

DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2021.02.008

## 数据去噪处理在土壤侵蚀模拟分析中的应用

杨茹珍<sup>1</sup> 张风宝<sup>1,2</sup> 杨明义<sup>1,2</sup> 李占斌<sup>2,3</sup>

(1.西北农林科技大学 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;  
2.中国科学院-水利部 水土保持研究所 陕西 杨凌 712100; 3.西安理工大学 水利水电学院 陕西 西安 710048)

**摘要:** 对已发表的土壤侵蚀数据采用信噪比进行去噪处理,对比分析去噪前后数据在研究影响因子对因变量影响的显著性、贡献率及拟合优度等方面的差异,确定去噪方法对土壤侵蚀相关试验的适用性。结果显示:去噪前后的数据都能识别出土壤侵蚀速率、径流速率、流速及径流输移能力等因变量变化的主导因子,但去噪处理能增加影响因子对观测变量的贡献率,降低误差项的贡献率,明显增大预测值与实测值之间的决定系数、Nash-Sutcliffe效率系数及相对均方根误差,减小预测值与实测值之间的绝对误差和相对误差。说明去噪处理能有效提高影响因子对观测因变量的解释程度,减小试验误差对试验结果的影响,确保试验结果的准确性。

**关键词:** 田口方法; 信噪比; 数据去噪; 土壤侵蚀

中图分类号: S157 文献标识码: A 文章编号: 0468-155X(2021)02-0047-07

土壤侵蚀是全球性的重大环境问题,受气象、水文、生物、地形地貌、土壤类型和人类活动等众多因素的影响,过程极其复杂<sup>[1-3]</sup>。为了认识各影响因素对土壤侵蚀过程的影响规律,揭示土壤侵蚀机理,国内外学者开展了大量的土壤侵蚀试验研究<sup>[4]</sup>,但因采用的研究方法、研究手段和研究对象不同以及土壤侵蚀的复杂性和影响因素的多样性<sup>[5]</sup>,试验过程难以完全有效控制,所得试验数据包含一定的噪音(误差),对分析结果产生了影响,可能导致试验结论的不可靠。选择合适的数据处理方法降低或去除数据噪音,可能会得到更为准确的分析结果。田口方法是利用正交表来设计试验方案,将造成产品质量波动的干扰因素用误差来代替,引入信噪比  $S/N$  (signal-to-noise ratio) 作为衡量产品安定性的指标,使系统在同等情况下找出调整型最好、抗干扰能力最强、安定性最好的设计方案<sup>[6]</sup>。该方法从最初的产品质量控制领域发展到航空、机械工程、生物、生态、体育等多领域<sup>[7]</sup>。在设计产品中,每一件产品都有其标准的理论值和实际值,在生产过程中实际值跟理论值的差异可以视为噪度因子<sup>[8]</sup>。信噪比是田口博士将通讯行业中的信噪比定义(因子的信号/因子的杂音)应用到实验分析中,依据信噪比的原始定义和所对应的质量特性不同,其计算公式分为望目特性的信噪比、望小特性的信噪比和望大特性的信噪比<sup>[9,10]</sup>。基于信噪比的田口方法,在众多领域内大量应用,保证了试验设计的稳健性,降低了噪音对试验结果的影响,得到比较可靠的试验结果,有效提高了试验效率。近年来田口方法在土壤侵蚀试验研究中也应用, Sadeghi 等<sup>[9]</sup>首先利用田口方法研究了土壤质地、坡向和植被盖度对土壤侵蚀的影响,并估算了各影响因素对土壤侵蚀速率变化的贡献率。Sun 等<sup>[11]</sup>、孙宝洋等<sup>[12]</sup>基于田口方法分析了坡度、流量和冻融循环次数对土壤分离能力的影响。Zhang 等<sup>[13]</sup>、张风宝等<sup>[14]</sup>通过对比分析田口方法、全因子设计及正交设计的试验结果,认为田口方法在研究坡面细沟间侵蚀时能够代替全因子设计。然而,目前这些研究都是利用信噪比对田口方法中正交设计的试验数据进行处理,进而分析试验结果。既然利用

收稿日期: 2019-02-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402406); 国家自然科学基金项目(41877080, 41671281)

