

确定坡面径流过程曼宁糙率系数的实验方法研究

程娅姗^{1,2}, 王中根^{1*}, 李 军³, 黄 振^{1,2}, 叶翔宇^{1,2}, 唐 寅¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要:曼宁糙率系数是用水动力学方法进行流速计算的关键参数。坡面流曼宁糙率系数与明渠流的不同。为确定坡面径流过程的曼宁糙率系数, 自行研发了一种包括供水系统、实验水槽和数据观测记录系统的室内可变糙率坡面实验系统。通过87场预实验验证了供水系统的稳定性和准确性。以坡度、实测流量、实测水深、不同糙率板上河砂的平均直径和地表粗糙度为自变量, 以曼宁糙率系数为因变量, 选用均方根误差(RMSE)和决定系数(R^2)为评价指标, 对166种实验场景进行了支持向量机(Support Vector Machines, SVM)训练与预测, 发现:①紊流的训练结果难以预测层流和过渡流的曼宁糙率系数, 说明流态不同时, 实验因素对水流的影响机制不同;②若要较为准确地预测曼宁糙率系数, 至少需要包括实测水深在内的3种因素;③当同时考虑4种及更多种因素时, 紊流状态下均可对曼宁糙率系数进行较为准确的预测。

关键词:曼宁糙率系数; 坡面实验; 支持向量机

曼宁公式是目前使用最为广泛的计算平均流速的经验公式之一^[1-3], 可以同时用于坡面汇流^[4]和河道汇流的流速计算。曼宁糙率系数是用水动力学方法进行流速计算的关键参数, 反映水流的阻力条件, 受地表粗糙度^[5-8]、河床粗糙度^[9]、坡度^[10]、过水断面流量^[11]、水深^[12]等多种因素影响^[13-16], 其变化规律一直是研究的热点^[17-19]。但是, 目前仍没有公认的统一结论。如Chow^[20]认为曼宁糙率系数会随水深增大而减小, 而Etelz的实验却说明曼宁糙率系数有随水深增加而增大的趋势^[14]。

本文主要研究曼宁公式在坡面流流速计算中的应用。目前坡面流的研究方法多由明渠流的相关方法延伸, 且已有研究表明, 坡面流虽然和明渠流一样可以用层流、过渡流和紊流来表达其流态^[21], 但其存在混合状态^[22], 流态更为复杂^[23-24]。对于天

然的明渠流, 一般水深较大, 河床粗糙度和岸壁形状及粗糙度对曼宁糙率系数影响较大; 而对于坡面流, 水深一般较浅, 有时仅有几毫米深, 植被、土壤、地表粗糙度等因素对水流阻力更加明显^[25-26]。因此进行坡面流流速计算时无法直接沿用已有的明渠流曼宁糙率系数。不同条件下的坡面流曼宁糙率系数常通过坡面实验^[27]来获取^[28-29]。由于曼宁糙率系数是一个综合阻力系数, 因此在进行实验时无法直接进行设计, 一般通过设计坡面的坡度、地表粗糙度等条件的不同组合来反映下垫面情况, 然后探究各实验设计因素与曼宁糙率系数的关系。坡面实验可分为室内实验和室外实验^[30-31]2类, 由于室内实验具有对各水文要素控制性强、可重复性强、实验周期较短且成本较低的优点, 大部分学者选择在室内进行人工降雨径流实验来研究坡面汇流^[32-34]。

收稿日期: 2019-11-04; 修订日期: 2020-02-22。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400902); 国家自然科学基金项目(41971039); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA19030204)。[Foundation: National Key Research and Development Program of China, No. 2016YFC0400902; National Natural Science Foundation of China, No. 41971039; The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No. XDA19030204.]

第一作者简介: 程娅姗(1993—), 女, 河南驻马店人, 博士生, 研究方向为水循环模拟。E-mail: chengyashan77@163.com

*通信作者简介: 王中根(1973—), 男, 河南信阳人, 研究员, 博士, 研究方向为水循环模拟和水资源管理。

E-mail: wangzg@igsrr.ac.cn

引用格式: 程娅姗, 王中根, 李军, 等. 确定坡面径流过程曼宁糙率系数的实验方法研究 [J]. 地理科学进展, 2020, 39(4): 651-659. [Cheng Yashan, Wang Zhonggen, Li Jun, et al. Experimental study on determining Manning roughness coefficient during slope runoff process. Progress in Geography, 2020, 39(4): 651-659.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.04.012

目前的坡面实验多数通过在坡面上放置草皮、鱼鳞坑、土壤等来模拟下垫面情况^[35-36]。但草皮和土壤的表面粗糙度很难获得,而鱼鳞坑一旦设定,会在鱼鳞坑周围产生较强的紊流甚至小型的短暂回流,增加实验的误差。因此本文从科学实际需要出发,设计了一款新型室内可变糙率坡面实验系统,通过放置不同的糙率板来模拟不同的地表粗糙度,通过设定不同的实验场景确定坡面径流过程的曼宁糙率系数。实验系统操作简单,精确度高,可为坡面汇流过程机理的研究提供技术支撑。

