中国农业大学学报 2024,29(5):171-180
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

熊若羽,王文娥,凌刚,王世隆,皮滢滢,胡笑涛. 基于浑浊度监测山区河流悬浮泥沙含量的试验研究[J]. 中国农业大学学报,2024,29(05):171-180.
XIONG Ruoyu, WANG Wene, LING Gang, WANG Shilong, PI Yingying, HU Xiaotao. Experimental study on monitoring suspended sediment content in mountainous rivers based on turbidity[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(05):171-180.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.05.16

基于浑浊度监测山区河流悬浮泥沙含量的试验研究

熊若羽[1] 王文娥[1*] 凌 刚[2] 王世隆[1] 皮滢滢[1] 胡笑涛[1]
(1. 西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100;
2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司,贵阳 550081)

摘 要 针对山区河流悬浮泥沙含量监测缺乏实时性的问题,对浑浊度及悬浮泥沙含量进行监测,分析光照强度、流速、颗粒粒径和水体含沙量对浑浊度的影响,建立浑浊度与悬浮泥沙含量的关系模型式。结果表明:1)光照强度对浑浊度的影响最大,根据二者之间的关系,将光照强度(E)划分为3个区间:$E \leqslant 6\ 800$ lx、$6\ 800$ lx $< E \leqslant 22\ 000$ lx、$E > 22\ 000$ lx,对应于3个区间,确定了浑浊度与悬浮泥沙含量的关系模型;2)水流流速主要影响上层泥沙颗粒的分布,流速为0.16 m/s时测量区域的浑浊度大于流速为0.018 m/s时的浑浊度;3)泥沙颗粒的粒径大于扬动流速能带动的临界粒径时,其会沉积在渠底,因此,泥沙级配中大于临界粒径的颗粒占比越大,悬浮泥沙含量越小,浑浊度越小;4)水体含沙量越大,水沙输移过程中携带悬浮泥沙的量也越多,测量区域上层水样的浑浊度越大;5)采用本研究确定的浑浊度与悬浮泥沙含量的3个关系模型,预测得到的悬浮泥沙含量与实际悬浮泥沙含量的平均相对误差分别为7.22%、10.00%、8.58%。根据在自然条件下不同光照强度区间测得的浑浊度,可以得出该测量区域的悬浮泥沙含量。由于浑浊度可以现场连续、快速测得,所以将此方法引入山区河流悬浮含沙量实时监测是可行的。

关键词 悬浮泥沙含量;浑浊度;监测模型;模型选择
中图分类号 TV149.1 **文章编号** 1007-4333(2024)05-0171-10 **文献标志码** A

Experimental study on monitoring suspended sediment content in mountainous rivers based on turbidity

XIONG Ruoyu[1], WANG Wen'e[1*], LING Gang[2], WANG Shilong[1], PI Yingying[1], HU Xiaotao[1]
(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas of Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;
2. POWERCHINA Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China)

Abstract Aiming at the problem of lacking real-time monitoring of suspended sediment content in mountainous rivers, the turbidity and suspended sediment content of the rivers were monitored, and the influences of light intensity, velocity, particle size and water sediment content on turbidity were analyzed. A relationship model between turbidity and suspended sediment content was established. The results show that: 1) Light intensity has the greatest influence on turbidity. According to the relationship between the light intensity and turbidity, light intensity (E) is divided into three intervals, $E \leqslant 6\ 800$ lx, $6\ 800$ lx $< E \leqslant 22\ 000$ lx and $E > 22\ 000$ lx. In corresponding to the three intervals, the relationship model between turbidity and suspended sediment content is determined. 2) The flow velocity mainly affects the distribution of sediment particles in the upper layer. The turbidity of the measured area at the flow velocity of 0.16 m/s is greater

收稿日期:2023-10-03
基金项目:国家自然科学基金重点项目(U2243235)
第一作者:熊若羽(ORCID:0009-0008-8502-5683),硕士研究生,E-mail:xiongruoyu@nwafu.edu.cn
通讯作者:王文娥(ORCID:0000-0001-9997-8137),教授,博士生导师,主要从事流体机械与流体动力学、节水灌溉理论与技术研究,E-mail:wangwene@nwsuaf.edu.cn

than that at the flow velocity of 0.018 m/s; 3) When the particle size of the sediment particles is larger than the critical particle size driven by the lifting velocity, it will be deposited at the bottom of the channel. Therefore, the larger the proportion of particles larger than the critical particle size in the sediment gradation, the smaller the suspended sediment content and the smaller the turbidity; 4) The larger the sediment content of the water body, the more suspended sediment carried in the process of water and sediment transport, and the greater the turbidity of the upper water sample in the measured area; 5) Using the three relationship models of turbidity and suspended sediment content determined in this study, the average relative errors of predicted suspended sediment content and actual suspended sediment content are 7.22%, 10.00% and 8.58%, respectively. According to the turbidity measured in different light intensity intervals under natural conditions, the suspended sediment content in the measured area can be obtained. To sum up, since the turbidity can be measured continuously and quickly on site, it is feasible to apply this model to real-time monitoring of suspended sediment concentration in mountainous rivers.

