

探究水质中悬浮物与浊度的关系

吕炎 刘翔 张艳艳 唐世旭 朱湘鸿

(万华化学(宁波)有限公司, 浙江省 宁波市 315812)

摘要: 本文通过实验探究水质中悬浮物与浊度之间的关系, 结合 Minitab 软件性分析发现, 水质样品浊度与悬浮物之间存在显著的线性正相关。同时对水质悬浮物测定光度法进行探究, 实验显示光度法可以用于水质悬浮物的测定, 且数据准确性有保障, 但光度法会受到样品中组分干扰, 造成悬浮物测定数据存在波动。

关键词: 悬浮物; 浊度; Minitab 软件; 光度法; 线性正相关

1、背景

水质中悬浮物和浊度是衡量水污染程度的指标之一, 悬浮颗粒是造成水浑浊的主要原因。水体中的悬浮物浮在水中, 影响水中植物的光合作用, 从而导致水中溶解氧不足, 进而导致水中好氧微生物对水体的自净能力, 水体营养过剩, 则会导致水体进一步富营养化, 可能造成蓝藻等大面积爆发, 鱼类大面积死亡, 导致水体恶化。因此, 测定水中悬浮物和浊度对改善水环境有重要意义。

水质中浑浊度主要由水中悬浮固体等造成, 因此浊度与悬浮物间可能存在一定的联系。同时水质悬浮物测定国标方法为重量法, 但目前很多光学仪器推出光学法测定水质悬浮物, 但光学仪器测定受到多种因素干扰, 因此需要探究光学法测定悬浮的可行性, 同时需要研究悬浮物光学法与浊度质检的关系。

2、水质悬浮物测定方法介绍

2.1 水质悬浮物介绍

悬浮物是指悬浮在水体中、无法通过 0.45 微米滤纸或过滤器的有机和无机颗粒物。水中的悬浮物质是颗粒直径约在 $0.1\mu\text{m}$ — $100\mu\text{m}$ 之间的微粒。肉眼可见。这些微粒主要是由泥沙、粘土、原生动物、藻类、细菌、病毒、以及高分子有机物等组成, 常常悬浮在水流之中。有机类大多数是碎屑颗粒, 它们是由碳水化合物、蛋白质、类脂物等所组成。无机类主要包括陆源矿物碎屑 (如石英、长石、碳酸盐和粘土)、水生矿物 (如沉淀的海绿石和钙十字石等硅酸盐类、碳)。

2.2 水质中悬浮物测定重量法 (GB11901-1989)

水质中悬浮物测定重量法主要采用抽滤装置, 水质中的不可滤残渣通过孔径 $0.45\mu\text{m}$ 的滤膜, 截留在滤膜上并于 $103\sim 105^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重的固体物质, 采用天平称取截留下的固体物质重量, 通过对应公式计算即为水质中悬浮物含量。

2.3 水质中悬浮物测定光学法

光学法测量原理是基于复合的红外吸收散射光处理工艺，测量悬浮固体物质时，检测器接收是在 90° 和 120° 的角度上的散色光强度。

哈希 DR6000 分光光度仪具备水质悬浮物光学法测定条件，仪器在 810nm 波长下进行测定，测定范围为 0-750mg/L。

3、水质中浊度测定方法介绍

水质中浊度测定主要采用浊度计法完成，主要有透射光式、散射光式和透射散射光式等方式。其原理为，当光线照射到液面上，入射光强、透射光强、散射光强相互之间比值和水样浊度之间存在一定的相互关系，通过测定透射光强、散射光强和入射光强，或透射光强和散射光强的比值来测定水样的浊度。