1 实验设计

1.1 实验系统设计

实验设备从右至左主要有:供水系统、实验水槽和数据观测收集系统(图1)。整个系统由支架支撑。

(1) 供水系统

供水系统包括水泵、PVC供水管、变频器、电子流量计。变频器和电子流量计前后放置于水泵与水槽之间的PVC供水管中,调节变频器数据,读取电子流量计数据即可知水泵当下的抽水流量,电子流量计读数精确至 $0.01 \text{ m}^3/\text{h}$ 。结合实验水槽的尺寸及实际情况(不下渗),设计供水流量为1、5、10、15、20、25 m^3/h 。为保证供水稳定,每次实验观测都在电子流量计数值达到流量设计值且稳定5 min后进行。

(2) 实验水槽

实验水槽为中空无盖矩形,由有机玻璃板制成,尺寸为 $3 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高),边壁光滑,细节图如图2,从进水口到出水口,可以分为稳流前池区(距离进水口约20 cm)、消能区、闸门1、闸门2四部分,其中,闸门1和闸门2之间的区域为实验区。进水口为一直径为63 mm的圆形入口。为

消除部分水流动能,在进水口与稳流前池间加入挡板,挡板尺寸为 $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$,挡板上布设有均匀的孔径为10 mm的出水口,水流经小出水口分散后,消除部分动能,进入消能区。消能区由2块挡板和粗孔海绵组成,粗孔海绵放置于2块挡板之间,用以进一步消除水流动能,使其平稳地进入实验区。其中,近稳流前池端的挡板尺寸为 $0.5 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$,均匀布设有直径为0.03 m的小孔,近闸门1端的挡板尺寸也为 $0.5 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$,均匀布设有直径为0.01 m的小孔。消能区的作用是对水流完全消能,使水流平稳的进入实验区。闸门1、闸门2边缘有橡胶包裹。闸门1与消能区之间的实验水槽底部留有一个直径为30 mm的泄水口1。实验区近闸门2的地方留有一个直径为30 mm的泄水口2。2个泄水口都用橡胶塞堵住,且下方放置接水桶。

实验水槽内可以铺设糙率板以模拟自然的坡面状况。糙率板为可更换的、沾有一层均匀河砂的活动薄板,与实验水槽并非一体。其尺寸与实验水槽内部完全吻合,可以完全嵌入实验水槽,为避免糙率板和实验水槽的接缝之间漏水,将糙率板放置进水槽后使用玻璃胶对接缝进行进一步密封。出水口设有卡扣,更换糙率板时,掀开卡扣,用壁纸刀划开接缝处的玻璃胶即可轻松取下糙率板进行更换。进行坡面状况设计时,主要设计的是地表粗糙度和坡度。通过布设沾有不同尺寸河砂的糙率板来模拟不同的地表粗糙度,选择的河砂粒径 d 分别为1~2、2~4、4~6、8~10、12~15 mm。结合实验水槽的尺寸及实验目的,实验坡度选择 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 五种。

(3) 数据观测记录系统

实验数据观测记录由人工观测和电脑实时传输共同完成。其中,实验水槽内水深由刻度尺标记并

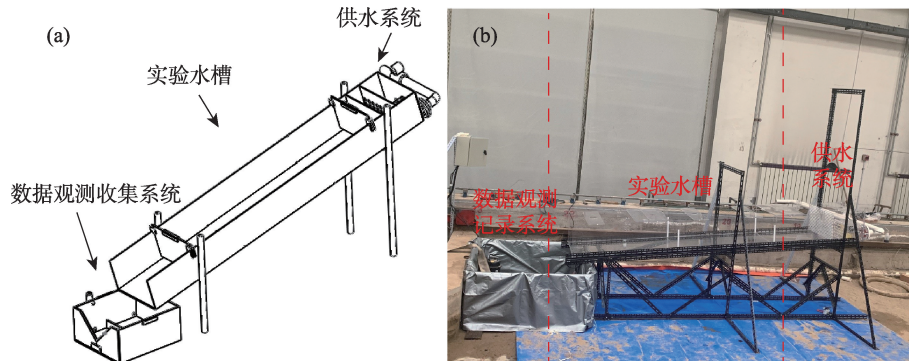


图1 实验装置(a)设计图与(b)实物图

Fig.1 (a) Design drawing and (b) picture of the experimental device

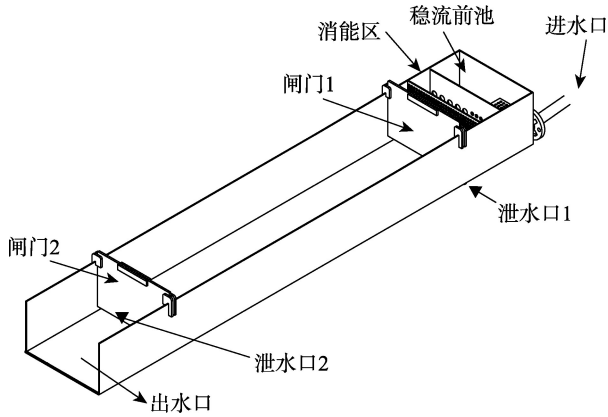


图2 实验水槽细节图

Fig.2 Detail of the experimental tank

由人工记录。4条刻度尺等距地分布于水槽两侧内壁(每侧2条,精度为1 mm),刻度尺下端0刻度起始点与放置的糙率板表面等高且与坡底垂直,保证刻度尺读数即为水槽内水深。当供水稳定时,4条刻度尺读数的算术平均数即为坡面平均水深。