Keywords suspended sediment content; turbidity; monitoring model; model selection

泥沙含量是河流、渠道信息观测中的重要内容,对河流泥沙含量的监测与调控在水利工程设计和水文信息化管理等方面具有重要意义[1-3]。目前,泥沙含量的测量方法主要分为直接法和间接法。

直接测定法包括烘干法和比重法。烘干法耗时长、效率低,受外部环境影响,测得的含沙量有较大误差[4];比重法操作简单快捷,但含沙量较高时,易造成量筒读数困难,影响测量结果[5]。

为了获得实时的泥沙含量数据,间接法依据泥沙颗粒的不同物理特性,获取泥沙含量与其相对应物理特性的相互关系进行测量[6-7]。间接法包括声学法[8-9]、超声波法[10]、图像法[11-13]、电容法[14]、γ射线法[15]等。其中,声学法利用声学多普勒流速剖面仪(ADCP)测量悬沙含量,但仪器价格较昂贵,不适合于长期放置于野外[8-9]。超声波法根据超声波在含沙水流中的反射和衰减特性测量水流中的含沙量,超声波强度会导致超声波与泥沙颗粒发生相互作用而影响溶液浓度[10]。图像法基于沙粒光斑的成像面积浓度和灰度面积浓度在一定浓度范围内与实际含沙量之间存在着良好的对应关系,从而间接测量水体中的泥沙含量,但仪器的聚焦性能影响沙砾的成像光斑,图像容易饱和,导致量程较小[11-13]。电容法利用泥水混合物中含沙量的变化会引起其介电常数变化这一电物理学性质,通过测量电容的变化来测量含沙量变化,但电容传感器受温度的干扰较为严重[14]。γ射线法利用γ射线衰减与水体中泥沙含量的关系推求含沙量,但γ射线水平透射时,泥沙的颗粒组成会对测量精度产生较大影响,放射源对人体危害很大,因而无法推广使用[15]。

浑浊度是水体物理性状指标之一,用以表示水的清澈或浑浊程度,不溶解物质越多,浑浊度越高,浑浊度已用于监测泥沙含量,并且具有较好的准确性[16-17]。浊度传感器内部是一个红外线对管,当光线穿过一定量的水时,光线的透过量取决于该水的污浊程度,水越污浊,透过的光就越少。光接收端把透过的光强度转换为对应的电流大小,透过的光多,电流大,反之透过的光少,电流小。测量接收端电流的大小,就可以计算出水的污浊程度[18-19]。

本研究拟对浑浊度及悬浮泥沙含量进行监测,分析光照强度、流速、颗粒粒径和水体含沙量对浑浊度的影响,建立浑浊度与悬浮泥沙含量的关系模型式,旨在为山区河流悬浮泥沙含量的实时监测提供模型基础。

1 材料与方法

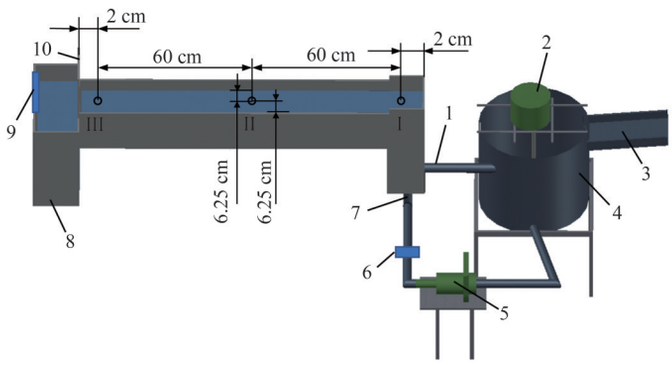
1.1 试验材料

采用宁蒙河道[20]典型水文站(下河沿、青铜峡、石嘴山、巴彦高勒、头道拐水文站)的水文资料准备试验材料。搅拌桶里水的体积为0.35 m^3,水体含沙量为0~12 kg/m^3,按照间隔1 kg/m^3配置试验水体含沙量。泥沙颗粒按照粒径(d)大小分为细($d\leqslant0.025$ mm)、中(0.025 mm$<d\leqslant$0.050 mm)、粗(0.05 mm$<d\leqslant$0.10 mm)及特粗($d>0.10$ mm)。3种泥沙级配分别为:S1,细沙、中沙、粗沙及特粗沙的质量分数为30%、50%、15%、5%;S2,细沙、中沙的质量分数为80%、20%;S3,粗沙、特粗沙的质量分数为80%、20%。按照以上粒径范围筛分土样、制备泥沙。

1.2 系统布置及测量仪器

试验在西北农林科技大学水工水力学与泥沙实验室进行。试验系统由明渠、搅拌桶、搅拌机、污

水泵等组成(图 1)。明渠材质为有机玻璃,渠道总长 1.240 m,渠道宽 0.125 m,渠道高 0.220 m;搅拌桶高度为 0.80 m,直径 0.56 m;搅拌机额定功率为 0.75 kW;污水泵额定功率为 1.10 kW,扬程 15 m,流量 15 m^3/h。测量仪器包括光照监测仪、浊度传感器、横式采样器、烘箱、旋浆流速仪。光照监测仪,东莞万创电子制品有限公司,型号为 AS803,监测量程为 0~200 000 lx,分辨率为 1 lx,测量精度为 ±5%;浑浊度传感器,沁和智能科技企业,型号为 TSW-30,监测量程为 0~1 000 NTU,分辨率 1 NTU。为与天然河流、渠道条件一致,所有试验均在室外太阳光下进行。



1. 旁通管; 2. 搅拌机; 3. 进沙口; 4. 搅拌桶; 5. 污水泵; 6. 阀门; 7. 进水口; 8. 沉沙池; 9. 回水管衔接处; 10. 尾水闸门。

I、II、III为浑浊度及悬浮泥沙含量测量区域。

1. By pass pipe; 2. Blender; 3. Sand inlet; 4. Mixing tank; 5. Sewage pump; 6. Valve; 7. Water inlet; 8. Grit chamber; 9. Return pipe junction; 10. Tail lock.

