

冻融坡面土壤剥蚀率不同预测模型比较

鲍永雪, 王瑄, 周丽丽, 张凯, 陈志强

(沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110161)

摘要: 为探究水蚀因子对冻融坡面土壤剥蚀率的影响, 采用 2 个坡度(10° , 15°)、4 个流量(4.5, 6.5, 8.5, 10.5 L/min)和 4 个起始解冻深度(2, 5, 10, 15 cm), 模拟野外径流冲刷试验。采用 BP 神经网络方法和逐步回归分析法, 分析土壤剥蚀率和流量、坡度、起始解冻深度、流速、水流剪切力、水流功率与单位水流功率 7 个水蚀因子关系。结果表明: 通过 BP 神经网络连接权关系分析水蚀因子对冻融坡面土壤剥蚀率影响顺序为水流功率>单位水流功率>起始解冻深度>水流剪切力>流量>流速>坡度。BP 神经网络模型的土壤剥蚀率预测平均误差为 2.848% ($R^2=0.954$); 逐步回归模型的土壤剥蚀率预测平均误差 4.820% ($R^2=0.925$); 基于单一水蚀因子(水流功率)模型的土壤剥蚀率预测平均误差 5.298% ($R^2=0.867$)。基于 BP 神经网络的土壤剥蚀率预测效果最好, 为春季解冻时期冻融坡面不同起始解冻深度条件下土壤侵蚀预报模型的建立提供了新思路。

关键词: 冻融坡面; 土壤剥蚀率; BP 神经网络; R 语言; 预测精度

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0127-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2017.05.020

Research on Different Prediction Models of Soil Detachment Rate on Freeze-Thaw Slope

BAO Yongxue, WANG Xuan, ZHOU Lili, ZHANG Kai, CHEN Zhiqiang

(College of Water Conservancy, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110161)

Abstract: In order to explore the effects of hydrodynamic erosion factors on soil detachment rate of freeze-thaw slope, two slopes (10° and 15°), four flow rates (4.5, 6.5, 8.5 and 10.5 L/min), and four original thaw depth (2, 5, 10 and 15 cm) were designed to simulate filed runoff. By means of BP Neural Network and Stepwise Regression Analysis, we analyzed the relationship between the soil detachment rate and 7 hydrodynamic erosion factors, including stream power, unit stream power, original thaw depth, flow shear stress, flow rate, flow velocity and slope. The results showed that the rank of influence significance of hydrodynamic erosion factors from high to low was flow stream power>unit stream power>original thaw depth>flow shear stress>flow rate>flow velocity>gradient. Furthermore, according to BP Neural Network model, the average error of soil detachment rate prediction was 2.848% ($R^2=0.954$). In view of Stepwise Regression Analysis model, the average error was 4.820% ($R^2=0.925$). According to Single Hydrodynamic Erosion Factors (Stream power) model, the average error was 5.298% ($R^2=0.867$). In general, the prediction effect based on BP Neural Network was better than others. This study provides a new idea for the establishment of soil erosion prediction model under different original thaw depths in the spring thaw period.

Keywords: freeze-thaw slope; soil detachment rate; BP Neural Network; R Language; prediction accuracy

冻融是指由于昼夜热量变化或者季节变化, 在冻融作用下导致表土以及一定深度的土壤形成反复冻结—融化的过程。我国东北地区, 冬季普遍具有深厚而为时较长的季节性冻土, 冻融作用破坏了土壤的结构和性质, 使土壤黏聚力变小, 土壤分散力变大, 在春季解冻期, 由于未完全解冻层的存在等原因, 土壤在降雨和融雪径流等外营力作用下, 加速了土壤流失速

率, 极易发生土壤侵蚀。李占斌等^[1]通过历经冻融作用的坡面侵蚀过程研究发现, 经过冻融作用后, 使土壤含水量增加, 土壤容重减小, 孔隙度增大, 导致经冻融作用后坡面稳渗率是非冻融坡面的 2 倍; 周丽丽等^[2]、刘佳等^[3]分别通过白浆土和黑浆土解冻期土壤侵蚀特征室内模拟试验, 发现由于冻融作用, 坡面解冻不完全, 使降雨侵蚀力增强, 导致坡面土壤侵蚀增