坡面水流出流数据观测记录系统由流量观测装置和数据记录装置组成。流量观测装置由三角堰和水位自记装置组成。结合设计流量,根据国际标准(ISO 1438—2017)中设定的三角堰进行明渠流流量测量的规范,选择角度为 $28^{\circ}4'$ 和 90° 的三角堰对坡面出流流量进行测量。设计的三角堰高度为50 cm,其中堰口水头最高为20 cm。实验水槽去除前端消能区后实验区的长度为2.64 m,满足三角堰堰前距离要求。水流经过实验水槽经出水口最终流入三角堰,三角堰外侧留有与堰连通的管道,管道内置有位移传感器(精度能达到0.00001 mm),实时监测三角堰的水位数据(数据传输速度为0.5 s/个),传感器接有串口线,实时将位移传感器的水位数据传输至数据记录装置的存储卡中。

1.2 实验场景设计

在正式实验开始前需要验证供水系统的稳定性与可靠性:由于有机玻璃板不会产生下渗,因此当供水稳定时,流入实验水槽的水流流量与出水口流出水流流量一致。选择某一固定的供水流量,使流量计数值稳定在设计流量至少5 min,通过稳定时的三角堰水位,根据三角堰水位流量公式计算出流流量。若由三角堰水位数据计算出的流量与设计供水流量一致,则认为供水准确;若三角堰水位数据能保持与水位计相同的稳定时间,则认为供水稳定。

确定供水系统稳定性与可靠性后,开始进行正

式实验。实验时,首先选择目标糙率板放置在实验水槽中,通过调节支架将下垫面调整到设计的坡度值。打开水泵,向实验水槽供水,调节变频器,使供水流量达到设计流量。若流量较小,则通过称重法对水流水深进行推算。具体步骤如下:实验水槽内水流稳定后同时落下实验水槽的2个闸门,同时打开闸门1外的泄水口1,待闸门外部水流流尽后,将闸门2附近的泄水口2打开,此时流入接水桶的全部水量即为实验区水量。对实验区的水量进行称重,根据公式 $W=\rho BLh$ 即可求得 h 。式中: W 为水体重量, ρ 为水的密度, L 、 B 分别为水槽的长、宽, h 为平均水深。若流量很大,则水位数据通过人工读取布设的4个记录点的刻度尺数据获得。联立 $v=ah^{m-1}$ 、 $q=vhB$ 、 $a=\sqrt{\sin\theta}/n$ 即可求得下垫面的曼宁糙率系数 n 。式中: q 为断面流量; v 为断面平均流速; θ 为坡度角; m 为经验系数,断面形状为矩形时, $m=5/3$ 。

2 实验系统验证

供水设备采用水泵供水,通过读取电子流量计数值对恒定流输入流量进行控制。为确认水泵供水的准确度与稳定性,事先进行了87场预实验。预实验输入流量为 $5\text{ m}^3/\text{h}$,坡面坡度为 14.4° ,采用河砂粒径4~6 mm的糙率板。同时进行水深数值读取和水量称重。

首先,对供水设备的稳定性和准确性进行确认。由于实验设置坡面不存在下渗,供水全部产流,因此,若供水稳定时,根据三角堰水位数据计算出的出流量与水泵供水量相等,则认为供水准确性较好,若电子流量计数值稳定时三角堰水位数据稳定,则认为供水稳定。由于预实验输入流量较小,因此选择角度为 $28^{\circ}4'$ 的三角堰对预实验稳定状态下的流量进行率定,根据三角堰水深对流量进行计算。由三角堰水位数据计算流量的公式为 $Q=C\times\frac{8}{15}\sqrt{2g}\times h^{5/2}\times\tan\frac{\theta}{2}$,其中取 $g=9.8\text{ m/s}^2$, θ 即为 $28^{\circ}4'$,参数 C 的具体取值根据 h 的不同由国际标准(ISO1438—2017)中查表得到。部分场次三角堰水位数据与出流流量数据结果如图3所示,表明水泵供水的稳定性和准确性较好。