I, II and III are the measurement areas of turbidity and suspended sediment content.

图 1　泥沙自动监测试验装置及测量区域布置

Fig. 1　Sediment automatic monitoring test device and measuring area layout

渠道上取 3 个直径为 0.06 m 的圆柱形测量区域,分别为I、II、III,位于水面下距水面 0.02 m,具体位置见图 1,测量区域II、III至渠道左右壁面的距离与I相同。

1.3　试验方案

1.3.1　光照强度区间划分试验

为分析光照强度对浑浊度的影响,设置 2 种试验工况:1)含沙量为 5 kg/m^3 的浑水、泥沙级配为 S1,渠道水流流速为 0.16 m/s,水深为 0.14 m;2)含沙量为 0 kg/m^3 的清水,流速为 0.16 m/s,水深为 0.14 m。为了保持试验条件一致,该试验在自然光条件下进行,连续监测 10 日,包含晴天、阴天、多云等天气状况,覆盖全部光照条件。每隔 1 h 测定 1 次,每次持续 2 min,监测测量区域II的光照强度及浑浊度,研究光照强度与浑浊度的关系。

1.3.2　悬浮泥沙含量及浑浊度监测试验

为分析流速、水体含沙量对浑浊度的影响,试验主要设置的工况为:按照间隔 1 kg/m^3 设置的水体含沙量分别为 1、2、…、12 kg/m^3,每种水体含沙量设置 2 种水流流速,分别为 0.018 和 0.16 m/s,2 种水流流速对应的水深分别为 0.035 和 0.14 m,泥沙级配为 S1,共计 24 种工况。为分析颗粒粒径对浑浊度的影响,设置以下工况:泥沙级配为 S1、S2、S3,每种泥沙级配设置的含沙量为 5 kg/m^3,水体流速 0.16 m/s,水深 0.14 m,共计 3 种工况。在 24 种及 3 种工况条件下,监测 3 个测量区域的浑浊度及光照强度,用横式取样器取 3 个测量区域的水样 50 mL 至铝盒,然后将装有水样的铝盒放入烘箱,调节温度至 105 ℃,烘干时长 11 h,测定烘干前后铝盒质量,计算测量区域的悬浮泥沙含量。

1.4　流速指标及确定方法

依据水流携动泥沙的输移过程,有 3 个不同类型的临界流速:1)由静到动的起动流速;2)由着底动到不着底动的扬动流速;3)由动到静的止动流速[21]。对于试验设置的流速,仅与起动流速、扬动流速有关。

1.4.1　起动流速

已有相关研究得出在不同条件下泥沙起动流速的计算公式[22-24]。由于试验明渠的水深比较浅,与窦国仁[22]的试验条件相似,最终确定该研究提出

的公式计算泥沙起动流速，具体公式如下：

$$\frac{V_g^2}{g}=\frac{\gamma_s-\gamma}{\gamma}d\left(6.25+41.6\frac{H}{H_a}\right)+\left(111+740\frac{H}{H_a}\right)\frac{H_a\delta}{d} \tag{1}$$

式中：V_g为起动流速，m/s；γ_s为泥沙颗粒的密度，本研究取γ_s=26.5 kN/m^3；γ为水的密度，本研究取γ=9.8 kN/m^3；d为泥沙颗粒粒径，m；H为水的高度，m；H_a为水柱高度表示的大气压力，本研究取$H_a=10^3$ cm；δ为水分子厚度，本研究取$\delta=3\times10^{-8}$ cm。

选取粗沙中最大的颗粒粒径（0.1 mm）及细沙中最大的颗粒粒径（0.025 mm）。式（1）计算得到颗粒粒径为0.1 mm，水深为0.035和0.140 m时分别对应的泥沙颗粒起动流速为0.15和0.16 m/s；颗粒粒径为0.025 mm，水深为0.035和0.140 m时分别对应的泥沙颗粒起动流速为0.018和0.020 m/s。

1.4.2 扬动流速

张罗号[25]在对扬动流速计算公式的研究中，解决了传统含沙量垂线分布表达式缺陷的问题，使用悬浮指标刻画颗粒扬动临界状态，公式如下：

$$V_f=3.52\frac{A_{65}}{\sqrt{g}}\left(\frac{h}{d}\right)^{\frac{1}{6}}\omega \tag{2}$$

式中：A_{65}为D_{65}为代表粒径相对应的摩阻系数，计算公式[26]为

$$A_{65}=1.55h\left(\frac{D_{50}}{D_0}\right)+32.1 \tag{3}$$

式中：D_{50}为中值粒径，mm；D_0为避免量纲不和谐而引入的参考粒径，本研究取D_0=0.01 mm。

ω为泥沙颗粒在静止清水中的沉降速度，根据粒径大小分别采用不同的公式[3]计算：

$$\omega=0.04\left(\frac{\gamma_s-\gamma}{\gamma}g\right)^{0.867}\frac{D^{1.6}}{\nu^{0.734}}\ (d\leqslant0.1\ \text{mm})$$

$$\omega=-13.95\frac{\nu}{d}+\sqrt{\left(13.95\frac{\nu}{d}\right)^2+1.09\frac{\gamma_s-\gamma}{\gamma}gd}\ (d>0.1\ \text{mm})$$