作者简介: 杨茹珍(1994-),女,陕西渭南人,硕士,主要从事坡面土壤侵蚀过程研究。E-mail: 1323103747@qq.com

通讯作者: 张风宝。E-mail: fbzhang@nwsuaf.edu.cn

信噪比仅对正交设计的试验数据进行处理就能得到比较理想的试验结果,如将全因子设计的试验数据利用田口方法提出的信噪比进行处理,可能会得到更为准确的试验结果,但目前这方面的研究还未见报道。因此,本文基于已发表的涉及不同试验尺度、试验类型及试验参数的全因子设计下的土壤侵蚀试验数据集,采用田口方法的信噪比对数据进行处理,对比分析处理前后数据方差分析的结果,确定去噪处理对试验数据分析结果的影响,为深入挖掘土壤侵蚀试验数据及揭示土壤侵蚀规律提供基础支撑。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验数据来源

本研究收集四篇公开发表论文的数据,这些数据涉及到自变量因子(坡长、坡度、砾石含量、雨强、盖度、流量)对坡面土壤的因变量因子(侵蚀速率、径流速率、流速、输移能力)的影响,每个数据集至少是 3 因子 3 水平的完全组合试验。原始数据是通过论文中的数据表或者用 Get Data Graph Digitizer (version 2.24, Russian Federation) 软件从论文的图中摘录。四个数据集具体为:

(1) 数据集一:邓利强等<sup>[15]</sup>为研究工程堆积体的土壤侵蚀过程及其机理采用 3 因子 4 水平的全因子组合人工模拟降雨试验。3 因子分别为雨强(1.0、1.5、2.0、2.5 mm/min)、坡长(3、5、6.5、12 m)和砾石(直径为 1~2 cm)含量(0%、10%、20%、30%),土槽宽为 1.5 m,根据 336 个工程堆积体的调查,设定试验坡度为 25%;试验用土为陕西关中地区表层以下 2 m 深的壤土。按照全因子组合共 64 场试验,试验设计无重复。试验涉及的因变量参数有土壤侵蚀速率、径流速率和流速。

(2) 数据集二:Meyer 和 Harmon<sup>[16]</sup>针对垄坡长度和坡度对边坡侵蚀的影响进行了 4 因子 4 水平的全因子组合人工模拟降雨试验研究。4 个自变量因子分别为土壤类型(Brooksville(BRK)、Dubbs(DUB)、Atwood(ATW)和 Loring(LOR))、坡长(0.15、0.3、0.45 和 0.6 m)、坡度(5%、10%、20%和 30%)和雨强(极低(13.6~14 mm/h)、低(26.4~27 mm/h)、中等(74.3~76.3 mm/h)和高(112~115 mm/h))。小区宽 0.3 m。共计 256 场试验,其中 2 场试验没有数据,有效试验为 254 场,采用每场试验 2 次重复的平均值进行分析。试验涉及的因变量参数有土壤侵蚀速率。

(3) 数据集三:曹颖等<sup>[17]</sup>采用变坡实验水槽在较大坡度(5°~25°)、流量(0.25~2 L/s)和盖度(0%~25%)范围内,系统研究了坡面流平均流速与盖度、坡度、流量之间的关系。3 个自变量分别为坡度、盖度和流量。实验设计的 5 个坡度( $S$ )为 5°、10°、15°、20°和 25°;5 个流量( $Q$ )为 0.25、0.5、1.0、1.5 和 2.0 L/s;6 个盖度( $Cr$ )为 0%、5%、10%、15%、20%和 25%。按照全因子设计共进行了 150 组试验,涉及的因变量参数为径流流速,在每场组合实验中测定 12 个流速,去掉最大值和最小值,用平均值进行分析。此数据是从 Get Data Graph Digitizer 图中摘录。

(4) 数据集四:张光辉等<sup>[18]</sup>利用液压式水槽模拟陡坡冲刷后泥沙粒径对径流输移能力的影响。此试验为 3 因子 5 水平的完全组合试验,其中试验控制的自变量因子为单位流量( $0.66 \times 10^{-3}$ 、 $1.32 \times 10^{-3}$ 、 $2.63 \times 10^{-3}$ 、 $3.95 \times 10^{-3}$ 和  $5.26 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ )、坡度(8.7%、17.4%、25.9%、34.2%和 42.3%)和泥沙粒径大小(0.10、0.22、0.41、0.69 和 1.16 mm)。按照全因子设计共计 125 场试验,试验涉及的因变量参数为径流输移能力,试验无重复,但每场试验取 5 个样,其平均值代表此场试验的径流输移能力。

### 1.2 研究方法

本文采用田口方法中的信噪比对实验数据进行数据去噪处理,将去噪处理前后数据分析结果进行对比,来说明去噪处理对试验结果的影响。

依据田口方法,信噪比( $S/N$ )的计算分为 3 类,分别为望小特性、望大特性和望目特性。根据已有研究<sup>[12-14]</sup>,土壤侵蚀研究中选择越大越好的望大特性。信噪比望大特性的计算公式为<sup>[19]</sup>:

$$S/N = -10 \times \lg \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{O_i} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中: $N$ 为试验的重复次数; $O_i$ 为试验中第  $i$  场试验的实际观测值,即试验中的因变量(本研究中的坡面径流速率、侵蚀速率、流速及径流输移能力)。

