157.1

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839 (2017) 09-0028-06

Theoretical calculation study on appropriate width of upstream soil and water conservation intercepting vegetative filter strips in dam regulation

ZHANG Erzi, YI Mingzhu*, HE Hua, LIN Jie, CHEN Xiang

(Jiangning Water Conservancy Bureau, Nanjing 211100, Jiangsu)

Abstract: The vegetative filter strips is an important way to prevent the loss of soil and nutrients, to reduce nitrogen and phosphorus flow into water. To determine the optimum width of the filter strip is one of the key problems for the reasonable construction. In order to determine the appropriate width of filter strip, the Overcash method was used to calculate. On the total length of 50 meter slope, when the pollutant of VFS was required to be reduced to 85% of the inflow concentration or load respectively, the filter strip width should be 1.20meter or 1.41meter. When the concentration of $\text{NH}_4\text{-N}$ was required to be reduced from an inflow concentration of $11.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to an outflow concentration of $7.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, or the pollutant transport amount reduced to $0.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, the width of filter strip should be 2.60 meter or 2.95 meter respectively. And using Phillips hydrological model to calculate, the width was required to be 2.79 meter. In a word, the width of filter strip was determined as 3.0 meter based on theoretical calculation. Carrying out the field test with the VFS width of 3.0 meter, the measured value was consistent with the calculation value. On average, the pollutant concentration was reduced to 34.6% of the inflow concentration, the input load of pollutants was reduced by 30.6%, the concentration of $\text{NH}_4\text{-N}$ was controlled from an inflow concentration of $11.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to an outflow concentration of 7.42

收稿日期: 2017-06-09

基金项目: 江苏省水利科技项目 (2016053)

作者简介: 章二子 (1983-), 男, 工程师, 主要从事水利工程建设和管理工作。

通讯作者: 易明珠 (1977-), 女, 高级工程师, 研究方向为农田水利。

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the pollutant transport amount reduced by $0.274 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.

Key words: vegetative filter strips; width; quantitative calculation; test

0 引言

塘坝是南方地区常见的拦蓄和贮存地表径流的蓄水设施, 具有调蓄雨洪资源、农业灌溉、防止水土流失、拦截氮磷面源污染物等重要功能。由于塘坝上游农业活动的发展, 随径流汇水进入塘坝的泥沙、氮磷污染物和生活垃圾污水的增长, 引起塘坝淤积、水体环境恶化、生态功能逐步丧失。植被过滤带是位于污染源和水体之间的带状植被(乔、灌、草甚至农作物), 它可使地表径流中污染物发生沉降、过滤、稀释、下渗和吸收, 在防治水体遭受泥沙淤积和面源污染等方面作用显著, 目前已被欧美国家推荐为流域治理的一种有效措施^[1-5]。然而, 该技术目前仍有待进一步深入和细化, 尤其是在塘坝复合植被过滤带配置模式和优化设计等方面需进行大量研究工作。研究表明, 不同宽度的植被过滤带具有显著不同的污染物去除效果。因此, 确定最适宽度使其去污效果最好并且占地面积最少, 是设计植被过滤带时首先考虑的问题, 但目前相关研究存在较大争议。Dhondt等研究表明5~8 m宽的植被过滤带即可全部去除径流中的硝态氮, 但Dosskey认为这一宽度至少应为30 m。分析已有研究可知, 植被过滤带最适宽度是目前研究最多、同时也是争议最大的问题, 相关研究结果存在数倍、甚至数十倍的差异, 基本不具有可比性。这一状况可能与不同研究区的气候特征、土壤类型、所选植物种类、所需去除污染物等因素有关。因此, 在某一特定地区, 应综合考虑上述因素以确定该区植被过滤带的最适宽度, 同时完善最适带宽的理论分析和计算方法。

