

张亚莉,张乃迁,罗锡文,等. 水中悬浮物浓度的检测方法研究进展[J]. 江苏农业科学,2016,44(5):20-23.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.05.005

水中悬浮物浓度的检测方法研究进展

张亚莉¹,张乃迁²,罗锡文¹,杨广文¹,谢金延¹,曾伟渺¹,欧阳健焱¹

(1. 华南农业大学工程学院/南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室,广东广州 510642;

2. Biological and Agricultural Engineering Department, Kansas State University, Manhattan K S 66502, USA)

摘要:水中悬浮物是重要的农业非点源污染物之一,也是水质评价的重要研究对象,对水中悬浮物浓度的有效检测有助于确定相关水域的悬浮物最大日负荷(total maximum daily loads, TMDL)以及相应的最佳管理操作(best management practice, BMP)。对水中悬浮物浓度的检测方法,包括传统称质量法、光学传感器、激光衍射、遥感、声学、图像处理、电容等方法进行了总结和归纳,分析各自的优势和存在的问题并提出了建议。结果表明,在利用遥感技术、水中传感器研究的基础上,从空间、地面进行信息采集和融合,并开展多源实时监测水中悬浮物浓度的研究是未来的发展方向。

关键词:悬浮物;非点源污染;最大日负荷;最佳管理操作

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)05-0020-04

水中悬浮物浓度是农业水土保持研究和水质评价的重要参数,本研究讨论的悬浮物(suspended sediment, SS)是指在

收稿日期:2015-11-29

基金项目:国家“863”计划(编号:2011AA100704);国家自然科学基金(编号:51309103);华南农业大学大学生创新创业训练计划(编号:201410564042)。

作者简介:张亚莉(1975—),女,山东菏泽人,博士,讲师,研究方向为农情信息快速检测方法 & 传感器研制。E-mail: ylzhang@scau.edu.cn。

通信作者:罗锡文,硕士,教授,中国工程院院士,研究方向为南方农业机械与装备关键技术、精准农业关键技术。E-mail: xwluo@scau.edu.cn。

水中保持悬浮一段相当长的时间而不会沉底的非常细微的土壤颗粒^[1]。水中悬浮物已被美国环境保护署(EPA)确定为重要的非点源(non-point source, NPS)污染物以及影响河流、小溪发挥有效功能的最普遍的污染物^[2-3]。

与其他水环境污染物质一样,水中的悬浮物对水生态系统有不利的影响。水生生物对悬浮物的浓度和持续时间都有不良反应。悬浮物会引起光衰减,缩短透光区的深度,改变水体中热量的垂直分层。大量悬浮物的存在是限制鱼类栖息地的重要因素,也是减少北美水生生物数量的显著危害者之一^[4-5]。

工业废水污水的排放,以及来自城市、农场的雨水径流都含有有毒化学物质。当水中的悬浮物携带有毒化学物质时,

[64] Group O. Monitoring the incidence and causes of diseases potentially transmitted by food in Australia: annual report of the OzFoodNet network, 2011 [J]. Communicable Diseases Intelligence Quarterly Report, 2015, 39(2): 236-264.

[65] Scallan E, Hoekstra R M, Angulo F J, et al. Foodborne illness acquired in the United States—major pathogens [J]. Emerging Infectious Diseases, 2011, 17(1): 7-15.

[66] 庞璐,张哲,徐进. 2006—2010 年我国食源性疾病暴发简介[J]. 中国食品卫生杂志, 2011, 23(6): 560-563.

[67] 徐君飞,张居作. 2001—2010 年中国食源性疾病暴发情况分析[J]. 中国农学通报, 2012, 28(27): 313-316.

[68] Majowicz S E, Musto J, Scallan E, et al. The global burden of nontyphoidal *Salmonella* gastroenteritis [J]. Clinical Infectious Diseases, 2010, 50(6): 882-889.

[69] Jackson B R, Griffin P M, Cole D, et al. Outbreak-associated *Salmonella enterica* serotype and food commodities, United States, 1998—2008 [J]. Emerging Infectious Diseases, 2013, 19(8): 1239-1244.

[70] United States Department of Agriculture. Serotypes profile of *Salmonella* isolates from meat and poultry products January 1998 through December 2013 [EB/OL]. (2015-11-17) [2016-02-

07]. <http://www.fsis.usda.gov/wps/portal/ffsis/topics/data-collection-and-reports/microbiology/annual-serotyping-reports/serotypes-2013>.

[71] Li Y, Xie X, Xu X, et al. Nontyphoidal salmonella infection in children with acute gastroenteritis: prevalence, serotypes, and antimicrobial resistance in Shanghai, China [J]. Foodborne Pathogens and Disease, 2014, 11(3): 200-206.