首先利用式(1)计算出各因变量的信噪比( $S/N$ ),分别对原始数据及去噪数据进行方差分析,得到自变量因子对因变量影响的显著性以及总离差平方和( $SS_T$ )、各因子离差平方和( $SS_F$ )、误差平方和( $V_{Er}$ )及因子的自由度( $DF$ ),利用下式估算各个影响因子的贡献率( $PC$ ):

$$PC = \frac{SS_T - (DF \times V_{Er})}{SS_T} \quad (2)$$

同时根据方差分析预测出有关原始数据和信噪比( $S/N$ )的预测值,记为 $A$ 和 $B$ 。对信噪比( $S/N$ )预测值( $B$ )通过式(1)反推得出各因变量实际观测值去噪后的预测值,作为去噪处理后数据的实际预测值( $C$ ),将原始数据的预测值( $A$ )和去噪处理后预测值( $C$ )与实测值进行对比分析。

### 1.3 评价指标

利用 Nash-Sutcliffe 效率系数、相对均方根误差( $RRMES$ )以及决定系数( $R^2$ )对数据去噪前后预测的坡面土壤侵蚀速率、径流速率、流速及输移能力与实测值的相符程度进行评价,来说明基于方差分析的预测值与原始数据间关系之间的吻合程度和拟合优度。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 数据集基本特征描述

表1为四个数据集因变量的基本统计参数。四个数据集中试验次数最少为64次(数据集一),最多为254次(数据集二)。数据集所涉及的8个因变量观测值的变异性系数在0.384~1.337之间,除数据集二因变量侵蚀速率属于强变异性外(大于1),其他因变量都属于中等变异性(0.1~1);整体上径流速率和流速的变异性相对较小,而侵蚀速率和径流输移能力的变异性相对较大。所有因变量的偏度值都大于0,属于右偏态,说明数据位于均值右边的比位于左边的少,即因变量值较小的样本占多数;相对而言,因变量径流速率的偏度值较小,接近正态分布。数据集变量的峰度值除径流速率外,其他都为正值,即径流速率分布的峰比较扁平,数据之间的变异性较小,而其他变量分布的峰比较陡峭,数据之间差异性大。通过Kolmogorov-Smirnov( $K-S$ )正态分布检验发现本研究所有的因变量都不具有正态分布特征性,其中数据集一的侵蚀速率、数据集四的输移能力呈指数分布。

表1 基于不同试验条件下各因变量的基本统计值

Table 1 Basic statistical values of each dependent variable in different experiments

数据集	因变量	统计参数								
		样本	最大值	最小值	均值	标准差	变异系数	偏度	峰度	分布类型
一	侵蚀速率	64	32.130	0.655	8.084	7.547	0.934	1.273	1.029	E(0.833)
	径流速率	64	149.379	34.840	79.836	30.656	0.384	0.286	-1.006	NN(0.022)
	流速	64	0.524	0.047	0.140	0.087	0.621	1.779	4.784	NN(0.001)
二	侵蚀速率	254	9.291	0.001	1.440	1.925	1.337	1.825	3.318	NN(0.000)
三	流速	150	1.350	0.100	0.510	0.250	0.490	1.153	1.299	NN(0.000)
四	输移能力	125	9.530	0.040	2.521	2.476	0.982	0.948	-0.328	E(0.140)

注: E表示分布类型服从指数分布, NN表示分布类型不服从正态分布, 括号内为 $K-S$ 检验值。

### 2.2 数据去噪前后方差分析的结果对比

通过对原始数据和去噪数据进行方差分析,获得各影响因素对因变量影响的显著性、决定系数 $R^2$ 和调整的 $R^2$ 的变化,并结合式(2)计算各影响因素对因变量变化的贡献率( $PC$ )。结果见表2,所有数据集数据去噪前后经方差分析得到各影响因素(坡长、坡度、砾石含量、雨强、盖度、流量、土壤类型)对观测因变量(侵蚀速率、径流速率、流速、输移能力)都有极显著的影响( $P < 0.01$ ),相对于原始数据所得结果,去噪数据得到的显著性 $P$ 值更小。