江宁区地处宁镇扬低山丘陵区, 全区山圩并兼, 水系纵横。塘坝对于江宁区水资源供给具有非常重要的意义。江宁区大小塘坝41423座, 总库容12970万 m^3 。调查研究表明, 由于水土流失和面源污染等原因, 江宁区塘坝泥沙淤积严重、水质不断下降, 对江宁区水资源水环境构成了严重威胁。本研究通过理论计算结合试验验证, 探索不同宽度的植被过滤带对泥沙淤积和氮磷污染物的防治效果, 进而为提高江宁区塘坝调蓄水资源和

水环境能力提供帮助。

1 研究区概况

江宁区位于江苏省南京市中南部, 介于北纬 $30^\circ 38' \sim 32^\circ 13'$, 东经 $118^\circ 31' \sim 119^\circ 04'$ 之间。总面积 1577.75 km^2 , 水域面积 186 km^2 。江宁境内地质条件十分复杂, 有低山、丘陵、岗地、平原和盆地, 其中丘陵岗地面积最大。地势南北高而中间低, 形同“马鞍”。境内有大小山丘400个, 山体高度都在海拔400 m以下(下文所有涉及高程的都指海拔高), 属典型的丘陵、平原地貌。江宁区属北亚热带季风气候区, 气候温和, 年平均气温 15.7°C ; 无霜期长, 平均无霜期为224 d; 雨水充沛, 年平均降水量为1072.9 mm。雨热同季, 天气的变化比较复杂, 常出现春秋季节低温冷害、雨涝、台风、寒潮、干旱、冰雹、雷雨大风等灾害性天气。年极端最低气温 -13.3°C , 年极端最高气温为 40.4°C 。

2 植被过滤带宽度计算

2.1 Overcash 方法

在Overcash^[6]等人的研究基础上, Edwards等开发了一种VFS的定量设计方法, 其假设条件为:

(1) VFS能去除污染物的唯一机制是通过入渗;

(2) 从水质的角度来看, 施用粪肥后的第一次降雨径流最为关键;

(3) 污染物的积累不会削弱VFS的功能。

通过以上假设, 该设计方法的基本方程为:

$$C_x = C_b + (C_o - C_b)e^{\left(\frac{1}{1-D}\right)\ln\left(\frac{1}{1+K}\right)} \quad (1)$$

式中:

C_x —流出VFS的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$;

C_o —流入VFS的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$;

C_b —背景浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$;

D —入渗量与降雨量之比;

K —VFS与施用肥料区长度之比。

其中:

$$D = I/R = (R - Q)/R \quad (2)$$

$$K=X/W \quad (3)$$

式中:

I —入渗, mm;

R —降雨深, mm;

Q —径流深, mm;

X —VFS 平行于径流方向的长度, m;

W —平行于径流方向上的肥料施用区长度, m。

流出单位 VFS 宽度的污染物输移量:

$$M_X = \frac{Q(W+X)}{1000000} \left[C_B + (C_O - C_B) e^{\left(\frac{1}{1-D}\right) \ln\left(\frac{1}{1+K}\right)} \right] \quad (4)$$

式中:

M_X —流出单位宽度 VFS 的污染物输移量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

Overcash 等导出的 VFS 净化污染物的方程如下:

$$P_C = \left[1 - e^{\left(\frac{1}{1-D}\right) \ln\left(\frac{1}{1+K}\right)} \right] \quad (5)$$

$$P_M = \left[1 - (1+K) e^{\left(\frac{1}{1-D}\right) \ln\left(\frac{1}{1+K}\right)} \right] \quad (6)$$

式中:

P_C 、 P_M —分别为输入 VFS 的污染物浓度和输移量的减少量所占入流浓度或负荷量的比例。

如果 VFS 的设置目的是减少污染物输移量至一固定的单位面积质量, 或是减少至输入输移量的一定比例, 则 VFS 的宽度可由方程的粪肥输移部分确定, 分别得出 X 与 K 方程:

$$X = \left[\frac{1000000 M_A W \frac{1}{1-D}}{(R-1)(C_O - C_B)} \right]^{\frac{D-1}{D}} - W \quad (7)$$

$$K = \left[\frac{1}{1-P_M} \right]^{\frac{1-D}{D}} - 1 \quad (8)$$

式中:

M_A —流出 VFS 可允许的高于背景的污染物输移量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

如果 $C_B \ll C_O$, 式(7)可简化为:

$$X = \left[\frac{1000000 M_A W \frac{1}{1-D}}{(R-1)C_O} \right]^{\frac{D-1}{D}} - W \quad (9)$$

2.2 Phillips 时间模型与 Phillips 水文模型

针对在坡面漫流中不同污染物类型的除污机制差异, Phillips 时间模型与 Phillips 水文模型分别通过比较坡面漫流经过植被过滤带所需的时间以及产生的能量损失, 来衡量植被缓冲带除污效率, 从而计算污染物通过植被过滤带的拦截、吸收和转化达到一定除污效率所需要的宽度^[7-9]。

2.2.1 Phillips 时间模型

Phillips 时间模型是针对过滤带内溶解态污染物的除污机制, 通过坡面的坡度、土壤饱和导水率、土壤储水能力、坡面曼宁系数、污染物去除率与滞留时间的相关性建立的数学公式, 综合了过滤带对坡面漫流与地下径流中污染物质的吸收和转换两种作用的影响^[10]。

时间模型公式如下:

$$T_b/T_r = B_b/B_r = (n_b/n_r) (L_b/L_r)^2 (K_b/K_r)^{0.4} (S_b/S_r)^{-0.7} (C_b/C_r) \quad (10)$$

式中:

b —表示与规划植被过滤带相关的变量;

r —表示参考植被过滤带相关的变量;

T_b/T_r —表示坡面漫流与地下漫流中污染物在规划植被过滤带与参考植被过滤带的滞留时间之比;

B_b/B_r —表示规划植被过滤带与参考植被过滤带的除污效率之比;

n —曼宁系数;

L —植被过滤带宽度, m;

K —饱和导水率, $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$;

S —坡面坡度, %;

C —土壤储水能力, cm, 由在不透水层或者季节性地下水最高水位以上每一层土壤厚度乘以每层的储水能力得出^[9]。

在特定的除污效率条件下, 可以得出过滤带宽度计算式为:

$$L_b = L_r [(B_b/B_r)(n_r/n_b)^{0.6} (K_r/K_b)^{0.4} (S_r/S_b)^{-0.7} (C_r/C_b)^{0.5}] \quad (11)$$

2.2.2 Phillips 水文模型

Phillips 水文模型是针对移除过滤带内悬浮态污染物的除污机制, 通过坡面坡度、土壤饱和导水率、坡面曼宁系数、污染物去除率与能量损失的相关性建立的数学公式, 从坡面漫流水文过程中的能量损失角度来计算过滤带的除污效率^[10]。

水文模型公式如下:

$$P_b/P_r = B_b/B_r = (n_b/n_r)^{0.6} (L_b/L_r)^{0.4} (K_b/K_r) (S_b$$

$$(S_r)^{-1.3} \quad (12)$$

公式(12)中, P_b/P_r 表示带坡面漫流经过规划植被过滤带与参考植被过滤带的能量损失之比, 其他参数同式(10)。

在特定的除污效率条件下, 可以得出过滤带宽度计算式为:

$$L_b = L_r [(B_b/B_r)(n_r/n_b)^{0.6} (K_b/K_r)(S_r/S_b)^{-1.3}]^{2.5} \quad (13)$$