3.1 透射光式浊度测量法

光源（发光二极管）发出的光束射入水样，水样中的浊度物质会使光的强度衰减，此光穿过待测液体并被光敏晶体管接收转换，得到的电信号驱动仪器的后置电路，指示出液体的浑浊程度。光强的衰减程度与水样的浊度之间的关系如下表示：

$$I = I_0 e^{-Kd1}$$

式中：

I—透射光发光强度，cd；

I_0 —入射光发光强度，cd；

K—比例常数；

d—浊度，NTU；

l—水样透过深度，mm。

3.2 散射光式浊度测量法

光束射入水样时，由于水样中浊度物质使光产生散射，通过测量与入射光垂直方向的散射光强度，即可测出水样中的浊度，与入射光成 90° 方向散射光强度符合雷莱公式：

$$I = \frac{KNV^2}{\lambda^4} I_0$$

式中：

I—散射光强度，cd；

K—系数常数；

N—单位容积的微粒数， N_A ；

V—微粒体积， $L \cdot mol^{-1}$ ；

λ —入射光波长，nm；

I_0 —入射光强度，cd。

在一定条件下，系数常数 K' 与单位容积微粒的总数成正比，即与浊度成正比：

$$I = K' TI_0$$

式中：

K' —系数常数；

T —水浊度，NTU。

在入射光 I_0 不变的情况下，散射光强度 I 与浊度成正比，浊度测量转化为散射光强度的测量。光源与光电接收器件集成在密封的探头中，使得入射光经过水中颗粒的散射，被与它成 90° 角的光电接收器件接收后，可测出水样的浊度。

3.3 透射光—散射光比较测量法

当光源发出的发光强度为 I_0 的光通过水样时，由于水样中悬浮固体和杂质的吸收和散射作用，使穿过水样的透射光发光强度减弱到 I_T ，发光强度的减弱符合朗伯-比耳定律，公式如下：

$$I_T = I_0 \exp(-\tau L)$$

式中：

I_T —透射光发光强度，cd；

I_0 —入射光发光强度，cd；

τ —与发光强度无关的衰减系数；

L —透射光程，mm。

水样颗粒物质与光相互作用时，产生的散射光发光强度及其在空间的分布与微粒直径大小、微粒折射率、入射光发光强度等诸多因素有关。利用瑞利散射原理和米氏散射原理，散射光与入射光的关系式为：

$$I_S = \alpha N I_0 \exp(-\tau l)$$

式中：

I_S —散射光发光强度，cd；

α —与散射函数有关的系数；

N —水样中含有的颗粒个数，与浊度成正比，mol；

l —散射光程，mm。

同时测量投射于水样光束的透射光和散射光强度，再按这两者光强度比值测量其浊度大小：

$$\frac{I_S}{I_T} = \frac{\alpha N I_0 \exp(-\tau l)}{I_0 \exp(-\tau L)} = \alpha N \exp\left(\frac{l}{L}\right)$$

由上式可见，浊度与 α 以及散射透射光程比有关，而 α 和 l/L 都是被精确固定的，消除了由于 LED 光源老化以及不稳定对浊度测量的影响，有效地提高了测量准确度。测量仪器由光源、光电检测设备以及电子放大与计算机数据处理、控制系统等组成。光源发出的光通过测量水样，到达光电检测设备后被接受而转化为电信号，同时测量水样中的样品在光照下产生散射，散射光被与入射光线成 90° 放置的另一光电检测器接受并转化为电信号。两信号经电子放大后进入电子处理系统，两信号分别随样品浊度增加分别减小和增大，系统将两信号进行计算得到样品的浊度。

3.4 浊度测定方法适用性介绍

- 1) **透射光式浊度测量法：**原理简单，测量低浊度水样时，大部分光都直接透射，微小的浊度变化引起的透射光变化小，所以透射光方法不适合测量低浊度；而水样中浓度较高的杂质和微粒能使透射光信号衰减更加明显，其适用于测量高浊度水样。
- 2) **散射光式浊度测量法：**对于低浊度水样，光对微粒的散射作用更加明显，并且在此范围内散射光曲线线性较透射光好，散射光式浊度测量法在低浊度测量时具有较高的准确度和灵敏度。当液体的浊度超过一定界限时，会发生多次散射现象，使散射光强度迅速下降，因此不适用于高浊度液体。
- 3) **透射光-散射光比较测量法：**能同时测量投射于水样光束的透射光和散射光强度，再按两者光强度比值测量其浊度大小，其理论基于朗伯-比耳定律和散射定律，消除光源老化对测量准确度的影响能有效提高测量准确度。但是散射光和透射光之比不具有严格的线性关系，只是在一定的浊度范围内有近似线性的关系，浊度的测量范围有一定的局限性。