87组称重数据较为稳定,符合期望为3.463、标准差为0.21的正态分布。且数据均在95%置信区间内(图4)。

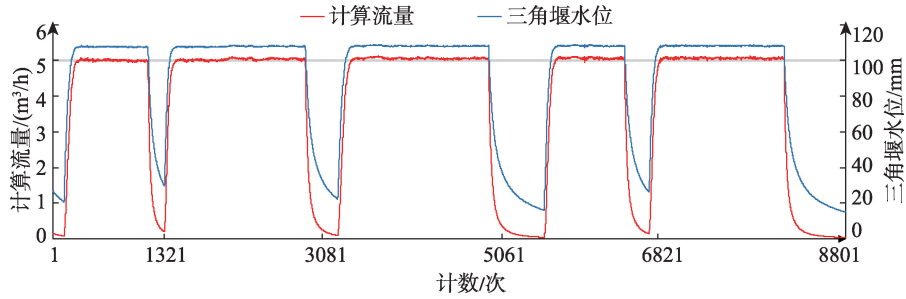


图3 部分场次三角堰水位数据与出流流量数据展示

Fig.3 Some water level data and outflow flow data of triangular weir

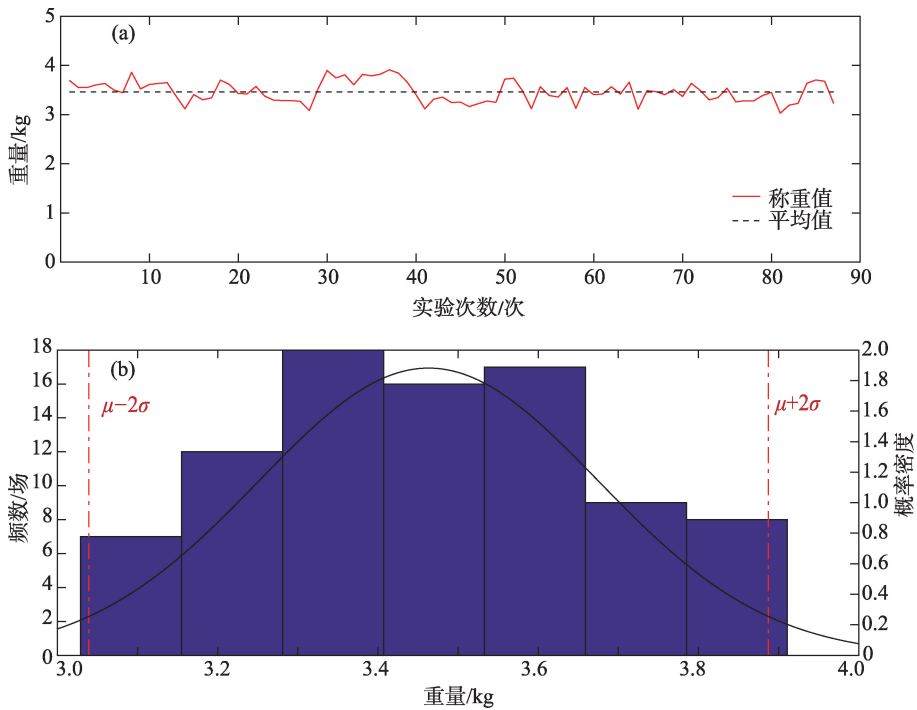


图4 预实验 (a) 水量称重与 (b) 正态分布检验结果

Fig.4 (a) Water weighing and (b) normal distribution test results of the preliminary experiment

3 实验结果分析

通过不同的实验场景组合,共设计了166种实验场景,每种场景进行重复实验3~4次,共进行了502场实验。采用链条法^[37-38]确定不同的糙率板反

映的地表粗糙度并根据实验结果计算出每场实验中的曼宁糙率系数。具体实验结果如表1。由表1可知,不同糙率板上进行的实验都包含层流(雷诺数 $Re < 580$)、过渡流(雷诺数 $Re \in [580, 6000]$)和紊流(雷诺数 $Re > 6000$)3种状态。且当河砂粒径小于10 mm

表1 不同实验场景下的曼宁糙率系数

Tab.1 Manning roughness coefficient in different experimental scenarios

河砂直径范围 d/mm	平均直径/mm	地表粗糙度	供水流量/(m^3/h)	水深/mm	雷诺数	曼宁糙率系数 n
1~2	1.42	0.03~0.12	1~25	0.40~22.00	550~14000	0.002~0.060
2~4	2.87	0.03~0.13	1~25	1.60~23.00	550~13000	0.020~0.064
4~6	4.57	0.05~0.14	1~25	1.80~20.00	550~12500	0.021~0.080
8~10	8.74	0.06~0.16	1~15	2.40~16.00	550~8000	0.027~0.075
12~15	13.36	0.07~0.17	1~12	2.00~18.00	550~7000	0.017~0.072

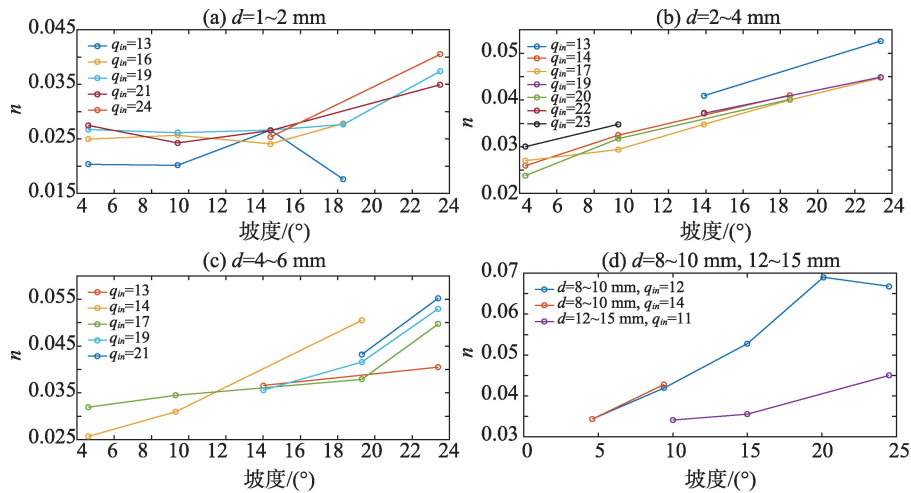
时,计算出的曼宁糙率系数最小值有随河砂直径变大而变大的特征。

已知曼宁公式更适合紊流状态下平均流速的计算,因此将实验分为层流和过渡流实验(共93种场景)、紊流实验(共73种场景)2大类。以紊流状态下的实验为主要研究对象,探究不同糙率板上曼宁糙率系数随坡度的变化(图5)。由图5可见:①在不同的糙率板上,都普遍存在供水流量固定时,曼宁糙率系数随坡度的增大而增大的趋势。②整体来看,对于同一糙率板,相同坡度下的曼宁糙率系数与流量没有很明显的关系。但在河砂粒径为1~2 mm和河砂粒径为4~6 mm的糙率板上,坡度小于15°时,都有相同坡度条件下,输入流量越大,曼宁糙率系数越大的特征,当坡度大于15°时这种特征消失。③值得注意的是,图5中,河砂粒径为1~2 mm的糙率板上,曼宁糙率系数的范围为0.02~0.06;河砂粒径为2~4 mm的糙率板上,曼宁糙率系数的范围为0.025~0.065;河砂粒径为4~6 mm的糙率板上,曼宁糙率系数的范围为0.027~0.08;河砂粒

