

# 不同覆盖度下坡面流植被阻力特性研究

杨帆<sup>1</sup> 张宽地<sup>1,2</sup> 杨婕<sup>1</sup> 杨明义<sup>2</sup> 马小玲<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 为深入研究植被覆盖下坡面流阻力规律,以植被覆盖下明渠水流植被阻力公式为基础,通过5个覆盖度、6个坡度和7个流量组合条件下的室内放水试验,结合理论分析,建立适应于坡面流的植被阻力模型。结果表明,植被阻力随等效覆盖度和等效水力半径的增加而增大,等效覆盖度对植被阻力的贡献率(0.106)小于明渠水流(0.167),而等效水力半径(0.5)和拖曳力系数(0.5)的贡献率与明渠水流(均为0.48)基本一致。植被阻力模型的 $N_{se}$ 值高达0.84,为坡面流植被阻力计算奠定了一定的理论基础,可促进明渠水力学理论在坡面水流方面的扩展。

**关键词:** 坡面流; 明渠水力学; 植被覆盖度; 植被阻力

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)11-0157-06

## Characteristics of Vegetation Resistance in Overland Flow under Different Coverages

Yang Fan<sup>1</sup> Zhang Kuandi<sup>1,2</sup> Yang Jie<sup>1</sup> Yang Mingyi<sup>2</sup> Ma Xiaoling<sup>1</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** For further researching the laws of flow resistance, based on the vegetation resistance model under open channel flow, vegetation resistance models were established under six slopes ( $2^\circ \sim 12^\circ$ ), seven flow discharges (3.65 L/min, 4.92 L/min, 8.13 L/min, 11.78 L/min, 15.47 L/min, 19.12 L/min and 27.26 L/min) and five vegetation coverage degrees (9.300%, 6.975%, 4.650%, 2.325% and 0) by combined experiment with theory which was adapted to overland flow. Equivalent coverage and equivalent hydraulic radius were defined in the model based on the definition of vegetation coverage and the hydraulic radius in the open channel flow. The results showed that when the other hydraulic conditions were identical, vegetation resistance was increased with the increase of equivalent coverage and equivalent hydraulic radius, the contribution rate of equivalent coverage (0.106) was less than that (0.167) of the open channel flow; however, the contribution rates of equivalent hydraulic radius (0.5) and the drag force coefficient (0.5) were approximately identical with those of the open channel flow (both of values were 0.48), the  $N_{se}$  value of the model was 0.84. This article distinguished vegetation resistance and comprehensive vegetation resistance, which may provide the theoretical basis for calculation of vegetation resistance of overland flow, so as to promote the expansion hydraulics theory of the open channel in the aspect of overland flow.

**Key words:** overland flow; open channel hydraulics; vegetation coverage; vegetation resistance

收稿日期: 2016-07-07 修回日期: 2016-08-27

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51579214)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(Z109021564)、黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室主任基金项目(A314021402-1619)和流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放基金项目(IWHR-SKL-2014)

**作者简介:** 杨帆(1991—),女,博士生,主要从事水土保持及植被水流研究,E-mail: yangfan199126@163.com

**通信作者:** 张宽地(1978—),男,副教授,主要从事水工水力学及坡面水流研究,E-mail: zhangkuandi428@126.com

## 引言

研究植被作用下坡面流阻力规律对于阐明植被滞水调沙机理和合理选择水土流失的调控措施具有重要的意义<sup>[1]</sup>。粗糙床面水流阻力主要由颗粒阻力和形态阻力组成<sup>[2]</sup>,植被阻力属于形态阻力的范畴。目前植被覆盖下坡面水流阻力的研究多集中于综合阻力的变化特征<sup>[3-8]</sup>,而未将坡面颗粒阻力和植被阻力对坡面流阻力的贡献区分研究,二者本质区别在于与水流的交互形式,颗粒阻力主要是由床面摩擦产生,水流失稳主要是横轴失稳;而植被阻力主要是竖轴漩涡造成。关于植被的阻力计算模型多集中在明渠水流研究方面,如 NOARAYANAN 等<sup>[9]</sup>对非植物淹没情况下的曼宁系数进行研究;顾峰峰等<sup>[10]</sup>建立了植物淹没和非淹没情况下的糙率系数理论计算模型,并进行了验证;唐洪武等<sup>[11]</sup>提出植物附加阻力的计算方法;而对植被覆盖下的坡面流而言,目前研究多集中于回归理论的经验模型<sup>[7-8]</sup>,而具有一定理论基础的计算模型较少,且仅研究植被覆盖下坡面综合阻力特性。因此,研究结果很难统一,甚至相差较大<sup>[12]</sup>。本文借鉴明渠水流理论,基于颗粒阻力和植被阻力对坡面流的双重作用,研究植被要素对水流阻力的贡献,建立适用于坡面水流的植被阻力公式,以阐明植被阻力在坡面流与明渠水流下的诸多差异,从而促进明渠水力学理论在坡面流方面的扩展。