式中：υ为运动粘滞系数，本研究取$\upsilon=10^{-6}$ m^2/s；γ_s和γ分别为泥沙颗粒和水的密度。

选取粗沙中最大的颗粒粒径（0.1 mm）及细沙中最大的颗粒粒径（0.025 mm），采用式（2）计算得到颗粒粒径为0.1 mm，水深为0.035和0.14 m时分别对应的泥沙颗粒扬动流速为0.25和0.3 m/s；颗粒粒径为0.025 mm，水深为0.035和0.14 m时分别对应的泥沙颗粒扬动流速为0.005 7和0.022 6 m/s。

1.4.3 水流流速确定

如果水流流速小于0.018 m/s，至少质量分数为30%的细泥沙颗粒在渠底处于静止状态；如果流速大于0.16 m/s，至少95%的泥沙颗粒能够运动。为了研究水流流速对浑浊度的影响，分别设置差异较大的2种流速，但为了保证达到大部分泥沙颗粒的起动流速，选择0.018和0.16 m/s的流速工况。

2 结果分析

2.1 光照强度区间划分

设置渠道水流流速为0.16 m/s，水深0.14 m，清水水体含沙量0 kg/m^3，浑水水体含沙量5 kg/m^3、泥沙级配为S1，在晴天和阴天条件下，光照强度（E）与2种水体下3个测量区域浑浊度（T）的关系见图2。当$E\leqslant$6 800 lx时，清水的浑浊度T=59 NTU，浑水，78 NTU<T<82 NTU；当6 800 lx<$E\leqslant$

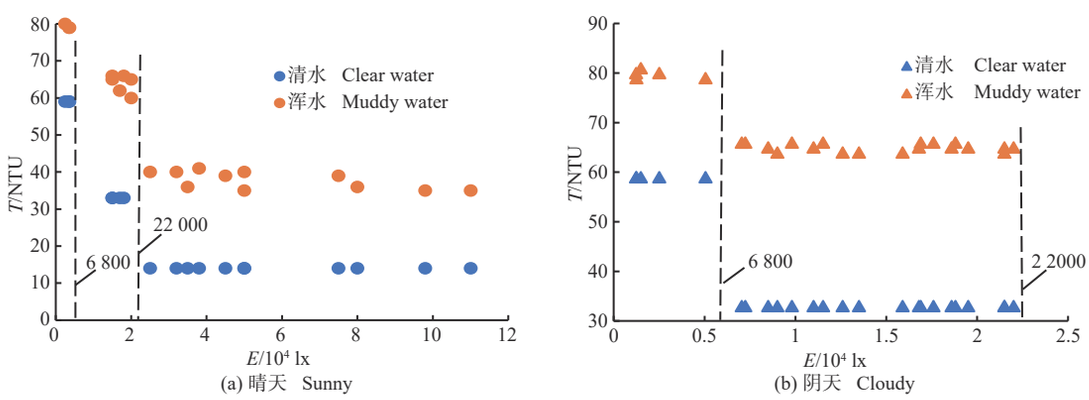


图2 晴天和阴天光照强度（E）与浑浊度（T）的关系

Fig.2 Relationship between light intensity (E) and turbidity (T) on sunny and cloudy days

22 000 lx时，清水，T=33 NTU，浑水，60 NTU<T<78 NTU；当 E>22 000 lx 时，清水，T=4 NTU，浑水，33 NTU<T<40 NTU。在同一水体含沙量条件下，浑浊度在光照强度的影响下存在明显的3个分区，即光照强度划分为以下3个区间：E≤6 800 lx、6 800 lx <E≤22 000 lx、E>22 000 lx。

2.2　流速对上层水样浑浊度的影响

在同一泥沙级配（S1）条件下，分析流速对上层水样浑浊度的影响。流速为0.018 m/s，水深为0.035 m时，式（2）可计算其作为扬动流速对应的颗粒粒径为0.022 mm，当泥沙颗粒 d<0.022 mm时，其不着底运动，在泥沙级配S1条件下，质量分数约30%的泥沙颗粒不着底运动；流速及水深为0.16 m/s和0.14 m时，式（2）可计算其作为扬动流速对应的颗粒粒径为0.07 mm，当泥沙颗粒 d<0.07 mm时，其不着底运动，在泥沙级配为S1条件下，质量分数约95%的泥沙颗粒不着底运动。因此，3个测量区域的浑浊度在流速为0.160 m/s时比流速0.018 m/s时大，具体测量数据见表1。

表1　测量区域Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的浑浊度及悬浮泥沙含量

Table 1　Turbidity and suspended sediment content in regions I, II and III measured