收稿日期: 2017-03-25

资助项目: 国家自然科学基金项目(41471225); 辽宁省农业领域青年科技创新人才培养计划(2014054)

第一作者: 鲍永雪(1989—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: baoyongxue123@163.com

通信作者: 王瑄(1965—), 女, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: xuanw11@163.com

加;魏霞等^[4]通过交替冻融对坡面产沙量影响试验,得出交替冻融使坡面产流产沙强度增大;范昊明等^[5]通过室外人工模拟融雪水冲刷试验,系统地研究了春季解冻期土壤解冻深度对坡面侵蚀量的影响,结果表明解冻深度对坡面产流产沙有显著影响。坡面径流剥离土壤的过程十分复杂,每个学者研究影响土壤剥蚀率因素的侧重点各有不同。管新建等^[6]认为,单宽能耗、水流功率与土壤剥蚀率关系最为紧密;王瑄等^[7]认为非冻融坡面土壤剥蚀率可以由水蚀动力参数(剪切力、单位水流功率、水流功率)和土壤参数的函数来表达;吴秋菊等^[8]认为土壤剥蚀率与水流功率呈对数关系;张光辉等^[9]研究发现土壤剥蚀率是水深、流量、坡度的函数,流量对土壤剥蚀率的影响大于坡度,且大于水深;张新和等^[10]认为力(水流剪切力)或能量(水流功率、断面单位能量)均可很好的对坡面径流输沙能力进行描述;吴淑芳等^[11]认为径流单位水流功率可以简便、准确地描述坡面土壤侵蚀过程;陆绍娟等^[12]得出水流剪切力与细沟径流输沙过程的关系最为密切;王瑄等^[13-15]通过土槽放水径流冲刷试验,系统地分析了非冻融坡面土壤剥蚀率与侵蚀因子间的关系,发现水流功率是对输沙量贡献最大的因子。刘彦辰等^[16]通过灰色关联分析、模糊贴近度分析和通径分析 3 种方法结果对比,得出影响冻融坡面土壤剥蚀率的主要因子大小排序为水流功率、流量、起始解冻深度、坡度;刘彦辰等^[17]认为在春季解冻期,相同起始解冻深度条件下,土壤剥蚀率随坡度和流量的增加而增加。

综上所述,坡面土壤剥蚀率与水蚀因子间关系的研究大都针对非冻融坡面,而冻融坡面的研究非常少。因此,本文从水力侵蚀的角度,在春季解冻期,进行野外坡面径流冲刷,采用 BP 神经网络和 R 软件定量分析冻融坡面土壤剥蚀率与水蚀因子之间的关系,为春季解冻期冻融坡面土壤侵蚀的防治预报提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究在沈阳农业大学水利学院水土保持实验场进行,地理坐标为东经 123°33′35.32″,北纬 41°50′4.37″,属于半湿润温带大陆性气候,海拔 44.7 m,多年平均气温 6.2~9.7℃,多年年均降水量为 716 mm,其中冬季降水量占全年降水量 6%以上。试验用土采自沈阳郊区的坡耕地,土壤类型为棕壤,土壤粒径比例为中砂粒(0.5~0.25 mm)占试验用土 45.26%,细砂粒(0.25~0.05 mm)占试验用土 41.27%。

径流小区长宽深分别为 6 m×1 m×0.5 m,四周边埂采用砖砌,并用水泥砂浆抹面。试验土壤在采用前将全部过筛(筛孔 1 cm×1 cm),为尽量减小土壤

容重误差,采用塑料薄膜将土壤全部覆盖进行闷土,使土壤水分均匀。小区坡面土壤分 5 层布设,每层用脚踩实平整后,为防止土层分离,将其表面土壤抛毛,再铺设下一层土壤。为模拟自然条件下野外冻融坡面径流冲刷,径流小区在 2015 年 10 月开始布设,使径流小区静置一个冬季,于 2016 年 3 月进行模拟径流冲刷试验。