2.3 植被过滤带宽度计算

2.3.1 Overcash 方法计算

当土地利用情况一定时, 根据水文土壤类型(HSG)、前期降雨条件(ARC)及降雨深 R , 即可得出相应的 D 值。对设置 VFS 的目的是要减少一固定比例的浓度和输移量的情况, 因 K 仅取决于 D 、 P_C 或 P_M , 可通过图解法确定参数 K , 从而计算 VFS 的宽度。图 1(a) 为选取系列 P_C 值条件下由式(5) 计算得出; 图 1(b) 为选取系列 P_M 值条件下由式(6) 计算得出; 图 1(c) 为对特定的 K 和固定的 L 值, 由 $X = \frac{K}{1+K}$ 得出。

Overcash 方法提供了 4 种条件下计算 VFS 宽度的方法, 以下结合研究区坡面实际情况加以说明:

塘坝上游某汇水坡面的 HSG 等级为 C, ARC 等级为 II, 水力条件良好, $\text{NH}_4\text{-N}$ 的流入浓度 C_0 和背景浓度 C_B 分别为 $11.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 肥料施用区长 50 m, VFS 必须建在这一区域内; 分别要求为: ①减少径流中输出 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度到输入的 85%; ②减少径流中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度到 $7.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; ③减少 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的输移量到输入量的 85%; ④减少 $\text{NH}_4\text{-N}$ 输移量到 $0.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

(1) 减少输入 VFS 的污染物至入流浓度的一定比例。根据 HSG 与 ARC 等级, D 值确定为 0.85, P_C 要求达到 $1-85\%=15\%$, 通过图 1(a) 可得出相应的 K 值为 0.025。由于肥料施用区长度与 VFS 的长度之和为 50 m, 则由图 1(c) 可得 VFS 宽度 X 为 1.20 m;

(2) 控制流出 VFS 的污染物至一定的可允许浓度。根据条件 $D=0.85$, $C_0=11.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $C_B=0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,

$$C_X = 7.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}, P_C = 1 - \frac{C_X - C_B}{C_0 - C_B} = 30\%, \text{ 通过图 1(a)}$$

可得出相应的 K 值为 0.055, 则由图 1(c) 可得 VFS 宽度 X 为 2.60 m;

(3) 减小流出 VFS 的污染物到输入负荷量的一定比例。根据条件 $D=0.85$, P_M 要求达到 $1-85\%=15\%$, 通过图 1(b) 可得出相应的 K 值为 0.029, 则由图 1(c) 可得 VFS 宽度 X 为 1.41 m;