4、水质悬浮物测定光学法可行性探究

水质中悬浮物测定重量法作为目前悬浮物测定国标方法，因此本实验以重量法测定数据为参考，对光学法测定数据进行评价判断。

4.1 水质悬浮物光学法与重量法实验

现场采集多点位雨排口样品，采用水质悬浮物重量法及光度法（哈希 DR6000 分光光度计）完成水质悬浮物的测定及数据统计。

4.1.1 水质悬浮物光学法与重量法实验数据统计

部分实验数据汇总如下（共完成 52 组数据统计）：

表 1 雨水井样品悬浮物光学法与重量法实验数据（部分）统计表

序号	重量法/mg/L	光度法/mg/L	相对偏差/%	外观描述
1	16	15	3.23	无色透明
2	4	4	0.00	无色透明
3	22	23	-2.22	微黄微混
4	27	40	-19.40	微黄微混无沉淀
5	11	11	0.00	无色透明
6	35	47	-14.63	微黄微混无沉淀
7	10	11	-4.76	无色透明
8	61	98	-23.27	微黄微混无沉淀
9	66	91	-15.92	微黄微混无沉淀

10	21	11	31.25	无色透明，底部有少量泥沙沉淀
11	269	123	37.24	微黄微混有沉淀
12	12	13	-4.00	无色透明
13	42	18	40.00	无色透明，底部有少量泥沙沉淀
14	6	3	33.33	无色透明
15	32	40	11.11	微黄有絮状沉淀
16	7	9	12.50	无色透明