## 1 理论分析

目前对于植被覆盖下坡面流阻力的计算仍采用传统的明渠均匀流公式,且研究多集中于综合阻力,故借助明渠流中研究植被阻力的推理方式,以 WU 等<sup>[13]</sup>非淹没工况下刚性植被阻力公式为基础,结合坡面流特殊特征,推导坡面植被阻力的计算模型。植被作用下综合阻力为

$$F = F_b + F_D \quad (1)$$

$$(1 - C_v)\tau = (1 - C_v)\tau_b + N_a F_d \quad (2)$$

式中  $F$ ——坡面综合阻力

$F_b$ ——床面阻力

$F_D$ ——植被阻力

$\tau$ ——床面综合剪切力

$\tau_b$ ——床面剪切力

$F_d$ ——单株植被拖曳力

$C_v$ ——植被体积浓度,代表单位水深单位面积植被所占据的体积

$1 - C_v$ ——被水流占据的床面部分

$N_a$ ——单位面积植被总数

本研究主要集中于植被处于非淹没情况下, $C_v$ 转换为植被覆盖度  $C_r$ ,即

$$C_v = N_a \pi D^2 \min(h, h_v) / (4h) = N_a \pi D^2 / 4 = C_r \quad (3)$$

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A_v u^2 \quad (4)$$

$$\tau = \frac{\rho g n^2 u^2}{R^{\frac{1}{3}}} \quad (5)$$

$$\tau_b = \frac{\rho g n_b^2 u^2}{R^{\frac{1}{3}}} \quad (6)$$

$$N_a A_v = 4 C_v h / (\pi D) \quad (7)$$

式中  $C_d$ ——拖曳力系数

$\rho$ ——水流密度, kg/m<sup>3</sup>

$u$ ——平均流速, m/s

$D$ ——单株植被直径, m

$n$ ——综合曼宁系数

$n_b$ ——床面糙率曼宁系数

$n_v$ ——植被曼宁系数

$h$ ——平均水深

$h_v$ ——植被高度

$A_v$ ——植被垂直水流方向投影面积

$R$ ——水力半径

将式(3)~(7)代入式(1)中,得

$$n^2 - n_b^2 = \frac{2 C_v C_d h R^{\frac{1}{3}}}{g(1 - C_v) \pi D} \quad (8)$$

综合曼宁系数与植被曼宁系数、床面糙率曼宁系数的关系为<sup>[11]</sup>

$$n^2 = n_b^2 + n_v^2 \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)并变形,则植被曼宁系数表达式为

$$n_v = \sqrt{n^2 - n_b^2} = \sqrt{\frac{2 C_v C_d h R^{\frac{1}{3}}}{g(1 - C_v) \pi D}} \quad (10)$$

$$R = \frac{h b_e}{2h + b_e} \quad (11)$$

其中  $b_e = b / (1 - C_r)$

式中  $b_e$ ——有效过流宽度, m

$b$ ——水槽宽度, 本试验取 0.3 m

将式(10)进一步变形可得

$$n_v = \left[ \frac{2 C_d C_v}{\pi g (1 - C_v) D} \right]^{0.5} \left[ \frac{h^4 b (1 - C_v)}{2h + b (1 - C_v)} \right]^{1/6} \quad (12)$$

$$n_v = \left( \frac{2 C_d}{\pi g} \right)^{0.5} \left[ \frac{C_v}{(1 - C_v) D} \right]^{0.5} \left[ \frac{h^4 b (1 - C_v)}{2h + b (1 - C_v)} \right]^{1/6} \quad (13)$$