光照强度(E)/lx Light intensity	水体含沙量/(kg/m³) Water sediment content	流速/(m/s) Flow velocity	区域I Section I		区域II Section II		区域III Section III	
			T/NTU	C/(kg/m³)	T/NTU	C/(kg/m³)	T/NTU	C/(kg/m³)
E≤6 800	1	0.018	63	0.873	61	0.667	60	0.539
		0.160	70	1.545	65	1.126	63	0.873
	2	0.018	73	2.522	68	1.392	66	1.156
		0.160	74	2.682	69	1.439	68	1.392
	5	0.018	77	3.517	71	1.986	69	1.439
		0.160	79	4.179	73	2.522	71	1.986
	7	0.018	80	4.363	75	2.800	73	2.522
		0.160	85	7.457	78	4.132	76	3.222
	10	0.018	86	7.597	79	4.179	76	3.222
		0.060	88	8.926	80	4.363	78	4.132
6800<E≤22 000	1	0.018	38	0.727	37	0.627	36	0.545
		0.160	44	1.273	42	1.091	39	0.836
	2	0.018	49	2.444	44	1.273	42	1.091
		0.160	50	2.765	47	1.780	44	1.273
	5	0.018	53	3.415	50	2.765	44	1.273
		0.160	55	4.148	49	2.444	48	1.959
	7	0.018	57	4.337	50	2.765	49	2.444
		0.160	68	7.200	55	4.148	51	3.221
	10	0.018	70	7.400	55	4.148	51	3.221
		0.160	78	8.364	58	4.264	55	4.148
E>22 000	1	0.018	16	0.915	16	0.915	15	0.462
		0.160	17	1.211	16	0.915	16	0.915
	2	0.018	25	2.238	17	1.211	16	0.915
		0.160	24	2.154	18	1.308	17	1.211
	5	0.018	32	3.615	24	2.154	21	1.692
		0.160	36	4.249	26	2.538	23	2.052
	7	0.018	39	4.521	28	2.923	26	2.538
		0.160	51	6.692	34	4.061	30	3.183
	10	0.018	51	6.692	34	4.061	32	3.615
		0.160	60	7.983	36	4.249	34	4.061

注：T为浑浊度；C为悬浮泥沙含量。表3同。

Note: T stands for turbidity. C is suspended sediment content. The same in Table 3.

2.3 颗粒粒径对上层水样浑浊度的影响

在3种泥沙级配条件下,3个测量区域的浑浊度见表2。水流流速及水深为0.16 m/s和0.14 m时,式(2)可计算其作为扬动流速对应的颗粒粒径为0.07 mm,当泥沙颗粒$d<0.07$ mm时,其随着水流推移或悬浮前进,当泥沙颗粒$d>0.07$ mm时,其随着水流下沉至渠底。在泥沙级配S1条件下,质量分数约90%的泥沙颗粒不着底运动;在泥沙级配S2条件下,质量分数100%的泥沙颗粒不着底运动;在泥沙级配S3条件下,质量分数约80%的泥沙颗粒不着底运动。对于各测量区域的浑浊度,泥沙级配为S2时比S1的大,而泥沙级配为S3时各测量区域浑浊度整体偏低。

表2 不同颗粒粒径级配下3个测量区域的浑浊度

Table 2 Turbidity of three measurement areas under different particle size gradations

水体含沙量/(kg/m³) Water sediment content	流速/(m/s) Flow velocity	光照强度(E)/lx Light intensity	泥沙级配 Sediment grading	浑浊度(T)/NTU Turbidity		
				区域I Section I	区域II Section II	区域III Section III
5	0.16	$E\leqslant 6\ 800$	S1	78	75	73
			S2	83	79	76
			S3	76	74	71
5	0.16	$6\ 800<E\leqslant 22\ 000$	S1	54	53	50
			S2	63	60	55
			S3	53	50	46
5	0.16	$E>22\ 000$	S1	38	37	34
			S2	42	38	36
			S3	37	35	32

注:S1,细沙、中沙、粗沙及特粗沙的质量分数为30%、50%、15%、5%;S2,细沙和中沙的质量分数为80%和20%;S3,粗沙和特粗沙的质量分数为80%和20%。

Note: S1, the quality fractions of fine sand, medium sand, coarse sand and extra coarse sand are 30%, 50%, 15%, 5%; S2, the mass fractions of fine sand and medium sand are 80% and 20%; S3, the quality fractions of coarse sand and extra coarse sand are 80% and 20%.

2.4 水体含沙量对上层水样浑浊度的影响

在泥沙级配S1及水流流速相同的条件下,水体含沙量越大,水流携动泥沙的输移过程中,悬浮泥沙含量越大,3个测量区域的浑浊度越大。图3示出3种光照强度区间下,浑浊度与实际悬浮泥沙含量的关系,可见浑浊度与悬浮泥沙含量有良好的相关性。

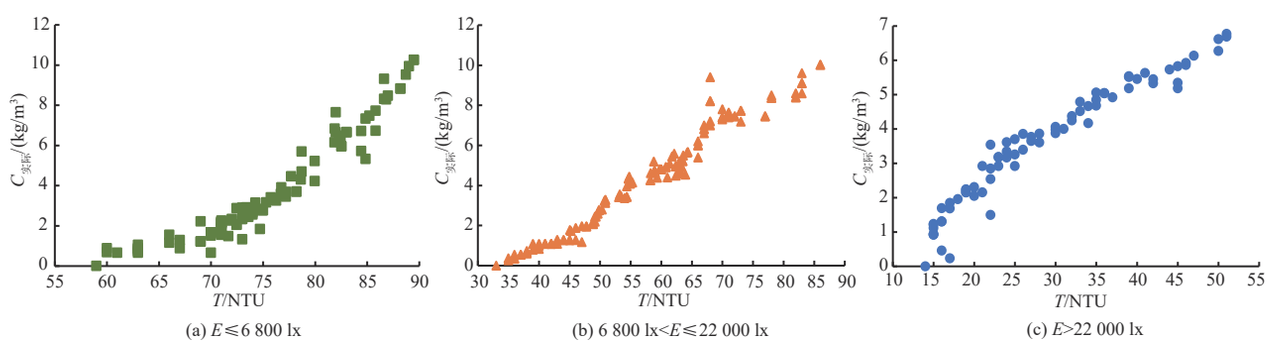


图3 3种光照强度(E)区间下浑浊度(T)与实际悬浮泥沙含量($C_{实际}$)的关系

Fig.3 Relationship between turbidity (T) and actual suspended sediment content (C_{actual}) under three light intensities (E)