4.1.2 数据分析

结合 Minitab 软件对以上汇总数据进行统计分析，如下：

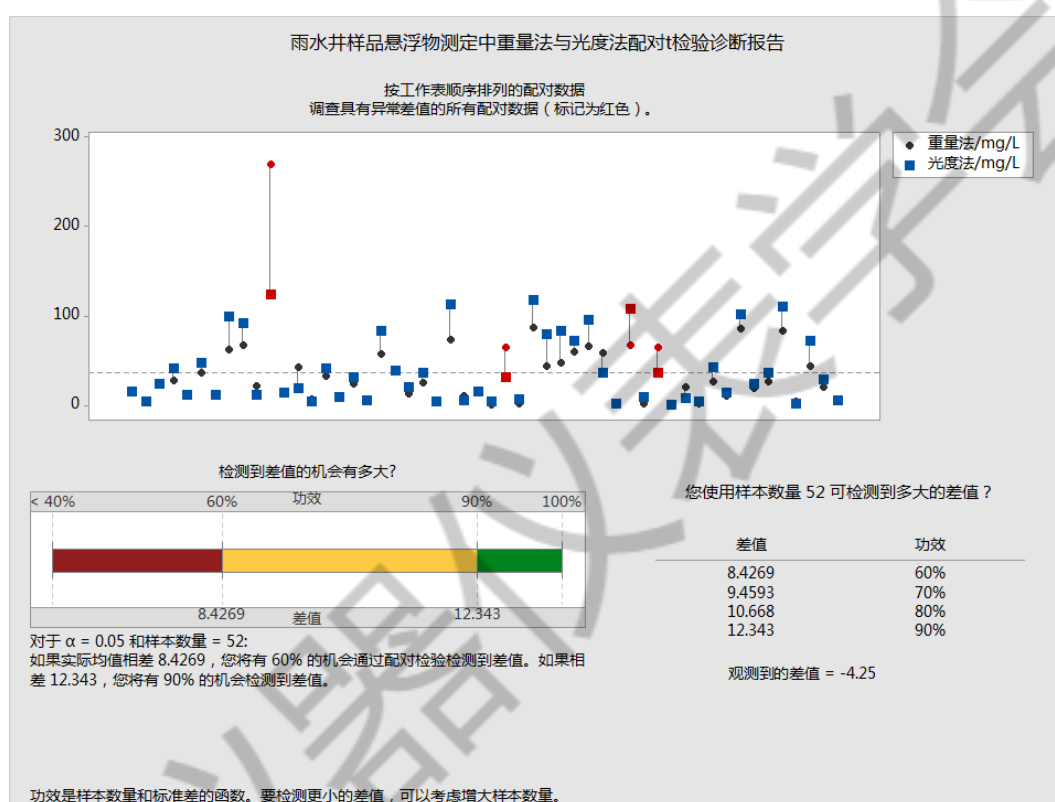


图1 雨排口样品悬浮物测定方法配对 t 检验诊断报告

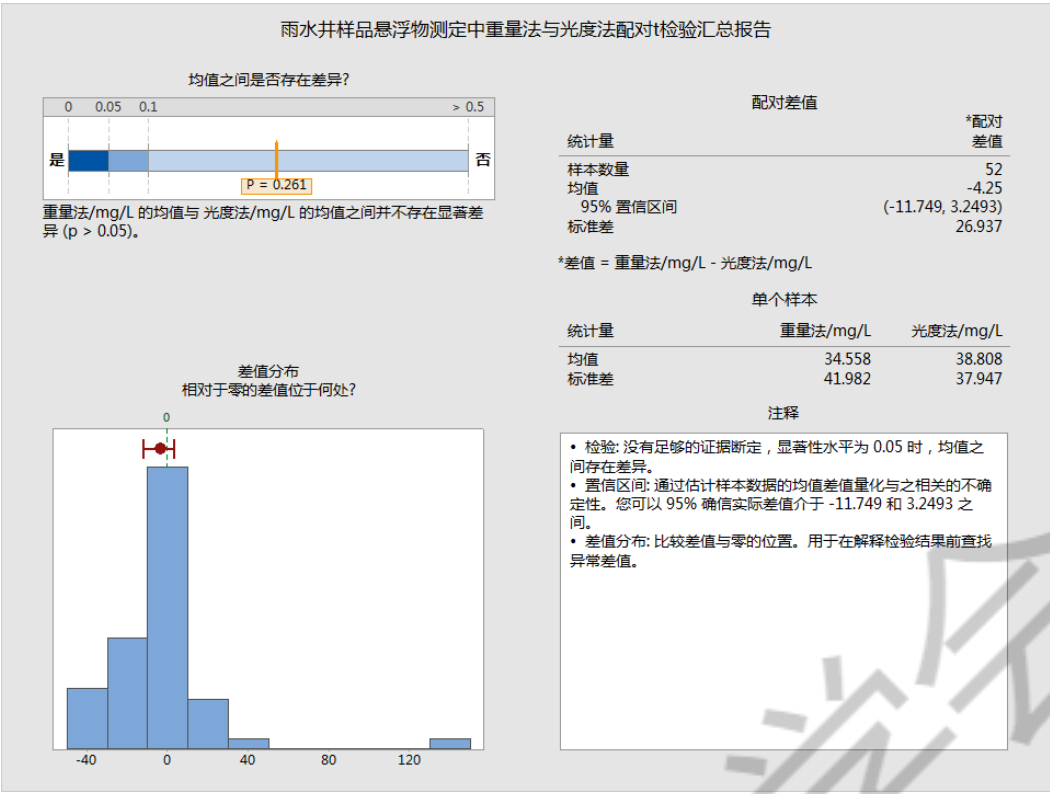


图 2 雨排口样品悬浮物测定方法配对 t 检验汇总报告

4. 1. 3 实验结论分析

- 1) 结合上述数据及图 2 的分析汇总报告可知, 悬浮物重量法分析和光度法分析数据之间无显著差异, 光度法可以用于水质悬浮物的测定, 且数据准确性有保障;
- 2) 结合图 1 分析, 从分析报告中可以看出有几组数据存在异常, 结合原始数据及对应样品性状分析, 数据差异大主要受到水质中沉淀物干扰, 分光法受到水质性状干扰明显。