KLAASSEN 等<sup>[14]</sup>和 JARVELA<sup>[15]</sup>认为  $C_d$ 一般

取 1.5,但坡面水流中垂线流速分布与明渠水流中垂线流速分布是否一致需进一步研究,本研究将  $C_d$  作为未知常数。植被阻力主要由拖曳力  $A = \frac{2C_d}{\pi g}$ 、等效覆盖度  $C_m = \frac{C_v}{(1-C_v)D}$  和等效水力半径  $R_s = \frac{h^4 b(1-C_v)}{2h+b(1-C_v)}$  决定,建立植被曼宁阻力系数模型

$$n_v = A^{\frac{1}{2}} C_m^{\frac{1}{2}} R_s^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

由于坡面与明渠水流的流动特性有差异,现将式(14)中的指数视为未知数,改为

$$n_v = A^x C_m^y R_s^z \quad (15)$$

由已建模型可知,植被阻力与坡面流的拖曳力、等效覆盖度、等效水力半径有关,但坡面流中各自的贡献率未知,因此进行试验研究,对式(15)进行拟合,并通过 Nash-Sutcliffe 系数( $N_{SE}$ )对阻力系数计算模型的模拟效果进行检验。其计算式为

$$N_{SE} = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^k (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^k (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (16)$$

式中  $P_i$ ——模拟值  
 $O_i$ ——实测值  
 $\bar{O}$ ——实测值的平均值  
 $k$ ——样本个数

## 2 试验

(1)采用桐树的棕衣模拟刚性植被特性,模拟植被平均高度为 22 mm,植被体积浓度分别为 9.300%、6.975%、4.650%、2.325%、0;每株植被直径约 6 mm,考虑到黄土高原临界侵蚀雨强,流量取 3.65、4.92、8.13、11.78、15.47、19.12、27.26 L/min,通过调节阀门组、控制水流量,采用称量法对流量进行测量,每组流量测量 3 次,此流量范围内,植被处于非淹没状态。

(2)为避免床面形态等边界条件变化对试验结果的扰动,采用定床阻力模拟放水试验(图 1)。定床阻力试验条件下,仅在水流绕过植被时,水力要素发生改变,可以更加明晰地研究植被的阻水规律。试验设备由供水装置、稳流装置、试验水槽、回水装置 4 部分组成。水槽由有机玻璃板制成,结构尺寸:长 6.0 m、宽 0.3 m、深 0.25 m,通过滑轮装置制动系统控制水槽坡度,试验坡度取 2°、4°、6°、8°、10°、12°。

(3)根据测量断面与上游水槽溢流断面距离,沿水槽设纵向观测断面 6 个,分别为(0+0.5) m、(0+1.5) m、(0+2.5) m、(0+3.5) m、(0+4.5) m、

(0+5.5) m。在每个断面横向设 3 个测点,每个测点重复测量 2 次,流量稳定后,观测断面表面优势流速(KMnO<sub>4</sub> 染色示踪法测流速,从观测断面上游 0.5 m 处滴下溶液,同时按下秒表,待溶液到达断面下游 0.5 m 处时停止计时,即为 1 m 所用时间)和水深(水深均采用重庆水文仪器厂生产的 SX402 型数显测针仪测定,精度为 0.1 mm,先读取测针在底板处的数值,然后读取测针位于水面处的数值,二者取差值),横向测点位置选在两簇植被之间,每组试验持续时间为 30 min。

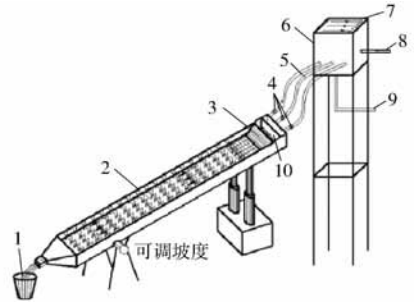


图 1 试验水槽布置图

Fig. 1 Arrangement of experimental flume

1. 径流收集装置 2. 有机玻璃试验水槽 3. 驼峰堰平水设施
4. 截止阀 5. 出水管 6. 顶水头供水设备 7. 溢流板 8. 溢流管
9. 给水管 10. 调流板

## 3 结果与分析

根据已建植被阻力模型,植被阻力主要与等效覆盖度、等效水力半径、拖曳力有关,以往研究中也表明坡面流中阻力与盖度<sup>[16]</sup>、水深<sup>[17]</sup>密切相关,故本文对植被阻力与这三者关系进行分析,以期获得适应于坡面流的植被阻力模型。