2.5 模型建立

利用Matlab对3种光照强度区间下的浑浊度-悬浮泥沙含量数据进行回归分析,分别采用线性式、对数式、二次多项式3种模型进行拟合。每种光照强度区间选取了30%的样本数据组建立模型,70%的样本数据组验证模型,3种模型见表3。

表 3　3种光照强度区间下浑浊度-悬浮泥沙含量的模型关系式

Table 3　Model relationship between turbidity and suspended sediment content under three light intensity intervals

光照强度(E)/lx Light intensity	模型 Model	模型关系式 Model relation
$E>22\ 000$	线性式	$C=0.152\ 1T-0.713$
	对数式	$C=4.457\ 5\ln T-11.006$
	二次多项式	$C=-0.002T^2+0.282\ 9T-2.554\ 5$
$6\ 800<E\leqslant 22\ 000$	线性式	$C=0.202\ 7T-7.277\ 6$
	对数式	$C=11.214\ln T-40.649$
	二次多项式	$C=0.000\ 7T^2+0.12T-4.993$
$E\leqslant 6\ 800$	线性式	$C=0.309\ 1T-19.51$
	对数式	$C=22.332\ln T-92.59$
	二次多项式	$C=0.011\ 2T^2-1.357T+41.808$

3　模型选择与精度检验

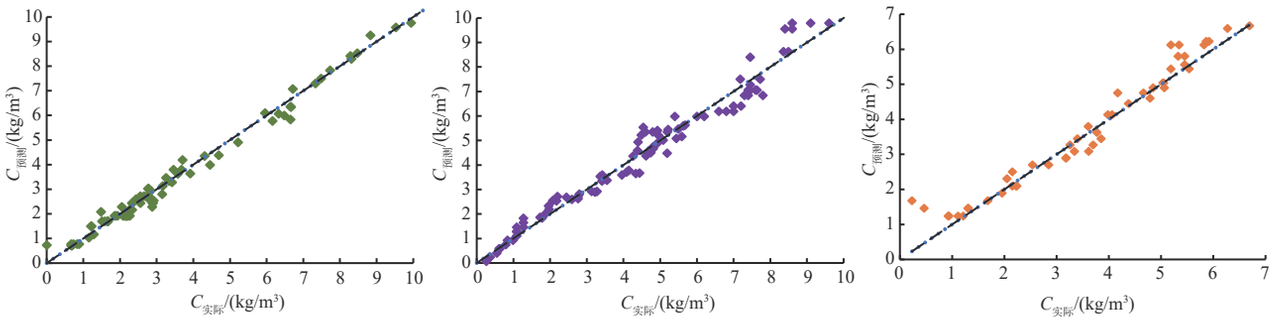
在3种光照强度区间下线性式、对数式、二次多项式模型的平均相对误差、均方根误差、均方误差、决定系数见表4。二次多项式的平均相对误差、均方根误差、均方误差均小于其他模型式，而决定系数大于其他模型式。

表 4　3种光照强度区间下3种模型式的平均相对误差、均方根误差、均方误差和决定系数

Table 4　Average relative error, root-mean-square error, mean-square error and determination coefficient of the three models under three light intensity ranges

光照强度(E)/lx Light intensity	模型 Model	平均相对误差 Average relative error	均方根误差 Root-mean-square error	均方误差 Error of mean square	决定系数 Determination coefficient
$E>22\ 000$	线性式	0.147 3	0.509 6	0.259 7	0.878 9
	对数式	0.093 3	0.417 3	0.174 1	0.942 0
	二次多项式	0.085 8	0.376 4	0.141 7	0.947 2
$6\ 800<E\leqslant 22\ 000$	线性式	0.119 3	1.045 3	0.571 3	0.928 9
	对数式	0.135 9	0.856 0	0.732 7	0.837 2
	二次多项式	0.100 0	0.289 2	0.568 6	0.938 2
$E\leqslant 6\ 800$	线性式	0.159 5	0.638 9	0.538 6	0.751 5
	对数式	0.193 4	0.771 8	0.768 7	0.693 5
	二次多项式	0.072 2	0.223 7	0.076 1	0.975 7

3种光照强度区间下，二次多项式模型预测的悬浮泥沙含量与实际悬浮泥沙含量基本相一致（图4）。综上，对应于3个光照强度区间，确定3个二次多项式为浑浊度与悬浮泥沙含量的关系模型。



(a) $E \leqslant 6\ 800$ lx (b) $6\ 800\ \text{lx} < E \leqslant 22\ 000$ lx (c) $E > 22\ 000$ lx

图4 3种光照强度(E)区间下实际悬浮泥沙含量($C_{实际}$)与二次多项式预测的悬浮泥沙含量($C_{预测}$)的关系

Fig.4 The relationship between the actual suspended sediment content (C_{actual}) and the suspended sediment content ($C_{predictable}$) predicted by the quadratic polynomial under three light intensities (E)