原始数据方差分析的 $R^2$ 和调整的 $R^2$ 分别分布在0.796~0.955之间和0.785~0.947之间,平均值分别为 $0.862 \pm 0.061$ 和 $0.845 \pm 0.067$ ,变异系数分别为0.071和0.079。去噪数据方差分析的 $R^2$ 和调整 $R^2$ 分别分布在0.904~0.981之间和0.888~0.980之间,平均值分别为 $0.960 \pm 0.030$ 和 $0.954 \pm$

0.036, 变异系数分别为 0.029 和 0.035。去噪数据所得的  $R^2$  和调整  $R^2$  明显高于原始数据所得的结果 ( $P < 0.05$ ), 变异性明显小于原始数据所得结果,  $R^2$  和调整  $R^2$  之间的差值也小于原始数据所得结果。 $R^2$  和调整的  $R^2$  是评价方差分析所得模型拟合优劣的主要指标, 其值在 0~1 之间, 越接近 1 且二者差值越小说明方差分析所得模型的拟合度越好。以上数据充分说明去噪后数据的方差分析所得模型明显优于原始数据, 更能准确解释观测因变量对影响因素的响应。

表 2 基于方差分析中各个自变量因子对因变量因子影响的因子贡献率和显著性

Table 2 Contribution rate and significance of independent variables act on dependent variables based ANOVA

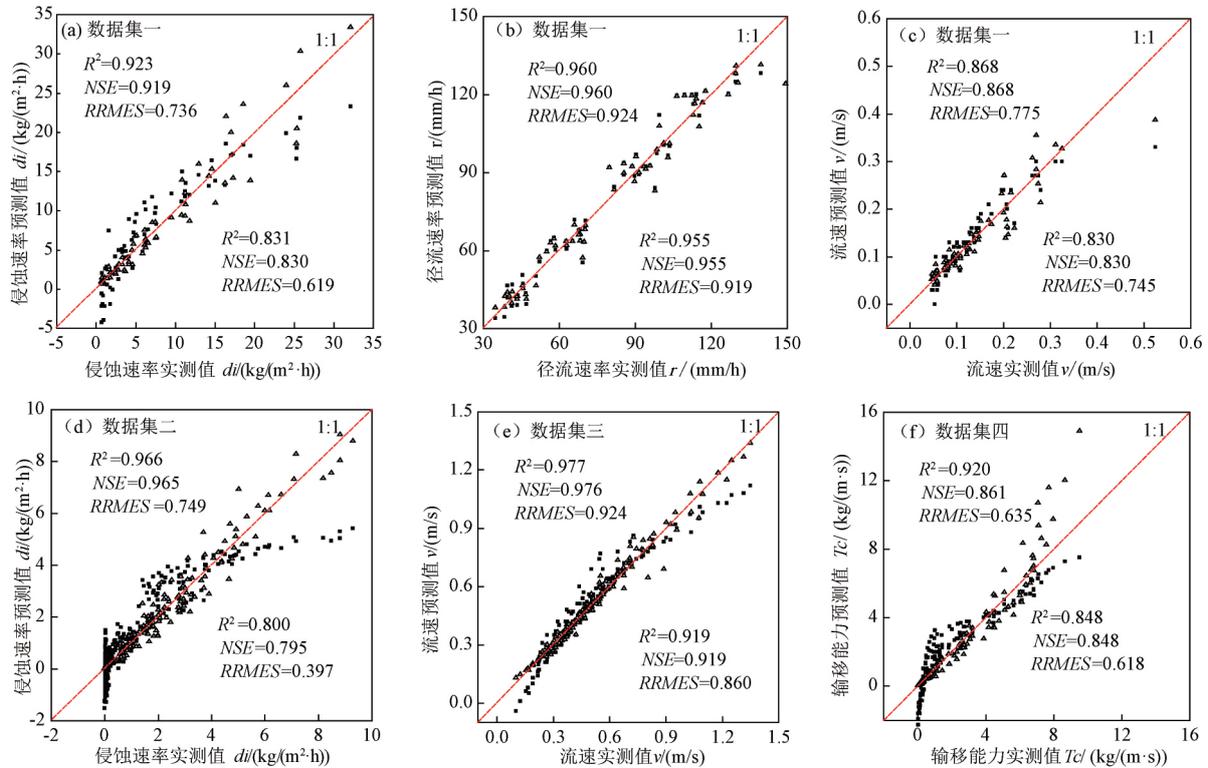
数据集	变量	数据类型	来源	显著性	贡献率/%	$R^2$	调整 $R^2$	数据类型	显著性	贡献率/%	$R^2$	调整 $R^2$
一	侵蚀率	原始数据	坡长	0.000	12.80	0.831	0.802	去噪数据	0.000	7.22	0.949	0.941
			砾石含量	0.000	10.19							
			雨强	0.000	57.24							
			误差		19.77							
	径流速率	原始数据	坡长	0.006	0.91	0.955	0.947	去噪数据	0.000	1.24	0.968	0.963
			砾石含量	0.004	0.99							
			雨强	0.000	92.81							
			误差		5.28							
	流速	原始数据	坡长	0.000	59.83	0.826	0.797	去噪数据	0.000	69.83	0.904	0.888
			砾石含量	0.001	5.12							
			雨强	0.000	14.77							
			误差		20.26							
二	侵蚀率	原始数据	土壤类型	0.000	2.83	0.796	0.785	去噪数据	0.000	1.75	0.981	0.980
			坡长	0.001	1.26							
			坡度	0.000	8.76							
			雨强	0.000	65.91							
			误差		21.47							
三	流速	原始数据	流量	0.000	25.84	0.918	0.910	去噪数据	0.000	29.77	0.980	0.978
			盖度	0.000	48.73							
			坡度	0.000	16.48							
			误差		8.96							
四	输移能力	原始数据	中值粒径	0.000	2.91	0.848	0.831	去噪数据	0.000	4.13	0.978	0.976
			流量	0.000	43.67							
			坡度	0.000	36.55							
			误差		16.88							