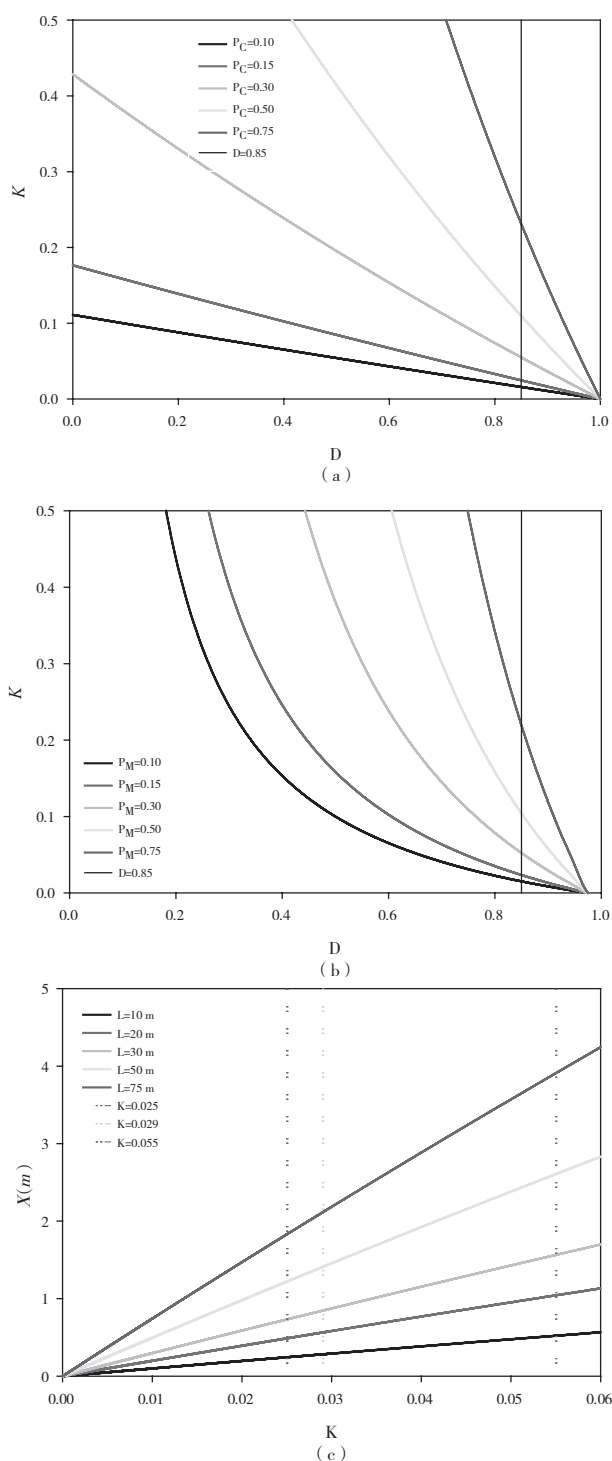


图1 Overcash 法工作曲线

(4) 控制 VFS 的污染物输移量。根据条件 $C_0 - C_B = 10.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $M_A = 0.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} = 0.0028$

$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 由于式(7)中 $W=L-X$, 其为隐性方程, 可通过迭代计算。第一次迭代, W 为 50 m, 得出 X_1 的值为 2.45 m, 第二次迭代, W 为 $50-2.45=47.55$ m, 得出 X_2 的值为 3.08 m, 依此类推, 经过 5 次迭代计算, X 的值不再变化, 得出 $X=2.95$ m。

2.3.2 Phillips 时间模型和 Phillips 水文模型计算

Phillips 时间模型与水文模型是通过比较规划坡面与参考坡面的坡面特征和土壤参数, 来计算植被缓冲带的宽度要求, 在没有实测参考坡面的污染物拦截率条件下, 可以考虑将其他研究中同种类型的试验坡面作为参考坡面, 从而对本研究过滤带的适宜宽度做一初步估计, 在此基础上做进一步的精确研究, 有针对性地选取特定宽度的参考坡面试验, 可以成为确定坡面植被过滤带宽度的较为简单高效的途径。

本研究选取苏天杨^[1]于山西岚县岚漪河开展的野外 4 种植被覆盖条件下的坡面放水冲刷试验作为参考, 计算过滤带所需的过滤带宽度。根据所选取的条件, 参考坡面在长度为 20 m、坡度为 3% 的长有冰草、高羊茅、披碱草、紫花苜蓿 4 种草皮缓冲带作用下, 全程总氮与总磷去除量平均为 65.0% 与 79.3%。根据参考坡面的拦截率条件, 对研究区 5% 的坡面, 在饱和导水率等参数一致的条件下, 当总氮的去除量达到输入的 15% 时, 采用 Phillips 时间模型与水文模型所得到的适宜宽度为 11.49 m 与 2.79 m; 当总磷的去除量达到输入的 15% 时, 采用 Phillips 时间模型与水文模型所得到的适宜宽度为 10.40 m 与 1.64 m。