5、水质悬浮物与浊度的关系探究

水质中浊度目前主要采用浊度计进行分析, 实验室采用散射光式测定法分析浊度, 且上文中也介绍到水质悬浮物光度法也是采用光散射原理, 收集90° 和120° 散射光完成分析, 两种方法间存在一定的关联性, 因此通过实验探究两方法之间的关系。

5. 1 雨排口样品悬浮物（光学法）与浊度实验数据统计

5. 1. 1 雨排口数据统计

采用雨排口样品进行分析, 收集悬浮物计浊度数据后进行分析讨论, 共完成 59 组数据, 部分数据如下:

表 2 雨水井样品悬浮物（光学法）与浊度实验数据（部分）统计表

序号	悬浮物（光度法）/mg/L	浊度/NTU
1	216	160

2	63	39.5
3	9	7.5
4	156	117
5	47	32.9
6	125	82.2
7	14	11.1
8	15	7.47
9	4	2.06
10	23	20.9
11	40	29.9
12	11	6.66
13	47	33
14	11	7.3
15	98	60.4
16	91	57.9

5.1.2 数据分析

结合 Minitab 软件对以上汇总数据进行统计分析，如下：

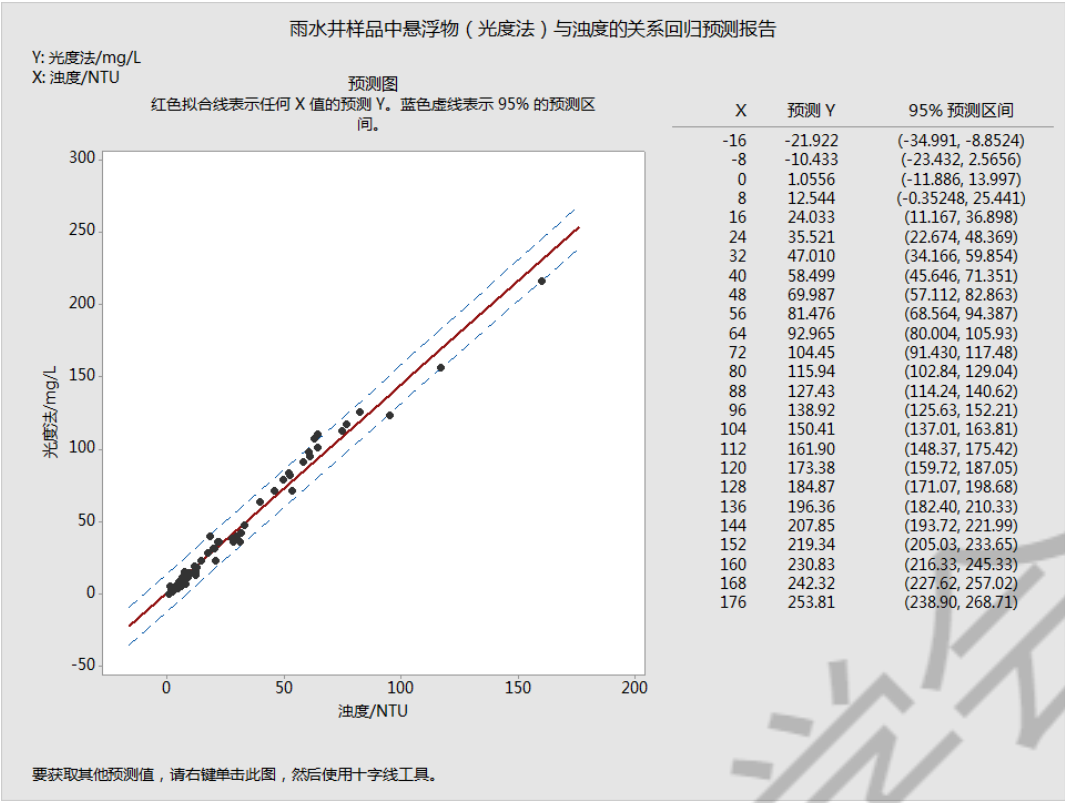