1.2 试验方法

通过分析沈阳地区水文和融雪资料,径流小区坡面坡度采用 10°和 15°,设计流量 4.5,6.5,8.5,10.5 L/min,起始解冻深度 2,5,10,15 cm,共计 32 个试验。径流小区静置一个冬季后,在春季解冻期自然条件下,对坡面进行野外径流冲刷试验。

试验开始前,首先将坡面进行解冻,起始解冻深度达到设计要求后方可进行试验(采用测针在坡面不同位置测量坡面起始解冻深度)。试验放水系统由水箱、水泵、输水管、水表、阀门及稳流槽构成。为提供稳定的水压,将水箱设置于径流小区上方,距坡面顶端有 1 m 的高差,且水箱一直处于充满水的状态。稳流槽架设在试验坡面的顶端,由水表及阀门共同控制径流流量,待稳流槽蓄满之时开始进行试验。径流小区底端设置簸箕形集流槽,以便用接样桶集取泥水样。试验开始后,采用染料示踪法同时分别测量坡下段、坡中段、坡上段的坡面径流流速,并且在相同位置测量坡面径流宽度,同时在集流槽处,用接样桶每分钟接取一个泥水样。避免长时间冲刷导致土壤中不透水层融化过深加大下渗量,整个试验持续 13~15 min。径流冲刷试验完成后,为避免阳光照射,导致坡面起始解冻深度加深,采用棉被将坡面覆盖,直至再次试验准备时,再将坡面置于阳光下解冻至试验要求起始解冻深度。试验过程中,在径流小区底部集流槽处用接样桶每分钟接取的一个试验泥水样,待泥水样静置 24 h 后,将泥沙样装入铝盒放入烘箱,调至 105℃,烘干 8 h,关闭烘箱电源,土样冷却后,将土样称重并做好记录,用于计算土壤剥蚀率。

1.3 数据分析方法

试验数据采用 Excel 2010 软件进行水蚀因子相关计算,运用 R×64 3.2.0 软件对影响冻融坡面土壤剥蚀率的主要侵蚀因子进行逐步回归分析,运用 MATLAB R2014a 分析软件通过 BP 神经网络预测冻融坡面土壤剥蚀率模型。每个试验在相同时间段重复一次,试验误差严格限制在 15%以内。本试验均以 2 次重复试验的平均数据作为计算的基本数据来源。水流剪切力、水流功率和单位水流功率的计算公式分别为:

$$\tau = \rho R J \quad (1)$$

式中: τ 为水流剪切力(Pa); ρ 为水流容重,一般为 10 000 N/m³; R 为水力半径(m); J 为能坡, $J = \sin \theta$ 。

$$\omega = \tau v$$

(2)

式中: ω 为水流功率[N/(m·s)]。

$$P = vJ$$

(3)

式中: P 为单位水流功率(m/s)。

土壤剥蚀率是单位时间单位面积上的土壤剥蚀量。根据试验实测数据,按公式(1)、公式(2)和公式(3)计算得出水流剪切力、水流功率、单位水流功率和土壤剥蚀率。计算结果见表 1。