[72] Zhang J, Jin H, Hu J, et al. Serovars and antimicrobial resistance of non-typhoidal *Salmonella* from human patients in Shanghai, China, 2006—2010 [J]. Epidemiology and Infection, 2014, 142(4): 826-832.

[73] 刘雯静. 我国部分地区沙门氏菌的分子分型及流行特征分析[D]. 北京:中国人民解放军军事医学科学院, 2011.

[74] 李桦,汪伟山,周玉球. 2009—2014 年珠海市腹泻儿童沙门菌感染的流行病学特征[J]. 国际检验医学杂志, 2015, 36(18): 2640-2642.

[75] Todd E C, Greig J D, Bartleson C A, et al. Outbreaks where food workers have been implicated in the spread of foodborne disease. Part 4. Infective doses and pathogen carriage [J]. Journal of Food Protection, 2008, 71(11): 2339-2373.

[76] Jay J M, Loessner M J, Golden D A, et al. 现代食品微生物学[M]. 7 版. 北京:中国农业大学出版社, 2008: 443.

由于这些物质会长时间悬浮在水中而不容易沉积在水底,在顺水流向下游运输过程中就可能成为水体污染的潜在来源。受到污染的悬浮物不仅威胁水体环境,也给人类健康带来风险。美国环境保护署(EPA)估计,美国 10% 湖泊、河流和海湾受到携带有毒化学物质的悬浮物污染,并经由鱼类和底栖生物积累、传递到食物链。由于受污染的水体其娱乐和商业用途的流失以及处理污染而增加的成本,美国数十亿美元的经济活动为此受到影响^[2]。

有效监测水中悬浮物的浓度对评价水质和评估潜在不利影响至关重要,监测悬浮物某时段被河流运输的总量可以帮助确定水库的环境影响,并估算水库的寿命^[6]。作为关键参数之一,水和废水处理过程中也要求测定悬浮物浓度,以监测各处理阶段的工作状况^[7]。人类工农业生产活动可能会造成大量的水土流失和水质下降,悬浮物浓度的监测有助于确定受损水域的悬浮物最大日负荷(total maximum daily loads, TMDL),并采取相应最佳管理操作(best management practice, BMP)^[8]。

1 过滤称质量法

传统的确定水中悬浮物浓度的方法包括使用专用采样瓶或自动取样器户外水样采集程序,以及过滤、干燥、称质量等实验室程序,水样应在 24h 内被带回实验室进行过滤。我国规定,实验室操作方法中用孔径 0.45 μm 的滤膜过滤水样,并于 103 ~ 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量^[9-10]。

传统方法检测水中悬浮物浓度耗时费力、工作量大,虽然自动取样器在一定程度上减轻了劳动消耗,但是受限于采样器有限的存储空间,雨天时现场人员仍然需要替换采样器内部的采样瓶。手动或自动采样缺乏对暴雨时悬浮物浓度快速及瞬时信息的获取能力,因此用传统方法通常会错过悬浮物浓度的高峰,而此高峰期运输了悬浮物总量中的绝大部分^[6,11]。大多数其他检测技术都是根据传统的称质量法进行标定的。

2 光学测量方法

光学测量相对简单,且成本较低。光学传感器通常测量悬浮物受到可见光或近红外光源照射后的散射或透射的光线信号强弱,以确定水中悬浮物的浓度,并在记录水中悬浮物浓度的快速波动方面展现出可靠的能力^[12-13]。

许多学者使用后向散射(optical backscatterance, OBS)光学传感器测量水中的悬浮物浓度,并由此研究水土流失总量^[14]。OBS 传感器的光信号测量元件在与光源成 45 $^{\circ}$ 的位置上测量被水中悬浮物颗粒后向散射的光线,能够在很大范围内对水中悬浮物的浓度产生线性响应。尽管此类传感器在高浓度的悬浮物浓度时测量电路往往达到饱和,但可以通过仔细调整其增益大小来克服。测量透射光的传感器在悬浮物浓度较小时应用广泛,但是极端的信号衰减不适用于相对较高的悬浮物浓度的测量^[14-16]。Buttmann 在研究中发现,90 $^{\circ}$ 的散射光是测量水中悬浮物浓度最合适的参数,这是因为 90 $^{\circ}$ 位置处测量的散射信号与 45 $^{\circ}$ 测量的反向散射和 180 $^{\circ}$ 测量的透射相比最稳定,不受悬浮物颗粒尺寸的影响^[17]。