### 3.1 植被覆盖度对植被阻力的影响

坡面流中一般研究植被覆盖下坡面综合阻力与覆盖度的关系,普遍认为阻力系数随覆盖度的增加而增大<sup>[18-19]</sup>,而未定量研究植被覆盖度对植被阻力的影响。等效覆盖度、覆盖度与植被直径有关,若植被直径不变,则等效覆盖度为覆盖度的另一种表达方式,与覆盖度变化趋势一致,分别为 0.39、0.78、1.17、1.56。分析植被等效覆盖度对植被阻力的影响,以准确研究去除坡面颗粒阻力影响后的植被覆盖度对水流阻力的贡献率(为使得数据关系更加明晰且结果均为正值,将数据取对数,并适当增大数据倍数)。

由图 2 可知,随植被等效覆盖度(0.39~1.56)的增加,植被阻力逐渐增加,由 0.045 增至 0.117,变化趋势基本一致,与坡度无关。究其原因,阻力损失主要取决于植被在水流垂直方向的投影面积以及分布密度,当等效覆盖度较小时,相同水流条件下,

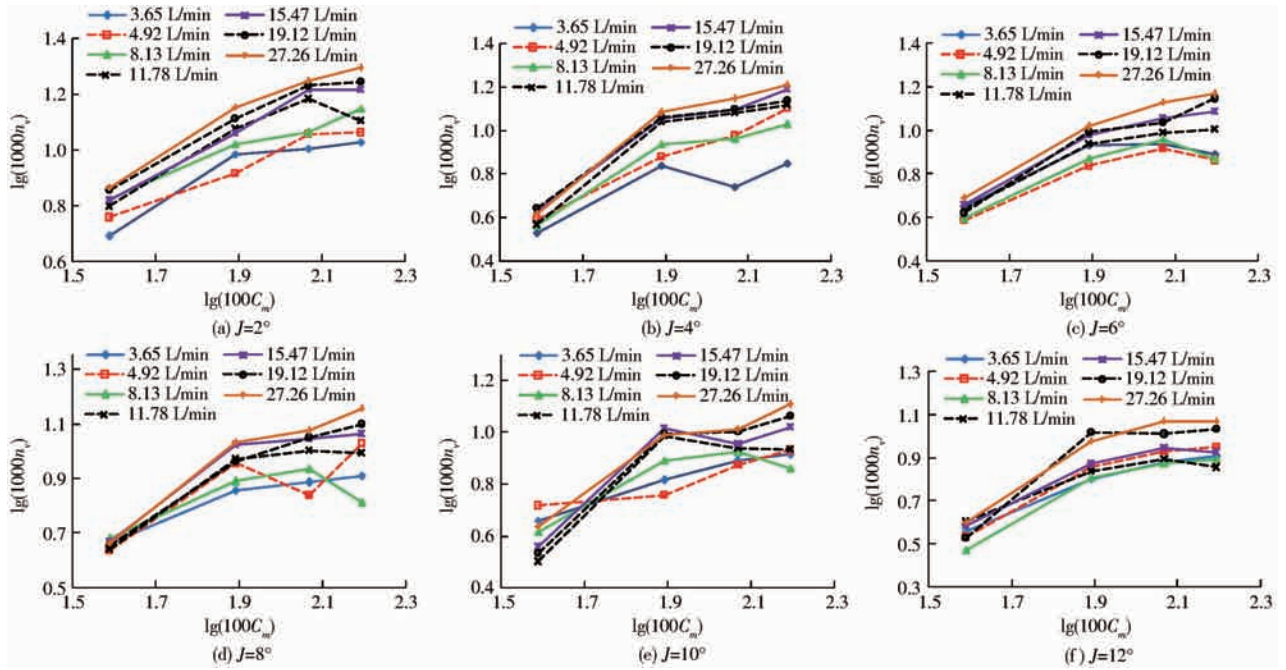


图2 不同坡度下等效覆盖度对植被阻力的影响

Fig. 2 Effect of equivalent coverage on vegetation resistance under different slopes

植被在水流垂直方向的投影面积较小, 植被阻水能力相对较弱, 随着植被覆盖度的增加, 植被的阻水面积增大, 致使水流与植被的接触碰撞几率增加, 植被阻水能力增强, 且等效覆盖度较小时, 每一株植被均是独立阻力单元, 独立发挥对水流的阻碍作用, 等效覆盖度增加后, 水流在植被的背水区因离散而产生的尾迹会互相干扰, 使得植被阻力进一步增大。