径为8~10 mm的糙率板上,曼宁糙率系数的范围为0.03~0.07。曼宁糙率系数的取值范围在随糙率板上河砂粒径的增加而增加,因此有理由认为,曼宁糙率系数随河砂粒径变大有上升趋势。

为量化河砂直径对曼宁糙率系数的影响,需计算某一范围内河砂的平均直径。具体步骤为:随机选出100~1000颗某一范围内的河砂,放入已知体积的水中,则放置河砂后体积的变化量就是河砂总体积。由河砂总体积和球体体积公式即可计算河砂的平均直径,具体计算结果见表1。

采用神经网络方法分析坡度、实测流量、实测水深、不同糙率板上河砂的平均直径和地表粗糙度对曼宁糙率系数的影响。由于训练集的随机性与激活函数的不同导致分析结果并不唯一,因此基于单层隐藏层的多层感知器(Multilayer Perceptron, MLP)神经网络进行了多次分析,具体分析结果如表2。最后得到各参数对曼宁糙率系数的重要性从大到小排列为:实测水深>实测流量>坡度>地表粗糙度>河砂平均直径。其中,坡度和实测流量对曼



注: q_m 表示供水流量(m^3/h)。

图5 不同地表粗糙度情况下曼宁糙率系数随坡度的变化规律

Fig.5 Variation of manning roughness coefficient with gradient under different surface roughness conditions

表2 多层感知器神经网络分析结果

Tab.2 Results of Multilayer Perceptron (MLP)

因素	重要性/%						平均值
	第一次分析	第二次分析	第三次分析	第四次分析	第五次分析	第六次分析	
坡度	19.2	23.9	24.4	25.6	25.6	22.8	23.58
实测流量	23.4	26.6	25.3	21.6	23.4	23.9	24.03
实测水深	34.2	33.6	30.2	27.7	28.7	30.3	30.78
河砂平均直径	13.1	7.3	9.2	10.3	12.0	8.4	10.05
地表粗糙度	10.1	8.6	10.9	14.8	10.3	14.6	11.55

宁糙率系数的重要性相近,河砂平均直径和地表粗糙度对曼宁糙率系数的重要性相近。

以坡度、实测流量、实测水深、不同糙率板上河砂的平均直径和地表粗糙度为自变量,以曼宁糙率系数为因变量,用支持向量机(Support Vector Machines, SVM)对曼宁糙率系数进行拟合预测。从73组紊流实验数据中随机选出49组进行训练,得到相关关系后,用剩余的24组数据对曼宁糙率系数进行预测,同时对 $Re < 6000$ 的层流及过渡流状态下的曼宁糙率系数也进行预测。选用均方根误差(RMSE)和决定系数(R^2)为评价指标,分别进行单一因素、2种因素随机组合、3种因素随机组合、4种因素随机组合、5种因素的SVM训练与预测,具体结果如表

3。由表3可知:①无论是多少种因素,以紊流的训练结果去预测层流和过渡流的曼宁糙率系数都难以得到理想的结果,说明流态不同时,实验因素对水流的影响机制不同;②若想准确预测曼宁糙率系数,至少需要3种因素,且一定需要考虑实测水深;③当同时考虑4种及更多种因素时,紊流状态下均可对曼宁糙率系数进行准确预测。

4 结论

曼宁糙率系数是进行流速计算时需要的关键参数,目前得到曼宁糙率系数的主要手段还是从实测资料进行推测。坡面流的运动状态与明渠流不同,

表3 SVM训练与预测结果

Tab.3 Training and estimation results of support vector machine (SVM)