美国堪萨斯州立大学实验室研制的光学悬浮物浓度传感

器集成使用了后向散射、散射和透射 3 种测量方法,并通过试验确定了可见光和红外线波段不同的波长来检测水中的悬浮物含量^[18-19]。实验室试验证明:利用可见光、红外波段的不同波长光源,可以帮助减少水的颜色对水中悬浮物测量的影响;同时该悬浮物传感器对水中悬浮的藻类等杂质不敏感,从而使测量只反映水中悬浮物浓度^[18]。

浊度(turbidity)经常被用来作为水中悬浮物浓度的替代测量,这种方法首先需确定浊度和悬浮物浓度之间的相关关系^[20-22]。然而,浊度描述水样的光学性质,是光线透过水层时受到阻碍的程度,表示水层对于光线散射和吸收的能力,单位是 NTU。它不仅与悬浮土壤微粒有关,而且还与水中其他杂质,如细小分散的无机和有机物质、浮游生物及其他微小生物体的成分等有关^[23-24]。因此,浊度是水的光学特性,而不是水中悬浮物浓度的真实量度^[25-26]。此外,建立悬浮物-浊度关系不但耗时,而且这种关系不能在不同的水体间自由转换^[27]。

光学器件长期在水中工作都会受到生物淤积的影响,光源信号和接收到的反射或透射信号逐渐衰减,因此使用浸入式光学传感器测量水中悬浮物浓度时,必须定时对传感器进行清洗。除了人工清洗外,许多学者也对高压空气、超声波和机械式等多种方法清洗光学镜头的效果进行了研究^[19]。

3 激光衍射技术

激光衍射的概念源自光散射物理学,是一种测定粒子尺寸分布的快速、准确、精密的分析手段,并得到了广泛的应用^[28]。激光衍射法通过测量激光束穿过被测颗粒样品时散射光角度的不同对粒度分布进行测定。当不规则形状的悬浮物颗粒对激光进行散射时,大颗粒以小角度对激光进行散射,而小颗粒则以大角度散射光线,与相同直径小孔的衍射模式相同。这个特性使研究人员可以把悬浮物颗粒当作相同尺寸的孔来考虑,因此这种方法被称为激光衍射。

激光衍射传感器使用 1 束激光作为光源,不同尺寸的悬浮物颗粒衍射的光线通过一系列直径逐渐增大的环状检测器测量,以确定不同粒径的激光衍射角度^[29]。如果悬浮物颗粒密度已知,那么浓度由每个粒径级别上的悬浮物颗粒的体积决定^[30]。Agrawal 等使用激光衍射传感器,测量水中悬浮物引起的激光衍射,并由此推断悬浮物颗粒尺寸分布和浓度^[31-32]。激光衍射技术检测水中悬浮物浓度的传感器也可作为测量水中悬浮物在某一时段总量的替代方法。但此类传感器的缺点是尺寸较大,水中测量会导致水流阻塞^[33-34]。

4 遥感技术

卫星遥感作为一种长时间和大范围获取地表信息的技术手段,在一定程度上能够解决水体监测野外观测不便、数据获取困难等问题。一般来说,测量水体反射的光谱仪安装在飞机或卫星上。使用遥感技术获取水中悬浮物浓度的方法通常可以检测大片水面,但分辨率低,特别在水体泥沙浓度较高、测量深度仅限于水体顶端的几米范围^[29]。

杨大伟利用现场采集的太湖底部表层沉积物,在实验室配比不同浓度的悬浮物水样,进行悬浮物光谱反射率的测量,同时采集表层水样,进行实验室浓度测量,以寻找试验控制条

件下悬浮物的高光谱遥感敏感波段并建立其定量估算模型,并采用 NASA 水体光谱测量规范,分别测出水体、天空散射光及标准反射板的辐亮度值,计算遥感反射率^[35]。金鑫等根据巢湖 32 个样点实测的遥感反射率、悬浮物浓度、吸收系数及散射系数等数据,分析巢湖水体各组分的吸收、散射等固有光学特性,确定悬浮颗粒物单位散射系数、后向散射概率等固有光学参数,构建基于生物光学模型的悬浮物浓度反演模型,反演巢湖悬浮物浓度,得到实测值与反演值之间的相对误差随着浓度的增加而呈现下降的趋势,表明该方法适用于反演悬浮物浓度较高的湖泊水体^[36]。王繁等利用 ASD 地物光谱仪测量杭州湾水体的反射光谱,同步采集表层水样获取悬浮物浓度,模拟水色卫星 MODIS 和 MERIS 的波段设置提取遥感反射率,基于人工神经网络分别建立 2 种悬浮物浓度的遥感反演模式^[37]。孙家锋提出了使用卫星遥感监测海域的悬浮物质定量的试验标定方法,并使用该技术在渤海辽东湾进行海上水质现场调查试验,实现对悬浮物质的分类、组成和测定^[38]。张伟以时间序列的 HJ-1A/1B 卫星 CCD 传感器数据为数据源,以鄱阳湖水体总悬浮物浓度变化遥感监测为目标,开展模型算法研究与时空动态变化规律分析^[39]。查桂红以太湖、巢湖、滇池和三峡水库为研究对象,首先采用 2 步聚类法对研究区采样点的遥感反射率光谱曲线进行分类,进而分析了不同类型水体的表观光学特性和固有光学特性,在此基础上针对不同类型水体分别构建了相应的悬浮物浓度遥感估算模型,进而将模型应用于太湖地区的 GOCI 影像上,实现基于 GOCI 影像的太湖悬浮物浓度遥感估算,并分析了太湖悬浮物浓度的空间分布特征及其变化趋势^[40]。