对比分析原始数据和去噪后数据所得影响因子对因变量变化贡献率的结果, 发现整体上去噪前后的数据都能有效识别出观测因变量变化的主导因子, 但数据去噪后主导因子的贡献率基本上都大于原始数据的计算值。去噪后数据中的误差项对因变量变化的贡献率明显小于原始数据的计算值, 这说明数据去噪处理后有效降低了不可控制因素(噪音因子/误差)对因变量变化的贡献, 增大了其他主要自变量因子的贡献, 提高了影响因素对观测因变量的解释程度。对于影响因素贡献率大小的排序而言, 除数据集一的径流率数据外, 其他数据集去噪处理后不同因子对因变量观测值变化的贡献率排序与原始数据的排序保持一致。数据集一的径流速率, 原始数据中不同因子对径流速率变化的贡献率排序为: 坡长(0.91%) < 砾石含量(0.99%) < 雨强(92.81%), 误差为 5.28%, 去噪后因子贡献率排序为砾石含量(1.07%) < 坡长(1.24%) < 雨强(97.32%); 虽然去噪后因子贡献率的排序与原始数据不一致, 但其误差的贡献率远远小于原始数据, 只有 0.37%, 坡度、砾石含量和坡长的贡献率增加, 尤其是坡度的贡献明显大于原始数据的计算值。对于本研究中涉及到降雨的试验, 雨强基本主导了观测变量的变化, 其对观测变量的贡献都超过 50%; 尤其对坡面径流速率, 雨强对其变化的贡献超过 90%, 且去噪前后计算的结果比较接近。对于水槽试验, 影响因素的贡献率相对比较均衡, 贡献率都在 50% 以下。

2.3 数据去噪前后方差分析的预测结果对比

对于基于原始数据和去噪数据获得的观测变量的预测值与原始实测数据进行对比, 结果如图 1 所示。整体上看, 无论是基于原始数据还是去噪数据, 所有观测变量预测值与实测值之间呈显著的正相关关系

( $P < 0.5$ )。对所有因变量而言,原始数据得到的预测值与实测值之间的  $R^2$  在 0.800~0.955 之间,平均值为  $0.864 \pm 0.060$ ,变异系数为 0.070; $NSE$  在 0.795~0.955 之间,平均值为  $0.863 \pm 0.061$ ,变异系数为 0.071; $RRMES$  在 0.397~0.919 之间,平均值为  $0.693 \pm 0.190$ ,变异系数为 0.274。数据去噪后得到的预测值与实测值之间的  $R^2$  在 0.868~0.977 之间,平均值为  $0.936 \pm 0.041$ ,变异系数为 0.044, $NSE$  在 0.861~0.976 之间,平均值为  $0.925 \pm 0.051$ ,变异系数为 0.055; $RRMES$  在 0.635~0.924 之间,平均值为  $0.791 \pm 0.114$ ,变异系数为 0.144。基于原始数据获得预测值与实测值之间的  $R^2$ 、 $NSE$  和  $RRMES$  明显小于数据去噪后的预测值与实测值之间的参数,其中  $R^2$  和  $NSE$  呈现显著差异( $P < 0.05$ ),去噪数据所得的 3 个评价指标的变异性也明显小于原始数据所得的结果。



(图中左上角评价指标为数据去噪处理的预测值,右下角为原始数据预测值)

图 1 基于原始数据和去噪数据获得的观测变量的预测值与原始实测数据对比

Fig.1 Comparison between predicted values of observation and measured values based on data before and after denoising