图 3 雨水井样品中悬浮物（光度法）与浊度关系回归预测报告

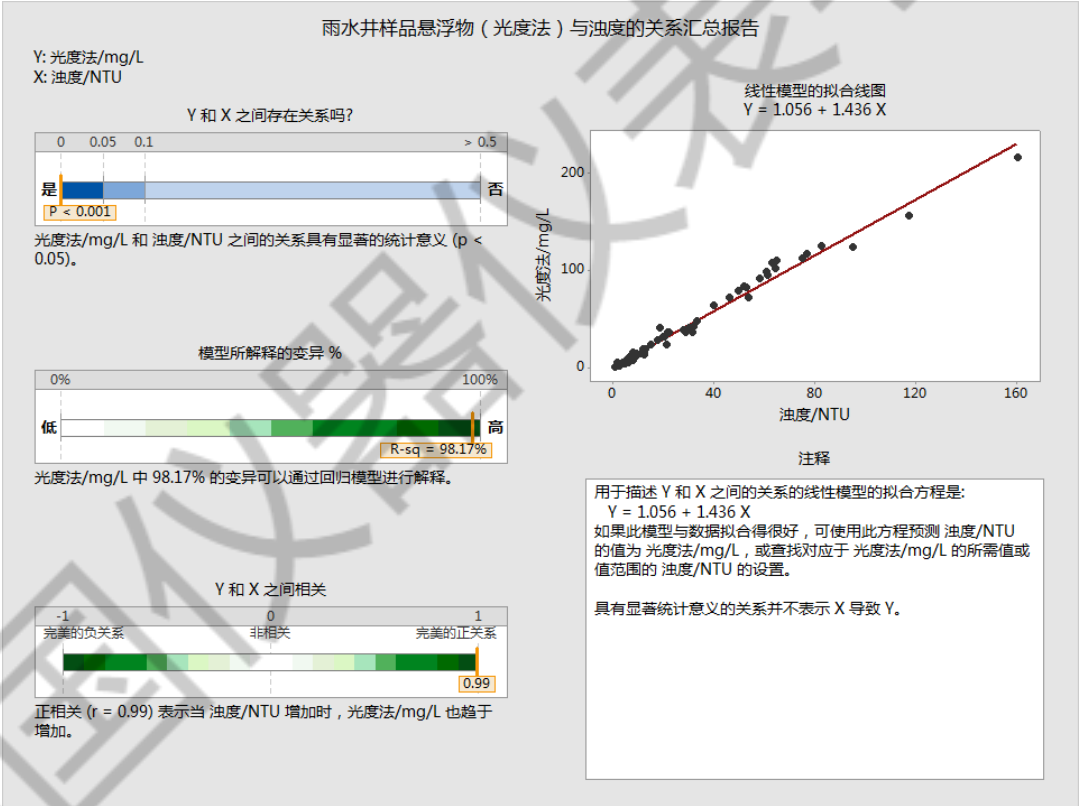


图 4 雨水井样品中悬浮物（光度法）与浊度关系汇总报告

5.1.3 实验结论分析

1) 结合 Minitab 软件分析可知，水质中悬浮物（光度法）与浊度之间存在显著的线性正相关；

2) 图 4 可知，两方法间存在显著线性关系，但相关性系数值相对偏小，初步怀疑雨排口样品中悬浮物种类来源复杂，干扰水质浊度测定的数据。

5.2 污泥样品悬浮物（光学法）与浊度实验数据统计

本实验采用水处理过程中的生物污泥样品，按比例依次稀释配制不同浓度梯度的实验样品，保障样品中悬浮物种类单一，进行实验测定样品中悬浮物（光度法）与浊度的关系。

5.2.1 雨排口数据统计

对实验数据进行统计如下：

表 3 污泥样品悬浮物（光学法）与浊度实验数据统计表

序号	悬浮物（光度法）/mg/L	浊度/NTU
1	9	3.24
2	10	3.87
3	21	7.64
4	30	11.8
5	41	14.7
6	49	17.8
7	71	25.2
8	79	28
9	100	35.2
10	125	43.4