3 植被过滤带宽度的试验验证

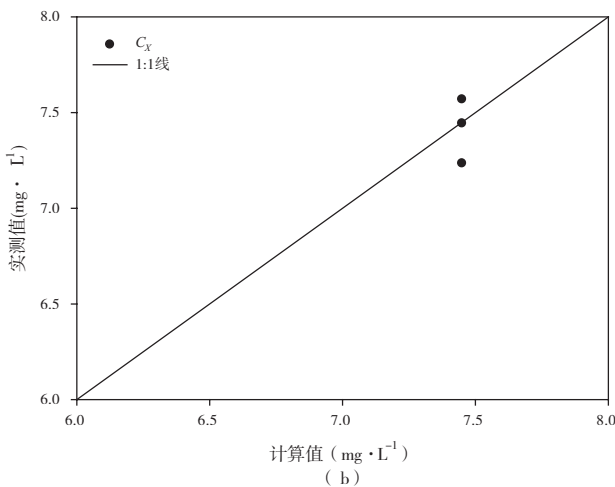
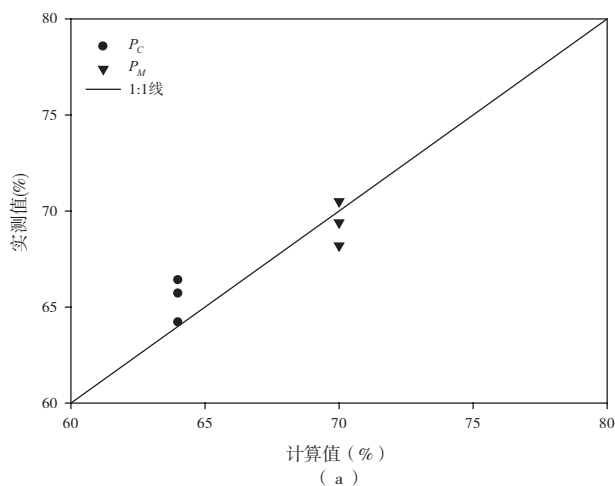
3.1 试验材料方法

对于总氮拦截率达到 15% 的要求, 通过 Overcash 方法计算 4 种条件下植被过滤带宽度分别为 1.20 m、2.60 m、1.41 m 和 2.95 m, 通过 Phillips 水文模型计算得到的宽度为 2.79 m, 2 种方法有较为接近的计算值。因此, 试验验证采用 3 m 宽的 VFS。在江宁区典型塘坝上游汇水地区选取 $50 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的草本植物种类相对单一且长势较为均匀的坡面, 在上游 47 m 范围内除去杂草及其他杂物, 保留下游 3 m 范围内的植被覆盖。在坡面顶端进行放水试验, 流量控制在 60 L/min, 在来水中添加浓度为 $11.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硝酸铵溶液, 在坡面

底端收集径流水样, 测定其中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度, 并计算相应的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 输移量。试验采用 3 次重复。

3.2 试验验证结果

按 Overcash 方法依次可计算得到 4 种试验条件下 P_C 、 C_X 、 P_M 与 M_A 理论值分别为 66.20%、 $7.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、70.42% 和 $0.276 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 按 Phillips 水文模型可以得到 B_b 理论值为 15.67%。试验得出的输出 VFS 的污染物与入流浓度之比 P_C 、流出 VFS 的污染物浓度 C_X 、流出 VFS 的污染物与输入负荷量之比、VFS 的污染物输移量 M_A 各 3 次重复的实测值, 与 4 种参数的计算值点绘在图(2)中, 结果表明, 实测值与计算值基本一致。说明在 50 m 长的汇水坡面上, 采用 3 m 宽的植被过滤带, 可以平均减少污染物浓度至入流浓度的 34.6%, 减少污染物输入负荷量的 30.6%, 控制流入浓度为 $11.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 至流出为 $7.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 减少污染物输移量 $0.274 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。试验的污染物拦截率在 30% ~ 35%, Phillips 水文模型可以得到 B_b 的理论值为 15.67%, 可能是由于所选取的参考