因素	紊流训练期		紊流预测期		层流和过渡流预测期			
	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2		
单一因素	坡度	0.04	0.79	0.15	0.23	0.42	0.19	
	实测流量	0.15	0.25	0.13	0	0.38	0.01	
	实测水深	0.05	0.71	0.43	0.03	0.53	0.01	
	河砂平均直径	0.22	0.22	0.47	0.44	0.65	0.38	
	地表粗糙度	0.05	0.71	0.23	0.64	0.75	0.11	
2种因素	坡度+实测流量	0.11	0.44	0.12	0.21	0.55	0	
	坡度+实测水深	0.10	0.37	0.09	0.45	0.46	0.02	
	坡度+河砂平均直径	0.06	0.73	0.18	0.64	0.58	0.20	
	坡度+地表粗糙度	0.06	0.67	0.12	0.39	0.46	0.11	
	实测流量+实测水深	0.03	0.88	0.12	0.03	0.38	0	
	实测流量+河砂平均直径	0.08	0.58	0.19	0.20	0.41	0	
	实测流量+地表粗糙度	0.07	0.67	0.12	0.25	0.39	0.05	
	实测水深+河砂平均直径	0.10	0.36	0.13	0.30	0.57	0.20	
	实测水深+地表粗糙度	0.06	0.69	0.08	0.44	0.95	0.18	
	河砂平均直径+地表粗糙度	0.02	0.92	0.05	0.78	0.35	0.38	
3种因素	坡度+实测流量+实测水深	0.01	0.96	0.03	0.90	0.84	0.31	
	坡度+实测流量+河砂平均直径	0.04	0.78	0.07	0.57	0.36	0.09	
	坡度+实测流量+地表粗糙度	0.07	0.66	0.15	0.29	1.43	0.16	
	坡度+实测水深+河砂平均直径	0.02	0.91	0.11	0.79	3.30	0.09	
	坡度+实测水深+地表粗糙度	0.05	0.69	0.17	0.50	0.47	0.11	
	实测流量+实测水深+河砂平均直径	0.11	0.43	0.12	0.32	0.38	0.14	
	实测流量+实测水深+地表粗糙度	0.02	0.87	0.04	0.92	1.68	0.08	
	实测水深+河砂平均直径+地表粗糙度	0.02	0.91	0.03	0.78	1.25	0.13	
	4种因素	坡度+实测流量+实测水深+河砂平均直径	0.01	0.97	0.01	0.96	0.18	0.52
		坡度+实测流量+实测水深+地表粗糙度	0.01	0.96	0.02	0.91	0.57	0.36
实测流量+实测水深+地表粗糙度+河砂平均直径		0.01	0.95	0.02	0.88	0.38	0.29	
坡度+实测水深+地表糙率+河砂平均直径		0.01	0.97	0.02	0.84	6.47	0.38	
坡度+实测流量+河砂平均直径+地表粗糙度		0.02	0.90	0.09	0.74	6.86	0.53	
5种因素	坡度+实测流量+实测水深+地表粗糙度+河砂平均直径	0	0.98	0.01	0.91	0.44	0.45	

因此,不能直接沿用现有的明渠流曼宁糙率系数,坡面实验是获得坡面曼宁糙率系数的重要手段。

本文以坡面流曼宁糙率系数为研究目标,研制了一种新型室内可变糙率坡面实验系统,包括供水系统、实验水槽和数据观测记录系统3部分,通过放置不同的糙率板来模拟不同的地表粗糙度,通过设定不同的实验场景确定坡面径流过程的曼宁糙率系数,并开展了87场预实验对供水系统的准确性和稳定性进行了验证,证明供水系统稳定可靠。

随后通过不同供水流量、不同坡度和不同糙率板互相组合共设计了166种实验场景,进行了502场恒定流坡面汇流实验。发现紊流状态下,同一地表粗糙度且供水流量固定时,曼宁糙率系数随坡度的增大而增大;曼宁糙率系数随河砂粒径变大有上升趋势。选用均方根误差(RMSE)和决定系数(R^2)为评价指标,以坡度、实测流量、实测水深、不同糙率板上河砂的平均直径和地表粗糙度为自变量,以曼宁糙率系数为因变量,进行了SVM训练与预测,发现:①难以用紊流的训练结果预测其余流态的曼宁糙率系数,说明不同流态下实验因素对水流的影响机制明显不同;②准确预测紊流曼宁糙率系数至少需要3个因素,其中实测水深最为关键;③用超过3个自变量均可较为准确地预测紊流曼宁糙率系数。

参考文献(References)

- [1] 张罗号. 明渠水流阻力研究现状分析 [J]. 水利学报, 2012, 43(10): 1154-1162. [Zhang Luohao. Analysis of the present situation of open channels roughness. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(10): 1154-1162.]
- [2] Etedali H R, Liaghat A, Abbasi F. Evaluation of the evaluate model for estimating Manning's roughness in furrow irrigation [J]. Irrigation and Drainage, 2012, 61(3): 410-415.
- [3] Mohamoud Y M. Evaluating Manning roughness coefficients for tilled soils [J]. Journal of Hydrology, 1992, 135 (1-4): 143-156.
- [4] 刘蛟, 刘铁, 黄粤, 等. 基于遥感数据的叶尔羌河流域水文过程模拟与分析 [J]. 地理科学进展, 2017, 36(6): 753-761. [Liu Jiao, Liu Tie, Huang Yue, et al. Simulation and analysis of the hydrological processes in the Yarkant River Basin based on remote sensing data. Progress in Geography, 2017, 36(6): 753-761.]
- [5] 郑子成, 何淑勤, 吴发启, 等. 地表糙度与水力糙率系数的关系 [J]. 山地学报, 2004, 22(2): 236-239. [Zheng Zicheng, He Shuqin, Wu Faqi, et al. Relationship between surface roughness and Manning roughness. Journal of Mountain Research, 2004, 22(2): 236-239.]
- [6] Darboux F, Davy P, Gascuel-Oudou C, et al. Evolution of soil surface roughness and flowpath connectivity in overland flow experiments [J]. Catena, 2002, 46(2-3): 125-139.
- [7] 张洪江, 解明曙, 北原曜, 等. 晋西残塬区坡面 n 值及其与土壤侵蚀量关系的初步研究 [J]. 北京林业大学学报, 1993, 15(3): 51-58. [Zhang Hongjiang, Xie Mingshu, Bei Yuanyao, et al. Value of roughness coefficient in the Manning equation for the ground surface flow and the relationship between the n value and soil erosion. Journal of Beijing Forestry University, 1993, 15(3): 51-58.]
- [8] 张洪江, 北原曜, 解明曙, 等. 晋西几种不同土地利用状况下糙率系数的研究 [J]. 北京林业大学学报, 1994, 16 (S4): 86-92. [Zhang Hongjiang, Bei Yuanyao, Xie Mingshu, et al. Study on roughness coefficient under the conditions of several land utilization in the west of Shanxi Province. Journal of Beijing Forestry University, 1994, 16(S4): 86-92.]
- [9] 吴福生, 王文野, 姜树海. 含植物河道水动力学研究进展 [J]. 水科学进展, 2007, 18(3): 456-461. [Wu Fusheng, Wang Wenye, Jiang Shuhai. Hydrodynamics development in vegetated open channel. Advances in Water Science, 2007, 18(3): 456-461.]
- [10] 潘成忠, 上官周平. 降雨和坡度对坡面流水动力学参数的影响 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 6(6): 843-851. [Pan Chengzhong, Shanguan Zhouping. Experimental study on influence of rainfall and slope gradient on overland shallow flow hydraulics. Journal of Basic Science and Engineering, 2009, 6(6): 843-851.]
- [11] 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. Journal of Hydraulic Engineering. 2007, 38(1): 112-119.]
- [12] 何建京, 王惠民. 流动型态对曼宁糙率系数的影响研究 [J]. 水文, 2002, 22(6): 22-24, 53. [He Jianjing, Wang Huimin. The effect of types of flow on Manning's roughness coefficient. Hydrology, 2002, 22(6): 22-24, 53.]
- [13] 马晓航, 王文才, 朱春申, 等. 沉水植物对河道曼宁系数影响的实验研究 [J]. 水动力学研究与进展, 2015, 30 (1): 106-111. [Ma Xiaohang, Wang Wencai, Zhu Chunshen, et al. Experimental study for Manning coefficient in different densities of submerged flexible vegetation. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2015, 30(1): 106-111.]
- [14] 李榕. 关于影响曼宁粗糙系数 n 值的水力因素探讨 [J]. 水利学报, 1989, 20(12): 62-66. [Li Rong. Discussion on hydraulic factors affecting Manning's roughness coefficient n . Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 20(12):