表 1 土壤剥蚀率与水蚀因子的原始数据

序号	流量/ (L·min ⁻¹)	坡度/ (°)	起始解冻 深度/cm	流速/ (m·s ⁻¹)	水流剪 切力/Pa	水流功率/ (N·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	单位水流功率/ (m·s ⁻¹)	土壤剥蚀率/ (g·m ⁻² ·s ⁻¹)
1	4.5	10	2	0.373	5.189	1.803	0.190	24.506
2	4.5	10	5	0.386	6.353	2.254	0.197	38.730
3	4.5	10	10	0.383	6.195	2.189	0.196	35.351
4	4.5	10	15	0.376	6.894	2.306	0.192	39.755
5	6.5	10	2	0.379	6.512	2.251	0.194	35.961
6	6.5	10	5	0.390	7.327	2.627	0.199	45.950
7	6.5	10	10	0.383	6.929	2.405	0.195	40.814
8	6.5	10	15	0.378	8.277	2.841	0.193	54.281
9	8.5	10	2	0.391	6.598	2.377	0.199	42.027
10	8.5	10	5	0.388	7.757	2.744	0.198	50.005
11	8.5	10	10	0.386	7.170	2.541	0.197	45.910
12	8.5	10	15	0.381	8.475	2.868	0.194	55.960
13	10.5	10	2	0.391	6.751	2.477	0.200	42.529
14	10.5	10	5	0.383	8.102	2.867	0.195	55.989
15	10.5	10	10	0.377	8.152	2.804	0.192	52.863
16	10.5	10	15	0.381	8.981	3.183	0.194	63.878
17	4.5	15	2	0.314	9.129	2.646	0.235	40.765
18	4.5	15	5	0.315	9.613	2.828	0.237	50.241
19	4.5	15	10	0.285	9.448	2.555	0.214	52.883
20	4.5	15	15	0.319	9.621	2.858	0.239	60.920
21	6.5	15	2	0.311	9.499	2.656	0.233	42.108
22	6.5	15	5	0.311	9.677	2.700	0.233	50.574
23	6.5	15	10	0.308	9.464	2.648	0.237	54.138
24	6.5	15	15	0.317	9.985	2.832	0.238	60.497
25	8.5	15	2	0.325	9.819	2.943	0.244	51.419
26	8.5	15	5	0.334	9.875	3.032	0.250	57.967
27	8.5	15	10	0.343	9.758	3.059	0.257	60.034
28	8.5	15	15	0.342	9.990	3.026	0.257	65.026
29	10.5	15	2	0.316	9.842	2.926	0.237	54.106
30	10.5	15	5	0.323	9.973	3.032	0.242	55.290
31	10.5	15	10	0.339	9.767	3.068	0.254	60.126
32	10.5	15	15	0.360	9.915	3.256	0.270	73.195

注:表中数据为 2 次重复试验数据的平均值。

1.4 冻融坡面土壤剥蚀率的 BP 神经网络模型

利用 premmx 函数将输入矩阵和输出矩阵数据初始化在[-1,1]区间内,运用 train 函数对数据样本进行训练,sim 函数对数据样本进行预测。选取 tan-sig 函数作为 BP 神经网络中隐含层与传输层的作用函数,purelin 作为隐含层与输出层的传输函数,训练函数为 traingdm,训练步长设为 1 000,期望误差设为 0.001,学习速率为 0.05,附加动量因子设为 0.9。设 ω_1 为输入层与隐含层之间的权向量; ω_2 为隐含层与输出层之间的权向量; b_1 为输入层与隐含层之间的阈值向量; b_2 为隐含层与输出层之间的阈值向量;输入层神经元数为 7,输出层神经元数为 1,隐含层神经元个数为 10。确定 BP 神经网络函数关系式为:

$$f_2(X) = \text{purelin}\{\omega_2 \times \text{tansig}(\omega_1 \times X, b_1), b\}$$

(4)

2 结果与分析

2.1 基于 BP 神经网络的影响因子显著性分析

利用 BP 神经网络分析各个水蚀因子对土壤剥蚀率的影响程度大小^[18]。传输函数 tansig 和 purelin 是分别对矩阵中各个元素的映射作用,不会对矩阵的整体结构产生影响, X' 为传输函数作用于矩阵 X 后得到的结果。人工神经网络通过学习和训练确立了土壤剥蚀率及其影响因素之间的映射关系,获得了蕴涵于特征网络的连接权中的坡面土壤剥蚀率与影响因素之间的关系,在连接权中也可体现了水蚀因子对土壤剥蚀率的影响程度。采用神经网络的连接权对数据进行分析,将式(4)简化为:

$$f(X) = \omega_1 \times \omega_2 \times X'$$

(5)

式中: $\omega_2 \times \omega_1$ 的绝对值的大小为各个水蚀因子对冻

融坡面土壤剥蚀率影响程度的量度。通过 MATLAB R2014a 求出 BP 神经网络模型的权重矩阵 ω_2 、 ω_1 , 阈值向量 b_1 、 b_2 。得到的隐含层与输出层之间的