预测值与实测值之间的相对误差和绝对误差也是评价预测结果优劣的主要指标,这两种误差计算方法能够确切地表示预测值偏离实测值的实际大小以及反映数据处理的可靠程度。图 2 和图 3 是五个数据集数据去噪前后预测结果与实测值之间的相对误差和绝对误差的箱线图,图中清晰地显示:无论是相对误差还是绝对误差,基于去噪数据所得误差结果明显小于基于原始数据所得结果,说明数据去噪处理在一定程度上能够消除不可控因素(误差)对试验结果的影响,更为真实地反映影响因素对观测变量的影响。

整体上看,去噪处理数据比原始数据所得结果明显更能反应出影响因素和观测因变量之间的关系,但去噪处理对不同的观测因变量的效果不同。在本研究中,对于径流速率而言去噪处理对分析结果没有实质性影响,去噪前后各种评价指标( $R^2$ 、 $NSE$ 、 $RRMES$ 、相对误差和绝对误差)的变化并不明显;而去噪处理对侵蚀速率和径流输移能力分析结果的影响非常明显,去噪数据所获得的评价指标明显优于原始数据。出现这种现象主要由因变量变化对应变量响应是否复杂所决定。如径流速率,其变化的 90% 以上由雨强控制,其他因素对其变化的贡献很小,这种情况下产生的误差就比较小;而对土壤侵蚀速率,其影响因素复杂且存在交互作用,多个因子贡献相差不大,加之侵蚀过程中土块分离、坡面微地形变化

等都存在一定的偶然性和随机性,也直接影响侵蚀速率,导致观测因变量变化的复杂性,存在噪音。去噪处理对变化复杂的因变量的效果比较明显,而对变化简单的因变量无明显效果。

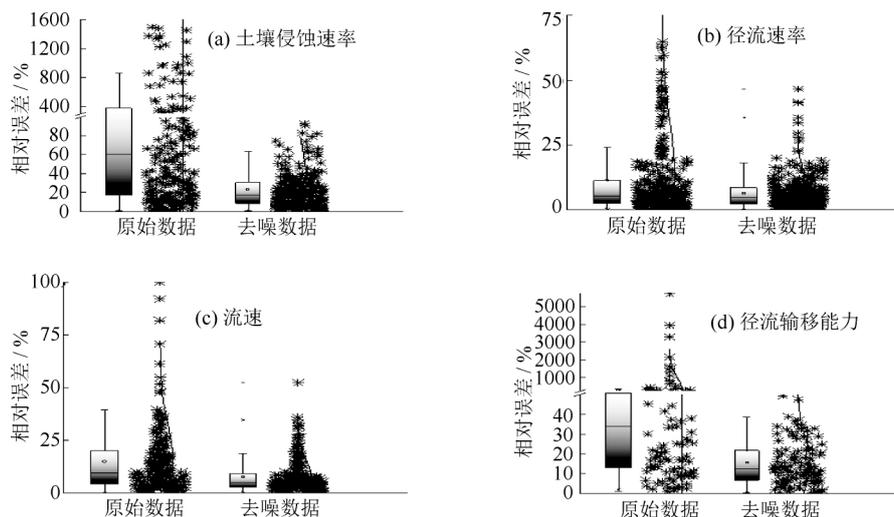


图 2 数据去噪前后预测结果的相对误差分析对比

Fig.2 Comparison of relative error of predicted values between the data before and after denoising