4 结 论

本研究针对山区河流在监测悬浮泥沙含量过程中缺乏实时性的问题，监测了3个测量区域的浑浊度及悬浮泥沙含量，分析了光照强度、流速、颗粒粒径和水体含沙量对浑浊度的影响，建立了浑浊度与悬浮泥沙含量的关系模型式，得到如下结论：

1)光照强度对浑浊度的影响存在3个明显的区间，可以将光照强度划分为：$E \leqslant 6\ 800$ lx、$6\ 800\ \text{lx} < E \leqslant 22\ 000$ lx、$E > 22\ 000$ lx，对应于3个区间，确定了浑浊度与悬浮泥沙含量的关系模型。

2)流速主要影响泥沙颗粒在上层水样的分布，流速越大，悬浮泥沙含量越大，测量区域的浑浊度越大。因此，3个测量区域的浑浊度在流速为0.160 m/s时比流速0.018 m/s的大。

3)泥沙颗粒的粒径大于扬动流速能带动的临界粒径时，其会着底运动或者沉积在渠底。因此，对于各测量区域的浑浊度，泥沙级配为S2时比S1的大，而泥沙级配为S3时各测量区域浑浊度整体偏低。

4)在泥沙级配S1及水流流速相同的条件下，水体含沙量越大，水流携动泥沙的输移过程，悬浮泥沙含量越大，测量区域的浑浊度越大。

5)二次多项式的平均相对误差、均方根误差、均方误差均小于其他模型式，而决定系数大于其他模型式。综上，对应于3个光照强度区间，确定二次多项式为浑浊度与悬浮泥沙含量的关系模型。

参考文献 References

[1] 薛元忠，何青，王元叶. OBS浊度计测量泥沙浓度的方法与实践研究[J]. 泥沙研究，2004(4)：56-60
Xue Y Z, He Q, Wang Y Y. The method and application of OBS in the measurement of sediment concentration[J]. *Journal of Sediment Research*, 2004(4): 56-60 (in Chinese)

[2] 邓伟，唐伟. 试论中国山区城镇化方向选择及对策[J]. 山地学报，2013，31(2)：168-173
Deng W, Tang W. General directions and countermeasures for urbanization development in mountain areas of China[J]. *Mountain Research*, 2013, 31(2): 168-173 (in Chinese)

[3] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 2版. 北京：中国水利水电出版社，1998
Zhang R J. *River Sediment Dynamics*[M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 1998. (in Chinese)

[4] 展小云，郭明航，赵军，赵向辉. 径流泥沙实时自动监测仪的研制[J]. 农业工程学报，2017，33(15)：112-118
Zhan X Y, Guo M H, Zhao J, Zhao X H. Development of real-time and automatic measuring equipment for runoff and sediment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(15): 112-118 (in Chinese)

[5] 王讷敏，洪美玲，单帅，刘倩文，高玉娟. 径流泥沙监测方法研究进展[J]. 亚热带水土保持，2023，35(2)：21-24，30

Wang N M, Hong M L, Shan S, Liu Q W, Gao Y J. Research progress of runoff and sediment monitoring methods[J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2023, 35(2): 21-24, 30 (in Chinese)

[6] Slaets J I F, Schmitter P, Hilger T, Lamers M, Piepho H P, Tran D V, Cadisch G. A turbidity-based method to continuously monitor sediment, carbon and nitrogen flows in mountainous watersheds[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 513: 45-57

[7] 赵建华，王露，阮哲伟，管磊，孙圣舒，王东，刘上瑜. 新型透射测量技术在泥沙含量监测中的应用[J]. 水利信息化，2022(3): 57-61
Zhao J H, Wang L, Ruan Z W, Guan L, Sun S S, Wang D, Liu S Y. Application of new optical transmission measurement technology in sediment content monitoring[J]. *Water Resources Informatization*, 2022 (3): 57-61 (in Chinese)

[8] Weiss A, Clark S P, Rennie C D, Moore S A, Ahmari H. Estimation of total suspended solids concentration from aDcp backscatter and hydraulic measurements[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2015, 53(5): 670-677

[9] 李文杰，黄亚非，杨胜发，张鹏. 基于ADV的三峡水库瞬时含沙量测量研究[J]. 水力发电学报，2015, 34(11): 69-76
Li W J, Huang Y F, Yang S F, Zhang P. ADV-based measurements of instantaneous suspended sediment concentrations in the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(11): 69-76 (in Chinese)

[10] 贾春娟，唐懋官. 利用超声测量水中含沙量垂线分布的方法[J]. 应用声学，1998, 17(2): 36-39
Jia C J, Tang M G. Utilizing ultrasound to measure the vertical distribution of sediment concentration in water[J]. *Journal of Applied Acoustics*, 1998, 17(2): 36-39 (in Chinese)

[11] 马志敏，邹先坚，赵小红，胡向阳. 基于B超成像的低含沙量测量[J]. 应用基础与工程科学学报，2013, 21(4): 796-803
Ma Z M, Zou X J, Zhao X H, Hu X Y. The measurement of low sediment concentration based on B-mode ultrasound images[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2013, 21(4): 796-803 (in Chinese)

[12] 胡向阳，许明，邹先坚，马志敏. B超在含沙量及其垂线分布测量中的首次应用[J]. 长江科学院院报，2014, 31(2): 12-15
Hu X Y, Xu M, Zou X J, Ma Z M. Application of B-mode ultrasound to the measurement of sediment concentration and its vertical distribution for the first time[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2014, 31(2): 12-15 (in Chinese)