- 62-66.]
- [15] Pradhan A, Khatua K K. Gene expression programming to predict Manning's n in meandering flows [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2018, 45(4): 304-313.
- [16] Dash S S, Khatua K K. Sinuosity dependency on stage discharge in meandering channels [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2016, 142(9): 04016030. doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001037.
- [17] Kamali P, Ebrahimian H, Parsinejad M. Estimation of Manning roughness coefficient for vegetated furrows [J]. Irrigation Science, 2018, 36(6): 339-348.
- [18] Seyedzadeh A, Panahi A, Maroufpoor E, et al. Development of an analytical method for estimating Manning's coefficient of roughness for border irrigation [J]. Irrigation Science, 2019, 37(4): 523-531.
- [19] Li Z, Zhang J T. Calculation of field Manning's roughness coefficient [J]. Agricultural Water Management, 2001, 49(2): 153-161.
- [20] Chow V T. Open channel hydraulics [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1959.
- [21] 田娜玲, 王占礼, 张琪琳, 等. 黄土区草地坡面片流阻力系数试验研究 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 7-11. [Tian Naling, Wang Zhanli, Zhang Qilin, et al. Experimental study on sheet flow resistance coefficient of grassland in loess area. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(4): 7-11.]
- [22] Fu X T, Zhang L P, Wu X Y, et al. Dynamic simulation on hydraulic characteristic values of overland flow [J]. Water Resources, 2012, 39(4): 474-480.
- [23] 杨苗, 龚家国, 赵勇, 等. 坡面层流区动力学特性 [J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 709-718. [Yang Miao, Gong Jianguo, Zhao Yong, et al. Study of dynamic characteristics of laminar flow zone in overland flow. Advances in Water Sciences, 2019, 30(5): 709-718.]
- [24] 罗榕婷, 张光辉, 曹颖. 坡面含沙水流水动力学特性研究进展 [J]. 地理科学进展, 2009, 28(4): 567-574. [Luo Rongting, Zhang Guanghui, Cao Ying. Progress in the research of hydrodynamic characteristics of sediment-laden overland flow. Progress in Geography, 2009, 28(4): 567-574.]
- [25] 吴发启, 赵晓光, 刘秉正, 等. 地表糙度的量测方法及对坡面径流和侵蚀的影响 [J]. 西北林学院学报, 1998, 13(2): 15-19. [Wu Faqi, Zhao Xiaoguang, Liu Bingzheng, et al. On the method for measuring ground surface roughness and its effect upon runoff and erosion on the slope surface. Journal of Northwest Forestry College, 1998, 13(2): 15-19.]
- [26] 张宽地, 王光谦, 孙晓敏, 等. 模拟植被覆盖条件下坡面流水动力学特性 [J]. 水科学进展, 2014, 25(6): 825-834. [Zhang Kuandi, Wang Guangqian, Sun Xiaomin, et al. Hydraulic characteristic of overland flow under different vegetation coverage. Advances in Water Sciences, 2014, 25(6): 825-834.]
- [27] 胡世雄, 靳长兴. 坡面动力侵蚀过程的实验研究进展 [J]. 地理科学进展, 1999, 18(2): 9-16. [Hu Shixiong, Jin Changxing. The recent development of experiment on hill slope erosion processes. Progress in Geography, 1999, 18(2): 9-16.]
- [28] Luk S H, Merz W. Use of the salt tracing technique to determine the velocity of overland-flow [J]. Soil Technology, 1992, 5(4): 289-301.
- [29] 董月群, 雷廷武, 张晴雯, 等. 集中水流冲刷条件下浅沟径流流速特征研究 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 96-100. [Dong Yuequn, Lei Tingwu, Zhang Qingwen, et al. Ephemeral gully flow velocity under concentrated water flow. Transactions of the CSAE, 2013, 44(5): 96-100.]
- [30] Hewlett J D, Hibbert A R. Moisture and energy conditions within a sloping soil mass during drainage [J]. Journal of Geophysical Research, 1963, 68(4): 1081-1087.
- [31] 杨聪, 于静洁, 刘昌明, 等. 华北山区坡地径流规律试验研究 [J]. 地理学报, 2005, 60(6): 143-150. [Yang Cong, Yu Jingjie, Liu Changming, et al. Experimental study on the law of runoff generation on sloping land in the mountainous area of North China. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(6): 143-150.]
- [32] 范世香, 韩绍文. 地面坡度对地表径流影响的实验研究 [J]. 水土保持通报, 1991, 11(4): 6-10. [Fan Shixiang, Han Shaowen. Testing research on the effects of land surface slopes upon surface runoff. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1991, 11(4): 6-10.]
- [33] 敬向锋. 坡面薄层水流水动力学规律的试验研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007. [Jing Xiangfeng. Experimental study on the law of thin layer hydrodynamics on slope. Yangling, China: Northwest A&F University, 2007.]
- [34] Izzard C F, Augustine M T. Preliminary report on analyses of runoff resulting from simulated rainfall on a paved plot [J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1943, 24(2): 500-511.
- [35] 张士锋, 刘昌明, 夏军, 等. 降雨径流过程驱动因子的室内模拟实验研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 2004, 34(3): 280-289. [Zhang Shifeng, Liu Changming, Xia Jun, et al. Laboratory simulation experiment on driving factors of rainfall runoff process. Scientia Sinica Terrae, 2004, 34(3): 280-289.]
- [36] 施明新, 吴发启, 田国成. 地表糙率对坡面流流速影响的试验研究 [J]. 水力发电学报, 2015, 34(6): 117-124.