5.2.2 数据分析

结合 Minitab 软件对以上数据进行统计分析，如下：

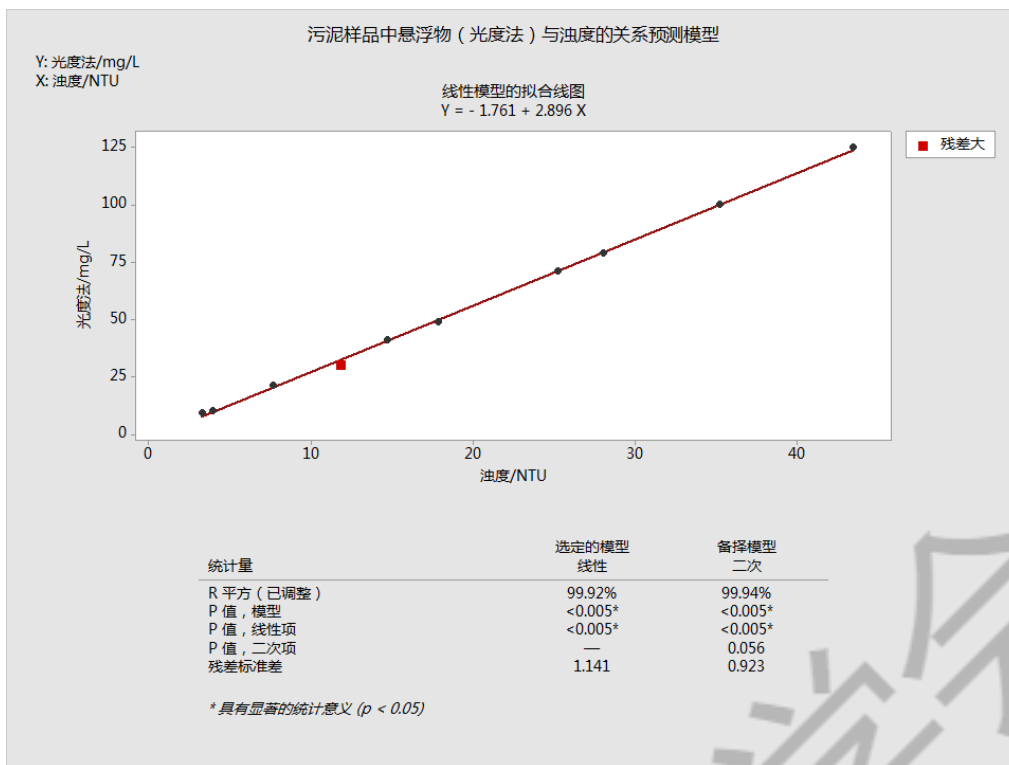


图 5 污泥样品中悬浮物（光度法）与浊度关系预测模型

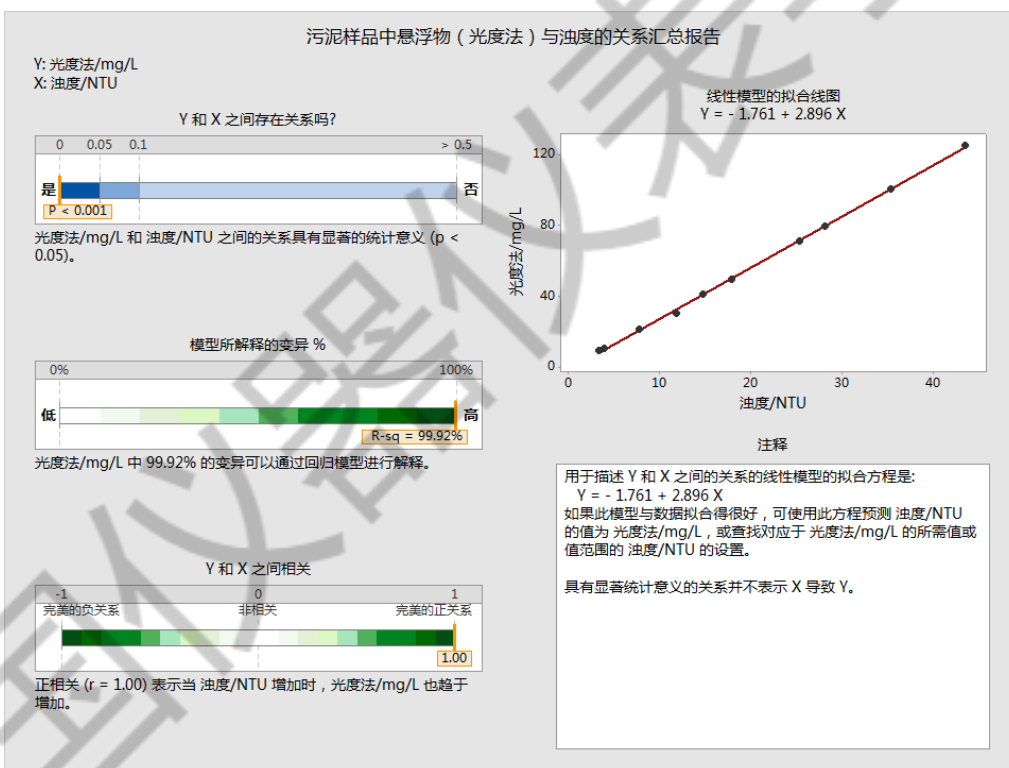


图 6 污泥样品中悬浮物（光度法）与浊度关系汇总报告

5.2.3 实验结论分析

上述实验采用生物污泥样品梯度稀释后所得实验数据显示, 在控制悬浮物来源后, 样品的悬浮物（光度法）与浊度之间成线性正相关。

5.3 影响水质浊度测定的因素分析

查阅相关资料，有以下多种因素造成水质浊度的测定偏差，同时悬浮物的光度法测定原理与浊度原理相似，同样会受到以下因素干扰。

- 1) **悬浮颗粒物粒径大小的影响：**在浊度测量中，水样中的泥砂的粒径大小对浊度影响明显，自然水域中泥砂的粒径尺度为 $0.2\ \mu\text{m}\sim 500\ \mu\text{m}$ ，泥与砂的比例不同，对测定结果影响不同。主要表现在粒径大的砂沉降速度快，测量值变化大难以准确记录结果，使测量的精密度较差。