$\omega_1 =$	1.94	-2.11	0.97	1.27	-0.37	-1.37	1.54
	1.63	1.90	-1.89	-1.90	-0.48	0.72	-0.99
	-1.84	2.26	1.74	-1.10	1.32	0.78	0.02
	1.78	-0.07	1.87	-1.97	1.27	-1.47	0.86
	0.64	1.42	0.86	-1.87	-1.44	-1.75	1.84
	-1.92	-1.70	1.21	1.53	-0.06	-0.02	2.18
	-1.43	-0.50	1.55	1.24	-0.36	2.93	0.30
	0.28	2.57	-0.68	-1.14	0.89	-1.00	-2.23
	2.14	1.36	0.73	2.10	0.98	0.40	-1.64
	1.85	1.83	-1.31	-1.86	1.02	-1.10	-0.97

$\omega_2 = [1.139 \quad -0.819 \quad 41.111 \quad -0.783 \quad 1.449 \quad -0.438 \quad -0.908 \quad -0.762 \quad 0.482 \quad -0.010]$
 $b_1 = [-3.880 \quad -3.025 \quad 2.172 \quad -1.312 \quad -0.416 \quad -0.445 \quad -1.315 \quad 2.147 \quad 3.024 \quad 3.890]$
 $b_2 = 0.142$

以 $\omega_2 \times \omega_1$ 的绝对值作为反映输入因子对土壤剥蚀率影响程度的量化指标,由 BP 神经网络的连接权 $\omega_2 \times \omega_1$ 得到各个影响因子对土壤剥蚀率影响的显著性结果见表 2。

由表 2 可知,基于 BP 神经网络的水蚀因子对土壤剥蚀率影响程度主要根据显著性量化值的绝对值进行判断,得到各个因子对土壤剥蚀率影响的显著性由高到低依次为水流功率>单位水流功率>起始解冻深度>水流剪切力>流量>流速>坡度。结果表明,对冻融坡面土壤剥蚀率影响最大的水蚀因子是水流功率。这是由于水流功率是水流剪切力和流速的函数,在水流剪切力和流速的共同影响下,水流功率比流量、坡度、起始解冻深度、水流剪切力和单位水流功率具有更广泛的水动力学特性。

表 2 不同水蚀因子对冻融坡面土壤剥蚀率影响的显著性

指标	流量	坡度	解冻深度	流速	剪切力	水流功率	单位水流功率
显著性量化值	1.287	0.529	3.316	0.729	-1.507	-4.369	4.272
显著性排序	5	7	3	6	4	1	2

2.2 冻融坡面土壤剥蚀率单因子预测模型

由表 2 可知,水流功率显著性量化值最大,将水流功率与土壤剥蚀率的关系点绘制到坐标系中,如图 1 所示,建立水流功率与土壤剥蚀率间的拟合关系。由图 1 可知,冻融坡面土壤剥蚀率与水流功率呈线性相关关系,土壤剥蚀率随着水流功率的增加而增加。这与刘彦辰等^[17]的研究结论一致。对试验数据进行回归分析可得如下关系式:

模型 I $D_r = 29.374(\omega - 0.990), (R^2 = 0.867)$

经 F 检验表明:采用水流功率拟合冻融坡面土

权向量 ω_2 ,输入层与隐含层之间权重矩阵 ω_1 ,输入层与隐含层之间的阈值向量 b_1 ,隐含层与输出层之间的阈值向量 b_2 的结果为:

壤剥蚀率是高度显著的。从模型 I 中可以看出冻融坡面土壤剥蚀率系数 $K = 29.374 \text{ g}/(\text{N} \cdot \text{s})$,其临界水流功率 $\omega_0 = 0.990 \text{ g}/(\text{N} \cdot \text{s})$,当水流功率大于土壤剥蚀率的临界水流功率时发生土壤剥蚀,这一结论与王瑄等^[14]和陆绍娟等^[12]的研究结论是一致的。与吴秋菊等^[8]和蔡强国^[19]的研究结论不同,吴秋菊等认为土壤剥蚀率与水流功率呈对数相关关系,蔡强国认为土壤剥蚀率随着水流功率的增加呈幂函数增加。