### 3.2 等效水力半径对植被阻力的影响

水深是影响植被阻力的重要因素之一, MUSLEH 等<sup>[20]</sup>和 FATHI-MAGHADAM 等<sup>[21]</sup>认为非

淹没情况下, 综合曼宁系数与水深成正比, GU 等<sup>[22]</sup>也认为非淹没情况下, 植被阻力随水深的增加而增大, 而王俊杰等<sup>[16]</sup>认为阻力系数与水深之间的关系和覆盖度的变化密切相关, 但未涉及水深项与植被阻力的关系, 从已建模型中可知, 植被阻力与等效水力半径密切相关, 等效水力半径即水力半径与水深 3 次方的乘积, 故分析等效水力半径与植被阻力的关系, 对模型中二者关系进行验证。等效水力半径反映了水流和植被的接触程度, 比水深更直观地反映床面植被形态对植被阻力的影响。如图 3 所示,

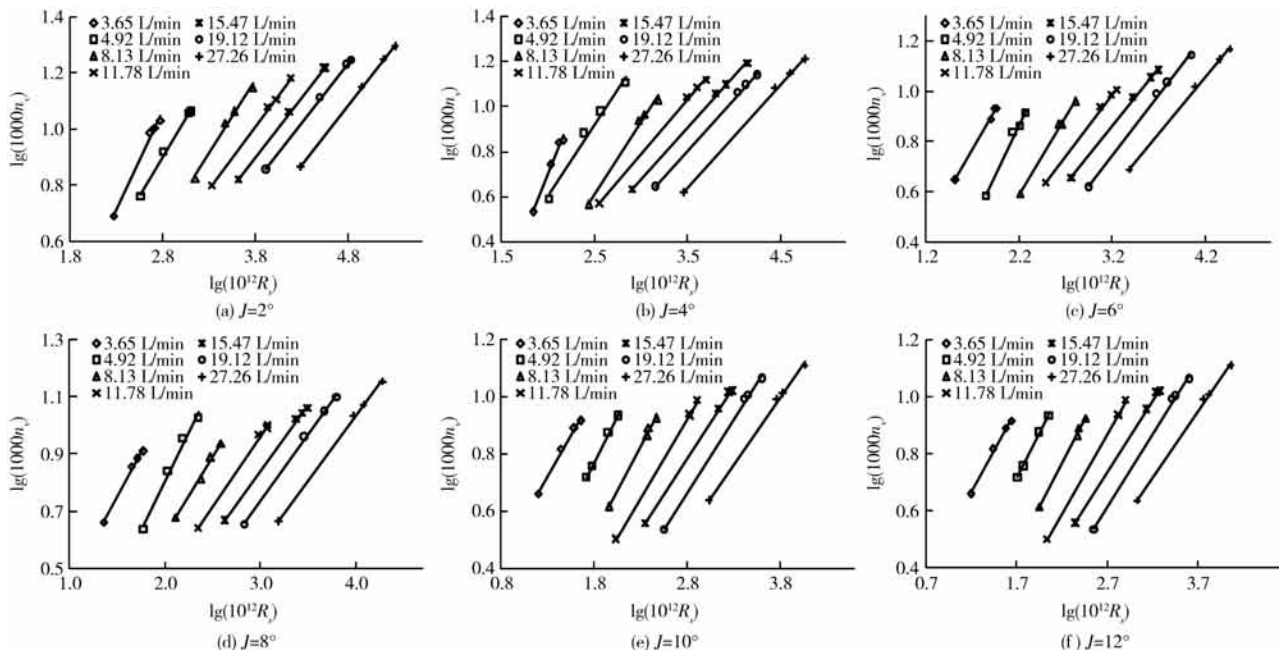


图3 不同坡度下等效水力半径对植被阻力的影响

Fig. 3 Effect of equivalent hydraulic radius on vegetation resistance under different slopes