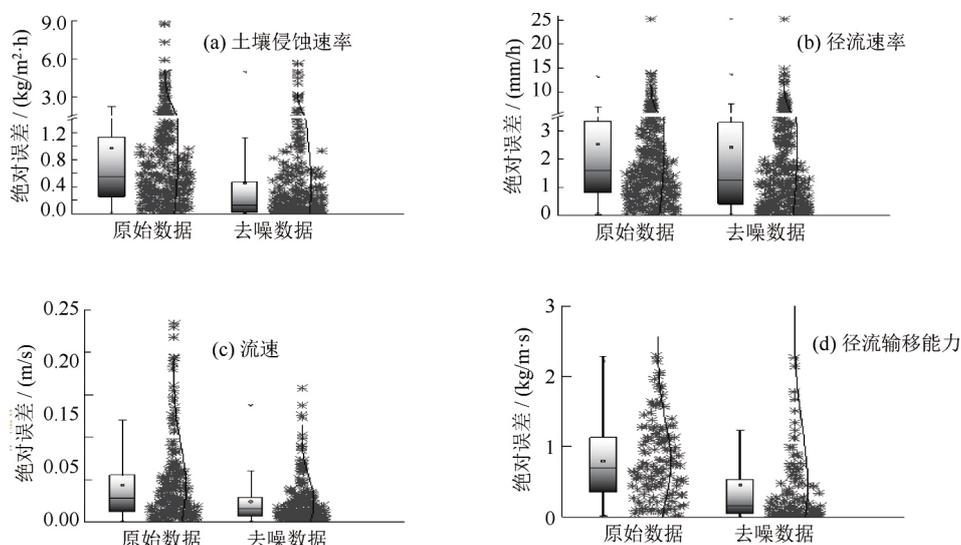


图 3 数据去噪前后预测结果的绝对误差分析对比

Fig.3 Comparison of absolute error of predicted values of data before and after denoising

### 3 结论

在研究各影响因素对土壤侵蚀过程的影响规律以及揭示土壤侵蚀机理时,由于采用的研究方法、研究手段和研究对象不同和土壤侵蚀的复杂性和影响因素的多样性,试验数据包含一定的噪音(误差),对分析结果产生了影响存在偏差。基于田口方法中的信噪比公式,分别对不同条件下土壤侵蚀相关试验的数据集进行数据去噪处理,并对去噪前后的数据分析结果进行对比。去噪前后数据分析得到的土壤侵蚀试验中各影响因子对侵蚀速率、径流速率、流速以及输移能力的贡献率、显著性等结果基本一致。去噪处理增强了影响因子对观测因变量影响的显著性;减少了误差项的贡献率而增大了其他主要影响因子的贡献率,增加了方差分析所得模型拟合优度进而提高了影响因子对观测因变量的解释程度,更能准确揭示观测因变量对影响因素的响应。

致谢: 本文在数据收集处理过程中得到了张加琼老师的指导和帮助, 在此表示感谢!

#### 参考文献:

- [ 1 ] 郑粉莉, 王占礼, 杨勤科. 土壤侵蚀学科发展战略[J]. 水土保持研究, 2004( 4 ): 1-10.
- [ 2 ] Meyer L D. Evolution of the universal soil loss equation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1984, ( 39 ): 99-104.
- [ 3 ] 张辉, 李鹏, 汤珊珊, 等. 多场次降雨条件下覆沙坡面的径流产沙特性试验研究[J]. 泥沙研究, 2016( 6 ): 59-65.
- [ 4 ] 赖奕卡. 坡面土壤侵蚀影响因子研究进展[J]. 亚热带水土保持, 2008( 1 ): 12-16.
- [ 5 ] 丁文峰. 紫色土和红壤坡面径流分离速度与水动力学参数关系研究[J]. 泥沙研究, 2010( 6 ): 16-22.
- [ 6 ] Taguchi G. Introduction to quality engineering [M]. New York: McGraw-Hill, 1990.
- [ 7 ] 林秀雄. 田口方法实战技术[M]. 深圳: 海天出版社, 2004.
- [ 8 ] 张健. “信噪比-两步法”的一个注记[J]. 苏州大学学报( 自然科学版), 2004( 2 ): 1-4.
- [ 9 ] Sadehi S H, Moosavi V, Karami A, et al. Soil erosion assessment and prioritization of affecting factors at plot scale using the Taguchi method [J]. Journal of Hydrology, 2012, 448/449: 174-180.
- [ 10 ] 钟晓芳, 韩之俊. 关于田口方法中望大特性信噪比的改进[J]. 南京理工大学学报( 自然科学版), 2004( 1 ): 109-112.
- [ 11 ] Sun B Y, Xiao J B, Li Z B, et al. An analysis of soil detachment capacity under freeze-thaw conditions using the Taguchi method [J]. Catena, 2018, 162: 100-107.
- [ 12 ] 孙宝洋, 肖俊波, 刘晨光, 等. 季节性冻融区解冻期土壤分离能力影响因素研究[J]. 泥沙研究, 2018, 43( 1 ): 51-57.
- [ 13 ] Zhang F B, Wang Z L, Yang M Y. Assessing the applicability of the Taguchi design method to an interrill erosion study [J]. Journal of Hydrology, 2015, 521: 65-73.
- [ 14 ] 张凤宝, 杨明义, 李占斌. 微小区土壤侵蚀试验中田口方法代替全因子设计的可行性分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31( 13 ): 1-9.
- [ 15 ] 邓利强. 黄土区工程堆积体水蚀特征及测算模型坡长因子实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [ 16 ] Meyer L D, Harmon W C. How row-sideslope length and steepness affect sideslope erosion [J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32( 2 ): 639-644.
- [ 17 ] 曹颖, 张光辉, 唐科明, 等. 地表覆盖对坡面流速影响的模拟试验[J]. 山地学报, 2011, 29( 6 ): 654-659.
- [ 18 ] Zhang G H, Wang L L, Tang K M. Effects of sediment size on transport capacity of overland flow on steep slopes [J]. Hydrological Sciences Journal, 2011, 56( 7 ): 1289-1299.
- [ 19 ] Aber S, Salari D, Parsa M R. Employing the Taguchi method to obtain the optimum conditions of coagulation-flocculation process in tannery wastewater treatment [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 162( 1 ): 127-134.