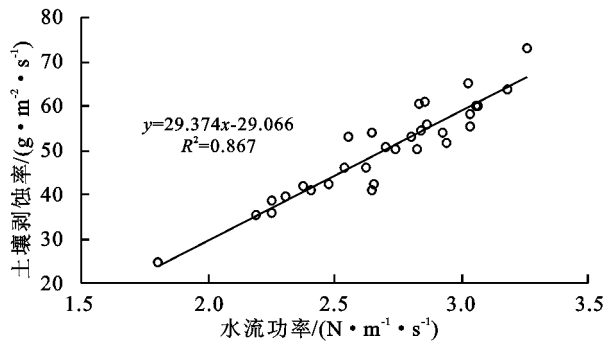


图 1 土壤剥蚀率与水流功率关系

2.3 土壤剥蚀率与水蚀因子逐步回归预测模型

运用 R×64 3.2.0 软件对水蚀因子(流量、坡度、起始解冻深度、流速、水流剪切力、水流功率和单位水流功率)与土壤剥蚀率建立逐步回归分析(R 软件的“逐步回归”计算函数 step 是以 AIC 信息统计量为准则),R 软件在利用最小二乘原理求回归模型时,对残差同时作了独立性、等方差性和正态性的假设。从软件运行结果看,残差具有相同的分布且满足模型的各假设条件;标准化残差绝对值小于 2,因此不存在异常值,表明回归方程能较好的反应土壤剥蚀率的变化规律。同时,R 软件对进入方程变量进行 P 值检验,当 P 值达到显著相关时,变量予以保留,否则变量予以剔除,当模型通过 t 检验和 P

检验且均达到显著相关时,得到最优回归方程。结果见表 3,AIC 信息统计量见表 4。

从表 3 中可以看出,当剔除未达到显著水平的变量水流剪切力、单位水流功率和流速后,建立基于流量、坡度、起始解冻深度和水流功率 4 个水蚀因子的冻融坡面土壤剥蚀率预测方程:

模型 II $Dr=-22.467+0.675Q+0.690S+0.698H+19.813\omega,(R^2=0.934)$

起始解冻深度和水流功率均达到极为显著水平;坡度只达到显著水平,而流量并不太显著。这与刘彦辰等^[17]的研究结论不同,刘彦辰等认为流量对冻融坡面土壤剥蚀率的影响大于坡度对其的影响。然而,从表 4 中可以看出,若剔除流量这一变量,模型 II 的残差平方和上升到 25.956,相对于剔除其他变量的残差平方和上升是最少的,AIC 值同时上升到 69.040,也是最少的。由此可见,流量可以剔除。若剔除坡度这一变量,残差平方和上升到 39.968,AIC

值同时上升到 71.055,上升幅度相对起始解冻深度和水流功率来说没有影响,对模型影响不大。因此,从这两项指标看来,应该剔除坡度这一变量。

由表 3 可知,当模型 III 仅引入起始解冻深度和水流功率 2 个水蚀因子作为变量时,起始解冻深度和水流功率达到极为显著水平; $t_{\omega}=15.894>t_{0.01}31=3.375,t_H=5.062>t_{0.01}31=3.375$,且 $R^2=0.930$ 与 $R^2_{\text{修}}=0.925$ 与模型 II 中的 $R^2=0.943$ 与 $R^2_{\text{修}}=0.934$ 相比稍微减小,验证了流量和坡度对模型 III 中土壤剥蚀率预测的精度影响不大。模型 III 中水流功率的标准差 1.661 相对于模型 II 中水流功率的标准差 3.190 大幅度减小,起始解冻深度标准差同时由模型 II 中的 0.120 减少到模型 III 的 0.108,说明模型 III 预测精度高于模型 II。因此,模型 III 是冻融坡面土壤剥蚀率逐步回归预测的最优的回归方程:

模型 III $Dr=-25.397+0.547H+26.403\omega,(R^2=0.925)$

表 3 土壤剥蚀率与水蚀因子逐步回归分析结果

模型	变量	回归参数估计	标准差	t	P	R ²	R ² _修
II		-22.467	4.337	-5.18	1.88×10 ⁻⁵ ***	0.943	0.934
	流量	0.675	0.351	1.92	0.065•		
	坡度	0.690	0.289	2.39	0.024*		
	解冻深度	0.698	0.120	5.83	3.29×10 ⁻⁶ ***		
	水流功率	19.813	3.190	6.22	1.20×10 ⁻⁶ ***		
III		-25.397	4.297	-5.910	2.04×10 ⁻⁶ ***	0.930	0.925
	解冻深度	0.547	0.108	5.062	2.13×10 ⁻⁵ ***		
	水流功率	26.403	1.661	15.894	7.48×10 ⁻¹⁶ ***		