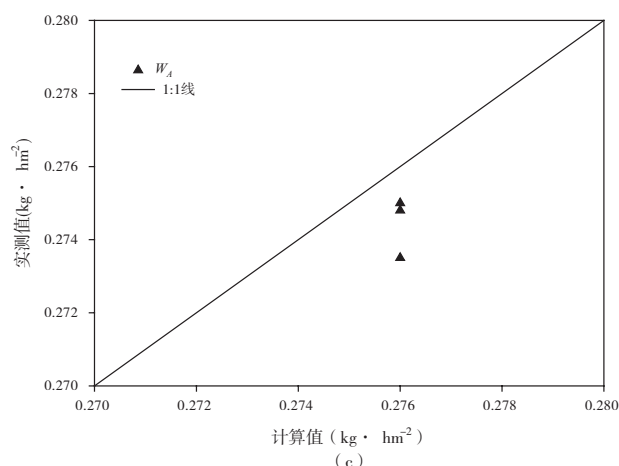


图2 4种参数实测值与计算值的关系

坡面的饱和导水率等土壤参数与研究区坡面有一定的区别, 但总体而言, 借助其他研究人员的实测结果作为参考坡面, 仍然可以作为进行初步估计的可供参考方法。

4 结论

(1) 采用 Overcash 方法计算 VFS 宽度, 当分别要求在总长度为 50 m 的坡面上, 输出 VFS 的污染物降至入流浓度或负荷量的 85% 时, 要求过滤带宽度分别达到 1.20 m 或 1.41 m; 当要求将流入浓度为 $11.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 降至流出浓度为 $7.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 或将污染物输移量减少至 $0.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 要求过滤带宽度分别达到 2.60 m 或 2.95 m。采用 Phillips 水文模型, 借助其他研究结果, 计算得出要求过滤带的宽度达到 2.79 m。

(2) 采用 VFS 宽度为 3 m 的过滤带进行野外试验, 实测值与计算值一致性较好, 平均减少污染物至入流浓度的 34.6%, 减少污染物输入负荷量的 30.6%, 控制流入浓度为 $11.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 至流出为 $7.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 减少污染物输移量 $0.274 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

参考文献:

- [1] Naiman R J, Dé camps H . The ecology of interfaces: Riparian zones[J]. Ann. Rev. Ecol. Syst., 1997, 28: 621-658.
- [2] 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 .
- [3] 李怀恩, 张亚平, 蔡明, 等 . 植被过滤带的定量计算方法 [J]. 生态学杂志, 2006, 25 (1): 108-112 .
- [4] Abu-zreig M, Rudra R P, Whiteley H R, et al. Phosphorus removal in vegetated filter strips[J] . Journal of Environmental Quality, 2003, 32 (2): 613-619 .
- [5] REED T, CARPENTER S R . Comparison of P-yield, Riparian butter strips and land cover in six agricultural watersheds[J] . Ecosystems, 2002, 5 (6): 568-577 .
- [6] D. R. Edwards, T. C. Daniel, Jr. P. A. Moore. Vegetative Filter Strip Design for Grassed Areas Treated with Animal Manures[J] . Applied Engineering in Agriculture, 1996, 12 (1): 31-38 .
- [7] Phillips J D. An evaluation of the factors determining the effectiveness of Water quality buffer zones[J] . Journal of Hydrology, 1989, 107: 133-145 .
- [8] Phillips J D. Evaluation of North Carolina's estuarine shoreline area of environment concern from a water quality perspective[J] . Coastal Management, 1989, 17 (2): 103-117 .
- [9] Xiang W.-N. Application of a GIS-based stream buffer generation model to environmental policy evaluation[J] . Environmental Management. 1993, 17 (6): 817-827 .
- [10] 侯利萍, 何萍, 钱金平, 等 . 河岸缓冲带宽度确定方法研究综述 [J] . 湿地科学, 2012, 10 (04): 500-506 .
- [11] 苏天杨, 李林英, 姚延涛 . 不同草本缓冲带对径流污染物滞留效益及其最佳宽度研究 [J] . 天津农业科学, 2010, 16 (03): 121-124 .

(责任编辑: 王宏伟)