### Application of data denoising on analysis results of soil erosion simulation

YANG Ru-zhen<sup>1</sup>, ZHANG Feng-bao<sup>1, 2</sup>, YANG Ming-yi<sup>1, 2</sup>, LI Zhan-bin<sup>2, 3</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling 712100, China; 3. Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The signal-to-noise ratio ( $S/N$ ) was applied in data denoising of published soil erosion data, and the differences in the significance, contribution rate and fitting degree of influence factors on dependent variables obtained from before and after data denoising were compared and analyzed to determine the applicability to soil erosion tests. Results show that the main influence factors, such as erosion rate, runoff rate, flow rate and sediment transport capacity, could be identified by the data before and after denoising. However, the data denoising could increase the contribution rate of influence factors to the observed variables, reduce the contribution rate of the experiment errors, significantly increase the determination coefficient, Nash-sutcliffe efficiency (下转第 14 页)

- [12] 许婷, 孙连成. 天津港外航道水动力条件及工程泥沙淤积研究[J]. 中国港湾建设, 2008(1): 26-30.
- [13] 李文. 天津港航道通过能力仿真研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [14] 孙连成. 淤泥质海岸天津港工程泥沙治理与功效[J]. 水运工程, 2009(4): 10-18.
- [15] Xu D, Bai Y, Ji C, et al. Experimental study of the density influence on the incipient motion and erosion modes of muds in unidirectional flows: The case of Huangmaohai Estuary [J]. Ocean Dynamics, 2015, 65(2): 187-201.
- [16] 洪大林, 高亚军, 谢瑞. 波浪作用下的淤泥起动试验研究[C]//全国泥沙基本理论研究学术讨论会. 郑州: 黄河水利出版社, 2005: 228-238.
- [17] 徐宏明, 冯玉林. 黄骅港工程泥沙问题研究[J]. 泥沙研究, 1998(1): 22-31.
- [18] 陈淑青. 浅谈黄骅港海域泥沙特性及演变[J]. 中国港湾建设, 2018, 38(9): 11-15.
- [19] 张小峰, 崔承章. 泥沙起动判别条件和推移质输沙率[J]. 泥沙研究, 1996(2): 35-38.
- [20] 周益人, 尹畅安. 波浪边界层下的泥沙起动[J]. 泥沙研究, 2004(1): 15-22.

## Numerical study on wave transformation and sediment transport in a compound waterway channel

XU Dong<sup>1</sup>, WU Yun-feng<sup>1</sup>, BAI Yu-chuan<sup>1</sup>, JI Ze-zhou<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. First Harbor Consultants Co. Ltd. of China Communications Construction Company, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** The compound channel divides the waterway for large and small ships by excavating two parallel shallow water channels on both sides of the original deep water channel, which can efficiently improve the navigation passage, and has a broad application prospect. Due to the compound cross section, the evolution of waves crossing the compound channels are more complicated than the traditional single channel, which impact on the safe navigation in compound channels and sediment transport seriously. A numerical wave tank for the compound waterway channel of the Tianjin Port is established to simulate the evolution of orthogonal incident waves in different section types of compound channels. The results show that the wave height increases in where the small channel is excavated, while in the main channel is basically unchanged. As the width of the small channel and the slope of the channel transition decreases, the wave height in the compound channel also increases; and water depth ratio and wave elements have a coupling effect on wave height evolution. The shear stress of wave boundary layer on bed in the main channel is 68.5% of the shear stress in the small channel, which is able to block part of the mud and the bed load to alleviate the main channel deposition.

**Key words:** compound waterway; numerical wave tank; wave propagation; wave height evolution; sediment deposition

(责任编辑: 陈绪坚)

(上接第 53 页)

coefficient and relative root mean square error between the predicted and measured values, and significantly decrease the absolute error and relative error between the predicted and observed values. Results show that the denoising method can improve the interpretation degree of influence factors to the observed dependent variables, reduce the influence of test errors on test results, and further ensure the accuracy of test results.

**Key words:** Taguchi method; signal-to-noise ratio; data denoising; soil erosion

(责任编辑: 陈绪坚)