注:***表示极显著;*表示显著;•表示不太显著;没有记号表示不显著; $t_{0.01}31=3.375$

表 4 土壤剥蚀率与水蚀因子逐步回归 AIC 信息统计量

模型	Step-AIC	变量	自由度	残差平方和	回归平方和	AIC
II	66.93				189.60	66.934
		流量	1	25.956	215.56	69.040
		坡度	1	39.968	229.57	71.055
		解冻深度	1	238.908	428.51	91.026
		水流功率	1	271.263	460.86	93.356

2.4 冻融坡面土壤剥蚀率不同模型预测结果对比

将冻融坡面径流冲刷土壤剥蚀率实测值与单因子模型预测值、逐步回归模型预测值和 BP 神经网络模型预测值进行对比分析,结果见表 5。

从表 5 可以看出,BP 神经网络模型预测的土壤剥蚀率与实测值误差最小,平均误差 2.848%,决定

系数最高($R^2=0.954$);逐步回归模型预测值平均误差 4.820%,决定系数($R^2=0.925$);单因子模型预测值平均误差 5.298%,决定系数最低($R^2=0.867$),BP 神经网络模型预测精度高于逐步回归模型预测精度和单因子模型预测精度。

表 5 不同模型模拟值与实测值对比结果

指标	实测值	单因子模型		逐步回归模型		BP 神经网络模型	
		预测值	误差/%	预测值	误差/%	预测值	误差/%
均值	50.431	50.431	5.298	50.431	4.820	50.677	2.848
决定系数(R ²)		0.867		0.925		0.954	

3 结论

(1)影响冻融坡面土壤剥蚀率的水蚀因子显著性从大到小排序为水流功率>单位水流功率>起始解

冻深度>水流剪切力>流量>流速>坡度;水流功率 ω 是描述冻融坡面径流输沙过程最好的水动力学参数: $D_r=29.374(\omega-0.990),R^2=0.867$ 。

(2)影响冻融坡面土壤剥蚀率的水蚀因子显著性排序为水流功率>起始解冻深度>坡度>流量;建立了冻融坡面以解冻深度 H 与水流功率 ω 的土壤剥蚀率预测方程: $D_r = -25.397 + 0.547H + 26.403\omega$, $R^2 = 0.925$ 。

(3)基于 BP 神经网络模型($R^2 = 0.954$)能更准确地预测出冻融坡面土壤剥蚀率的高度复杂性,其预测精度优于逐步回归模型($R^2 = 0.925$)及单因子模型($R^2 = 0.867$)。

本文是以历经一个冬季冻融循环的野外径流小区为研究对象,在春季解冻期模拟野外径流冲刷试验,更接近春季解冻期实际情况,因此本文具有研究的深入性和推广性。

参考文献:

- [1] 李占斌,李社新,任宗萍,等.冻融作用对坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):56-60.
- [2] 周丽丽,范昊明,武敏,等.白浆土春季解冻期降雨侵蚀模拟[J].土壤学报,2010,47(3):574-578.
- [3] 刘佳,范昊明,周丽丽,等.春季解冻期降雨对黑土坡面侵蚀影响研究[J].水土保持学报,2009,23(4):64-67.
- [4] 魏霞,李勋贵,Huang C H.交替冻融对坡面产流产沙的影响[J].农业工程学报,2015,31(13):157-163.
- [5] 范昊明,武敏,周丽丽,等.草甸土近地表解冻深度对融雪侵蚀影响模拟研究[J].水土保持学报,2010,24(6):28-31.
- [6] 管新建,李占斌,王民,等.坡面径流水力侵蚀因子室内试验及模糊贴近度分析[J].农业工程学报,2007,23(6):1-6.