- 2) **泥砂颜色的影响：**泥砂的颜色发生变化会降低测量的准确性，白色的方解石反射光很强，黑色的磁铁矿吸收红外光，红色对浊度测定有影响。泥砂的黄色和绿色对测定结果影响很小。
- 3) **气泡的影响：**气泡发散红外光，水样中气泡对测量结果产生负影响。气泡对高浓度样品影响很小，对低浓度样品影响较大。在摇匀样品时应避免剧烈振荡，测定时，应静置一会儿让气泡散完。

6. 实验总结

- (1) 水质中浊度测定与悬浮物（光度法）测定均为光学仪器法，且测定原理均采用光的散射作用，测定过程中主要受到水中悬浮颗粒粒径大小、泥沙颜色计样品中气泡等影响，导致测定结果存在一定的偏差。
- (2) 悬浮物重量法分析和光度法分析数据之间无显著差异，光度法可以用于水质悬浮物的测定，且数据准确性有保障。
- (3) 水质中悬浮物（光度法）与浊度之间存在显著的线性正相关，保障样品中悬浮物种类单一，样品的悬浮物（光度法）与浊度之间成线性正相关。

参考文献

- [1] 《哈希浊度仪 2100N 说明书》.
- [2] 《哈希 DR6000 分光光度计说明书》.
- [3] 《哈希 TSS Portable 手持式浊度和悬浮物测定仪用户操作手册》(HJ/T 44-1999).
- [4] 《水质悬浮物的测定 重量法》(GB 11901-1989).