不同坡度下,植被阻力随等效水力半径的增加呈线性增大,拟合度在 0.92 以上;不同流量下,斜率基本一致,均在 0.5 左右,随流量的增加,等效水力半径范围增大,植被阻力均值也略有增加,说明流量对等效水力半径与植被阻力的关系影响很小,仅对二者取值范围有影响。等效水力半径与水深呈正相关关系,随等效水力半径的增加,坡面水流与植被的接触面积增加,粘滞阻力增大,植被阻力增大,植被阻水能力增强,而水流克服植被阻力的能量损失越大,对坡面侵蚀程度越小。

### 3.3 模型的建立

综上所述,坡面植被阻力与等效覆盖度、等效水力半径密切相关,将试验数据与已建模型进行拟合得

$$n_v = 0.09^{0.48} C_m^{0.48} R_s^{0.106} \quad (R^2 = 0.86) \quad (17)$$

$$n_v = 0.32 \left[ \frac{C_v}{(1 - C_v)D} \right]^{0.48} \left[ \frac{h^4 b(1 - C_v)}{2h + b(1 - C_v)} \right]^{0.106} \quad (18)$$

由此可知, $C_m$ 项系数与式(14)推导基本一致,而 $R_s$ 项系数比式(14)小 0.6,本文模型是基于明渠水流植被阻力公式推导,明渠水流与坡面水流宽深比存在差异,故密度项与式(14)推导一致,而等效水力半径项与式(14)有差异。根据公式常数项得

到 $C_d$ 拖曳力系数为 1.41,接近于明渠水流中拖曳力系数 1.5,仅差 0.05%。对公式进行进一步整理,则有

$$n_v = 0.32 \left( \frac{C_v}{D} \right)^{0.48} \left( \frac{1}{1 - C_v} \right)^{0.389} \left[ \frac{h^4 b}{2h + b(1 - C_v)} \right]^{0.106} \quad (19)$$

通过 Nash - Sutcliffe 系数来检验阻力系数计算模型的模拟效果, $N_{SE}$ 值越接近 1,说明模型模拟效果越好,经计算, $N_{SE}$ 值为 0.84,因此式(19)可以较好地模拟计算植被覆盖下坡面流植被曼宁阻力系数。

## 4 结论

(1) 植被阻力随等效覆盖度和等效水力半径的增加而增大,这与植被与水流的接触面积及水流在植被背水区因离散而产生尾迹被后排植被的干扰程度有关。

(2) 建立了适应于坡面植被阻力的模型,该模型 $N_{SE}$ 值高达 0.84,模型中,等效覆盖度的贡献率小于明渠水流中拟合的系数,而等效水力半径的贡献率和拖曳力系数与明渠水流中基本一致,故本模型对坡面流植被阻力计算具有一定的借鉴意义。

## 参 考 文 献

- 蒋昌波, 隆院男, 胡世雄, 等. 坡面流阻力研究进展[J]. 水利学报, 2012, 43(2): 189 - 197.  
JIANG Changbo, LONG Yuannan, HU Shixiong, et al. Research progress on the overland flow resistance [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(2): 189 - 197. (in Chinese)
- 赵春红, 高建恩, 王飞, 等. 阻力形式对坡面流流速修正系数的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 130 - 135, 46.  
ZHAO Chunhong, GAO Jian'en, WANG Fei, et al. Effects of resistance forms on velocity correction factor of overland flow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 130 - 135, 46. (in Chinese)
- 李勉, 姚文艺, 陈江南, 等. 草被覆盖下坡面-沟坡系统坡面流阻力变化特征试验研究[J]. 水利学报, 2007, 38(1): 112 - 119.  
LI Mian, YAO Wenyi, CHEN Jiangnan, et al. Experimental study on runoff resistance of hilly slope-gullied surface with grass coverage[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(1): 112 - 119. (in Chinese)
- 张宽地, 王光谦, 孙晓敏, 等. 坡面薄层水流水动力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 182 - 189.  
ZHANG Kuandi, WANG Guangqian, SUN Xiaomin, et al. Experiment on hydraulic characteristics of shallow open channel flow on slope[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(15): 182 - 189. (in Chinese)
- 杨坪坪, 张会兰, 王玉杰, 等. 刚性植被空间配置模式对坡面流水动力学特性的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 90 - 95.  
YANG Pingping, ZHANG Huilan, WANG Yujie, et al. Different patterns of rigid vegetation effects on dynamic characteristics of overland flow[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1): 90 - 95. (in Chinese)
- 孙佳美, 余新晓, 樊登星, 等. 模拟降雨下植被覆盖度对坡面流水动力学特性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(8): 2574 - 2580.  
SUN Jiamei, YU Xinxiao, FAN Dengxing, et al. Impact of vegetation cover on surface runoff hydraulic characteristics with simulated rainfall[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2574 - 2580. (in Chinese)
- 肖培青, 姚文艺, 李莉, 等. 植被影响下坡面流阻力变化特征研究[J]. 泥沙研究, 2013(3): 1 - 5.  
XIAO Peiqing, YAO Wenyi, LI Li, et al. Experimental study of overland flow resistance of different vegetation covers[J]. Journal of Sediment Research, 2013(3): 1 - 5. (in Chinese)
- 曹颖, 张光辉, 唐科明, 等. 地表模拟覆盖率对坡面流阻力的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 86 - 89.  
CAO Ying, ZHANG Guanghui, TANG Keming, et al. The study of resistance on overland flow under simulation coverage[J].

- Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4): 86 – 89. (in Chinese)
- 9 NOARAYANAN L, MURALI K, SUNDAR V. Manning's 'n' co-efficient for flexible emergent vegetation in tandem configuration [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2012, 6(1): 51 – 62.
- 10 顾峰峰, 倪汉根, 戚定满. 高棵水生植物的阻力系数在非淹没与淹没条件下的相互换算[J]. 水科学进展, 2007, 18(6): 823 – 828.  
GU Fengfeng, NI Han'gen, QI Dingman. Transition of long-stalk vegetation resistance coefficient between unsubmerged condition and submerged condition[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(6): 823 – 828. (in Chinese)
- 11 唐洪武, 闫静, 肖洋, 等. 含植物河道曼宁阻力系数的研究[J]. 水利学报, 2007, 38(11): 1347 – 1353.  
TANG Hongwu, YAN Jing, XIAO Yang, et al. Manning's roughness coefficient of vegetated channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(11): 1347 – 1353. (in Chinese)
- 12 梁博, 张升堂, 宋词, 等. 坡面流阻力研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(5): 55 – 59, 64.  
LIANG Bo, ZHANG Shengtang, SONG Ci, et al. Progress on resistance study of overland flow[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(5): 55 – 59, 64. (in Chinese)
- 13 WU Weiming, HE Zhiguo. Effects of vegetation on flow conveyance and sediment transport capacity[J]. International Journal of Sediment Research, 2009, 24(3): 247 – 259.
- 14 KLAASSEN G J, ZWAARD J J. Roughness coefficients of vegetated flood plains[J]. Journal of Hydraulic Research, 1974, 12(1): 43 – 63.
- 15 JARVELA J. Determination of flow resistance caused by non-submerged woody vegetation[J]. International Journal of River Basin Management, 2004, 2(1): 61 – 70.
- 16 王俊杰, 张宽地, 龚家国, 等. 不同覆盖度条件坡面水流阻力规律[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 1 – 6.  
WANG Junjie, ZHANG Kuandi, GONG Jianguo, et al. Overland flow resistance law under different vegetation coverage [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(5): 1 – 6. (in Chinese)
- 17 WU F C, SHEN H W, CHOU Y J. Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation[J]. ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(9): 934 – 942.
- 18 戴矜君, 程金花, 张洪江, 等. 植被覆盖下坡面流阻力变化规律[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 44 – 49.  
DAI Yinjun, CHENG Jinhua, ZHANG Hongjiang, et al. The changing law of overland flow resistance under vegetation covers [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(2): 44 – 49. (in Chinese)
- 19 杨坪坪, 张会兰, 王云琦, 等. 植被覆盖度与空间格局对坡面流水动力学特性的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 26 – 33.  
YANG Pingping, ZHANG Huilan, WANG Yunqi, et al. Effect of vegetation coverage and spatial distribution pattern on hydrodynamic characteristics of overland flow[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(2): 26 – 33. (in Chinese)
- 20 MUSLEH F A, CRUISE J F. Functional relationships of resistance in wide flood plains with rigid unsubmerged vegetation[J]. ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(2): 163 – 171.
- 21 FATHI-MAGHADAM M, KOUWEN N. Nonrigid, nonsubmerged, vegetation roughness on flood plains [J]. ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(1): 51 – 57.
- 22 GU Fengfeng, NI Han'gen, QI Dingman. Roughness coefficient for unsubmerged or submerged reed [J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 19(4): 421 – 428.