(上接第 126 页)

参考文献:

- [1] 马国霞,於方,曹东,等.中国农业面源污染物排放量计算及中长期预测[J].环境科学学报,2012,32(2):489-497.
- [2] Carpenter S R. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen[J]. Ecological Applications,1998,8(3):559-568.
- [3] 张福锁,王激清,张卫峰,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,45(5):915-924.
- [4] 吴永红,胡正义,杨林章.农业面源污染控制工程的“减源—拦截—修复”(3R)理论与实践[J].农业工程学报,2011,27(5):1-6.
- [5] Borin M, Vianello M, Morari F, et al. Effectiveness of buffer strips in removing pollutants in runoff from a cultivated field in North-East Italy[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,2005,105(1):101-114.
- [6] 林新坚,黄东风,李卫华,等.施肥模式对茶叶产量,营养累积及土壤肥力的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(2):151-157.
- [7] 杨正超.丘陵地区茶园径流氮磷流失控制技术工程及效

- [7] 王瑄.坡面水蚀输沙动力过程试验研究[D].西安:西安理工大学,2008.
- [8] 吴秋菊,吴发启,王林华.土壤结皮坡面流水动力学特征[J].农业工程学报,2014,30(1):73-80.
- [9] 张光辉,刘宝元,张科利.坡面径流分离土壤的水动力学试验研究[J].土壤学报,2002,39(6):882-886.
- [10] 张新和.黄土坡面片蚀—细沟侵蚀—切沟侵蚀演变与侵蚀产沙过程研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [11] 吴淑芳,吴普特,宋维秀,等.黄土坡面径流剥离土壤的水动力过程研究[J].土壤学报,2010,47(2):223-228.
- [12] 陆绍娟,王占礼,谭贞学.黄土坡面细沟水流剪切力及其侵蚀效应研究[J].水土保持通报,2013,33(6):46-49.
- [13] 王瑄,李占斌,尚佰晓,等.坡面土壤剥蚀率与水蚀因子关系室内模拟试验[J].农业工程学报,2008,24(9):22-26.
- [14] 王瑄,李占斌,李雯,等.土壤剥蚀率与水流功率关系室内模拟试验[J].农业工程学报,2006,22(2):185-187.
- [15] 王瑄,李占斌,鲁克新,等.坡面水蚀动力因子与土壤剥蚀率灰色关联分析[J].水利学报,2005,36(5):525-530.
- [16] 刘彦辰,王瑄,周丽丽,等.冻融坡面土壤剥蚀率主要影响因素分析[J].水土保持研究,2016,23(2):1-5.
- [17] 刘彦辰,王瑄,周丽丽,等.冻融坡面土壤剥蚀率与侵蚀因子关系分析[J].农业工程学报,2016,32(8):136-141.
- [18] 赵明伟,汤国安,李发源,等.基于 BP 神经网络的陕北黄土高原侵蚀产沙影响因子显著性研究[J].水土保持通报,2012,32(1):5-9.
- [19] 蔡强国.小流域侵蚀产沙过程模型[C]//中国水利学会泥沙专业委员会.第二届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集.北京:中国建材工业出版社,1995:233-238

果[D].杭州:浙江大学,2013.

- [8] 刘宗岸.坡地茶园集水区地表径流氮磷流失及其生态综合控制研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [9] 杨丽霞,杨桂山,苑韶峰,等.影响土壤氮素径流流失的因素探析[J].中国生态农业学报,2007,15(6):190-194.
- [10] 虞海波,刘强,彭建伟,等.有机无机肥配施及稻草覆盖对中南丘陵茶园氮磷径流流失的影响[J].湖南农业科学,2015,(1):56-59,63.
- [11] 蒋翔.秸秆覆盖对桃—大豆套种地表径流及 N、P 流失的影响[J].水土保持学报,2015,29(6):41-44.
- [12] 王京文,孙吉林,张奇春,等.西湖名胜区茶园地表径流水的氮磷流失研究[J].浙江农业学报,2012,24(4):676-679.
- [13] 龚蓉,刘强,荣湘民,等.中南丘陵旱地磷肥减量对不同形态磷素养分淋失的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):106-110.
- [14] 彭晚霞,宋同清,邹冬生,等.覆盖与间作对亚热带丘陵茶园生态的综合调控效果[J].中国农业科学,2008,41(8):2370-2378.