[13] Zou X J, Song H, Wang C Y, Ma Z M. Relationships between B-mode ultrasound imaging signals and suspended sediment concentrations[J]. *Measurement*, 2016, 92: 34-41

[14] 李小昱，雷廷武，王为. 电容式传感器测量水流泥沙含量的研究[J]. 土壤学报，2002, 39(3): 429-435
Li X Y, Lei T W, Wang W. Capacitance sensor measuring sediment concentration in water current[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(3): 429-435 (in Chinese)

[15] 雷廷武，赵军，袁建平，王辉，刘清坤. 利用γ射线透射法测量径流含沙量及算法[J]. 农业工程学报，2002, 18(1): 18-21, 13
Lei T W, Zhao J, Yuan J P, Wang H, Liu Q K. Determining sediment concentration in runoff flow with γ ray attenuation and the related theoretical algorithm [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(1): 18-21, 13 (in Chinese)

[16] 马旭梁，刘泽宇，李大勇. 浊度法检测原砂含泥量[J]. 哈尔滨理工大学学报，2020, 25(6): 126-130
Ma X L, Liu Z Y, Li D Y. Turbidity method for detecting mud content in base sand[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2020, 25(6): 126-130 (in Chinese)

[17] Chiang C T, Huang S M, Wu C N. Development of a calibrated transducer CMOS circuit for water turbidity monitoring [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(11): 4478-4483

[18] Sanga R, Sivaramakrishna M, Rao G P. Design and development of a quasi-digital sensor and instrument for water turbidity measurement[J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(11): 115106

[19] Xu X Q, Fan H M, Chen X Y, Mi C H. Estimating low eroded sediment concentrations by turbidity and spectral characteristics based on a laboratory experiment[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(2): 130

[20] 张晓华，姚文艺，郑艳爽. 黄河宁蒙河道输沙特性与河床演变[M]. 郑州：黄河水利出版社，2016
Zhang X H, Yao W Y, Zheng Y S. *Sediment Transport Characteristics and Riverbed evolution in Ningmeng Channel of the Yellow River*[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2016 (in Chinese)

[21] 沙玉清. 泥沙运动学引论[M]. 北京：中国工业出版社，1965
Sha Y Q. *Introduction of Sediment Kinematics*[M]. Beijing: China Industry Press, 1965 (in Chinese)

[22] 窦国仁. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究，1999(6): 1-9
Dou G R. Incipient motion of coarse and fine sediment[J]. *Journal of Sediment Research*, 1999(6): 1-9 (in Chinese)

[23] 张瑞瑾，谢鉴衡，陈文彪. 河流动力学[M]. 北京：中国工业出版社，1961
Zhang R J, Xie J H, Chen W B. *River Dynamics*[M]. Beijing: China Industry Press, 1961 (in Chinese)

[24] 唐存本. 泥沙起动规律[J]. 水利学报，1963(2): 1-12
Tang C B. Sediment start-up law [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1963(2): 1-12 (in Chinese)

[25] 张罗号. 沙质河床水流与泥沙运动规律研究[D]. 南京：河海大学，2021
Zhang L H. Study on the law of flow and sediment movement in sandy river bed[D]. Nanjing: Hohai University, 2021 (in Chinese)

[26] 张红武，张俊华，卜海磊，钟德钰，王艳平. 试论推移质输沙率公式[J]. 南水北调与水利科技，2011, 9(6): 140-145
Zhang H W, Zhang J H, Bu H L, Zhong D Y, Wang Y P. Discussion of bed-load transport equations[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2011, 9(6): 140-145 (in Chinese)

责任编辑：刘迎春

第一作者简介：熊若羽，女，1999年6月生，硕士研究生，就读于西北农林科技大学水利与建筑工程学院。在校期间获得西北农林科技大学校级二等学业奖学金、社会实践优秀个人。先后参加陕西省水利科技计划项目“灌溉渠道流量智能监测装置研究”和国家自然科学基金项目“渭河流域数字孪生灌区构建与智慧调控”。申请专利2项。

通讯作者简介：王文娥，女，1974年7月生，教授，博士生导师。主要从事流体机械与流体动力学、节水灌溉理论与技术研究，中国水利学会水力学专业委员会委员，《水利与建筑工程学报》编委。在 *Agriculture Water management*、*Flow Measurement and Instrumentation*、*Agronomy*、《中国农业大学学报》《农业工程学报》《水利学报》《水科学进展》《农业机械学报》《水力发电学报》及国际会议论文集上发表110余篇科研论文，其中第一作者及通讯作者70篇（SCI、EI收录20篇），申请专利6项；编写科研专著1部、教材2部。参与完成的“渠灌类型区农业高效用水模式与产业化示范”获2003年陕西省科学技术一等奖、2004年完成的“内蒙古河套灌区下游旱秋浇节水保墒决策支持系统”获内蒙古巴彦淖尔盟科技进步二等奖，2008年以第一作者发表在《农业工程学报》上的文章获第六届中国科协期刊优秀学术论文二等奖。2020年获陕西省教学成果二等奖、西北农林科技大学教学成果特等奖。主持国家自然科学基金2项，主持公益性行业（农业）科研专项课题、国家科技支撑计划项目子课题、“863”项目子课题、教育部博士点新教师基金项目、陕西省自然科学基金（面上、青年）、陕西省科技计划项目、杨凌示范区科技计划项目等10余项科研课题，教改项目4项。