- [Shi Mingxin, Wu Faqi, Tian Guocheng. Experimental study on effect of surface roughness on overland flow velocity. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(6): 117-124.]
- [37] Saleh A. Soil roughness measurement-chain method [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1993, 48(6): 527-529.
- [38] 巩国丽, 刘纪远, 邵全琴. 基于RWEQ的20世纪90年代以来内蒙古锡林郭勒盟土壤风蚀研究 [J]. *地理科学进展*, 2014, 33(6): 825-834. [Gong Guoli, Liu Jiyuan, Shao Quanqin. Wind erosion in Xilingol League, Inner Mongolia since the 1990s using the revised wind erosion equation. *Progress in Geography*, 2014, 33(6): 825-834.]

Experimental study on determining Manning roughness coefficient during slope runoff process

CHENG Yashan^{1,2}, WANG Zhonggen^{1*}, LI Jun³, HUANG Zhen^{1,2}, YE Xiangyu^{1,2}, TANG Yin¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China)

Abstract: Manning roughness coefficient is the key parameter of flow velocity calculation. Overland flow is significantly different from open channel flow. In this study, we focused on the application of Manning formula in calculating the velocity of overland flow. Compared with open channel flow, the depth of overland flow is very shallow, sometimes only a few millimeters. Thus, vegetation, soil, surface roughness, and other factors have more obvious impact on overland flow. Therefore, the existing open channel flow Manning roughness coefficient cannot be directly used in overland flow. In order to determine the Manning roughness coefficient of overland flow, in this study we developed an indoor experimental system with variable roughness on slope, which includes a water supply system, an experimental tank, and an observation and data recording system. In this system, we used uniform river sand on the flat plate to simulate different roughness of the underlying surface, and placed it in a water tank. The stability and accuracy of the water supply system were verified by 87 pre-experiments. The results show that when the water supply was stable, the discharge was consistent with the data displayed by the electronic flow meter. The 87 groups of weighing data are relatively stable and consistent with normal distribution, and the data are within the 95% confidence interval. Then we designed 166 experiment scenes through a combination of different slopes, surface roughness, and water supply flow to explore the relationship between experimental conditions and Manning roughness coefficient. Among the 166 experiment scenes, a total of six kinds of roughness were designed. The water supply flow ranged from 1 to 25 m³/h. The slope was between 4°–25°. We used the volume method to calculate the average diameter of the river sand and the chain method to calculate the surface roughness. The experiment data were processed for Support Vector Machine (SVM) training and forecasting, which used root mean square error (RMSE) and coefficient of determination (R^2) as the evaluation indices, considered slope, measured flow, measured depth, average diameter of the river sand, and surface roughness as the independent variables, and Manning roughness coefficient as the dependent variable. The results show that no matter how many kinds of factors were considered, it was difficult to predict the Manning roughness coefficient of laminar flow and transitional flow by the training results of turbulent flow, which indicates a different influence mechanism in different flow patterns. In order to predict the Manning roughness coefficient accurately, we need three factors at least, and measured water depth must be included. When considering four or more factors at the same time, the Manning roughness coefficient could be accurately predicted in turbulent flow.

Keywords: Manning roughness coefficient; slope experiment; Support Vector Machine