5 声学测量方法

许多科研人员对水中悬浮物进行了声学测量的研究^[41-42]。利用声学技术,将传感器产生的高频声音信号(1~5 MHz)导入测量水体中,声音信号反射回来的部分传回该传感器,其信号强度可用来确定水中悬浮物浓度^[43]。这种方法需预先校准水中悬浮物浓度与声学仪器输出信号之间的关系。

声学测量方法的优点是非侵入式测量,不会改变水流状态,而且可以测量垂直范围几米的悬浮物;缺点是信号会在高悬浮物浓度时衰减^[29],声音信号也容易被生物材料吸收。此外,声学仪器通常有水深限制,通常不能用于浅水河流的测量^[44]。

6 数字图像分析

计算机和图像处理技术的快速发展,提供了使用视频和图像分析测量水中悬浮物浓度的方法。这种方法需要将摄像机进行隔水密封并安装在水下特制的箱体内部,箱体内配有玻璃视窗,以供摄像机记录含有悬浮物的水流的实时状态,由计算机控制的测量分析系统对水中的悬浮物浓度和尺寸分布进行分析^[29]。系统的测量精度依赖于视频系统的分辨率和图像处理方法,而且该设备整体尺寸大,当浸没在水中会引起水流较大的扰乱。此外,玻璃视窗上的污垢,也会降低该系统的测量精度。

7 电容传感器

电容式传感器已被广泛用于测量土壤含水量。由于悬浮

物-水的混合溶液也同样具有固相和液相,则悬浮物和水分别在混合溶液中的组分,可以通过测量该混合溶液的介电常数来确定。Li 等研究了 2 种类型的电容传感器——平行平板型和圆筒型传感器,用来测量水中悬浮物浓度,并且分别建立了水中悬浮物浓度和 2 种类型电容传感器的输出电容之间的关系^[45]。结果表明,悬浮物的浓度与电容传感器的输出信号在很大范围内均呈线性相关,不过电容传感器测量水中悬浮物浓度的缺点是易受温度变化的影响。

8 结论

悬浮物浓度是水环境质量的重要影响因素之一,也是环境监测的一项重要指标。大量的水土流失造成江河水中悬浮物大量增加,而地表水中存在过多的悬浮物,会引起水体浑浊,透明度降低,影响水生生物的呼吸和代谢,并且当水中悬浮物多时,还可能造成河道阻塞,降低水库等水体的使用寿命,因此检测和监测水中的悬浮物浓度有重要意义。

传统的过滤称质量法测量水中悬浮物浓度是目前的标准测定方法,随着计算机技术和电子技术的快速发展,光学、遥感、图像处理、声学、电容等技术分别在测量水中悬浮物浓度方面得到越来越多的应用。其中遥感技术由于可以长时间、大范围获取水中悬浮物信息,在保证测量精度的前提下可以解决野外水体监测数据获取困难的问题。光学测量传感器可以长期浸入式测量水中的悬浮物浓度,但要解决好传感器长期测量时光学元件面临的生物淤积问题。在两者基础上对水中悬浮物浓度和其他水质参数从空间和地面进行双重信息采集和分析,开展多源实时多参数监测技术的研究,是未来的发展方向。

参考文献:

- [1] USGS. Water science glossary of terms[EB/OL]. (2015-03-08) [2015-10-15]. <http://ga.water.usgs.gov/edu/dictionary.html>.
- [2] EPA. Report of the federal advisory committee on the total maximum daily load (TMDL) program[R]. Washington D C: Environmental Protection Agency, 1998.
- [3] EPA. Polluted runoff (Nonpoint Source Pollution)[EB/OL]. (2010-01-13) [2015-10-15]. <http://www.epa.gov/owow/NPS/qa.html>.
- [4] 王鲁宁,魏皓,赵亮.光衰减系数与悬浮颗粒物浓度的关系[J].中国海洋大学学报:自然科学版,2014,44(4):8-14.
- [5] Henley W F, Patterson M A, Neves R J, et al. Effects of sedimentation and turbidity on lotic food webs: a concise review for natural resource managers[J]. Reviews in Fisheries Science, 2000, 8(2): 125-139.
- [6] Cochrane T A, Norton L D, Castro C, et al. Development of a river sediment transport monitoring system for large reservoirs[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2004, 20(6): 771-781.
- [7] 陈武强.测定水中悬浮物的影响因素及解决方法[J].化学工程与装备, 2010(7): 144-145.
- [8] EPA. Protocol for developing sediment TMDLs[EB/OL]. (1999-10-01) [2015-11-01]. <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/20004P3U.PDF?Dockey=20004P3U.PDF>.
- [9] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法编委会[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [10] 冯胜.提高测定水中悬浮物准确率的方法[J].化学工程与装

- 备,2011(10):204-205.
- [11] Burkhead N M, Jelks H L. Effects of suspended sediment on the reproductive success of the tricolor shiner, a crevice - spawning minnow[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2001, 130(5):959-968.
 - [12] Daraigan S G., Matjafri M Z, Abdullah K, et al. A simple instrument for measuring total suspended solids in polluted marine waters[C]. New York: Proceedings of 2005 Asian Conference on Sensors and the International Conference on New Techniques in Pharmaceutical and Biomedical Research, IEEE. 2005:219-221.
 - [13] Daraigan S G., Matjafri M Z, Abdullah K, et al. Multi - spectral optical sensor based on light scattering for measuring total suspended solids[C]. Bellingham, W A: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, SPIE, 2006:6201, 62010W - 1 - 62010W - 6.
 - [14] McKee L J, Ganju N K, Schoellhamer D H. Estimates of suspended sediment entering San Francisco Bay from the Sacramento and San Joaquin Delta, San Francisco Bay, California [J]. Journal of Hydrology, 2006, 323(1):335-352.
 - [15] Gregory J, Nelson D W. Monitoring of aggregates in flowing suspensions[J]. Colloids & Surfaces, 1986, 18(2/3/4):175-188.
 - [16] Maa J P Y. Laboratory measurements of instantaneous sediment concentration under waves[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1988, 13(4):299-302.
 - [17] Buttmann M. Suspended solids measurement as reliable process control[C]. Houston, T X: Instrument Society of America. ISA TECH EXPO Technology Update Conference Proceedings, 2001, 413(1):563-572.
 - [18] Stoll M Q. Design of a real - time, optical sediment concentration sensor[D]. Ks: Kansas State University, 2004.
 - [19] Zhang Y L. An optical sensor for in - stream monitoring of suspended sediment concentration[D]. Ks: Kansas State University, Department of Biological & Agricultural Engineering, 2009.
 - [20] Gao P, Pasternack G B, Bali K M, et al. Estimating suspended sediment concentration using turbidity in an irrigation - dominated south-eastern California watershed[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering - ASCE, 2008, 134(2):250-259.
 - [21] Sadar M. Turbidity instrumentation - an overview of today's available technology[EB/OL]. [2015-11-01]. <http://water.usgs.gov/osw/techniques/TSS/sadar.pdf>.
 - [22] 翟世奎, 张怀静, 范德江, 等. 长江口及其邻近海域悬浮物浓度和浊度的对应关系[J]. 环境科学学报, 2005, 25(5):693-699.
 - [23] APHA, AWWA, WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. Washington D C: APHA, 2012.
 - [24] EPA. Guidance manual for compliance with the interim enhanced surface water treatment rule: Turbidity provisions[R]. Washington D C: United States Environmental Protection Agency, 1999.
 - [25] Riley S J. The sediment concentration turbidity relation: its value in monitoring at Ranger Uranium Mine, Northern Territory, Australia [J]. Catena, 1998, 32(1):1-14.
 - [26] Davies - Colley R J, Smith D G. Turbidity, suspended sediment, and water clarity: a review[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2001, 37(5):1085-1101.
 - [27] Marquis P. Turbidity and suspended sediment as measures of water quality[J]. Watershed Management Bulletin, 2005, 9(1):21-23.
 - [28] 曹江荣, 赵英新, 李兴萍. 激光衍射粒度分布仪在水质浊度监测中的应用[J]. 聚酯工业, 2013, 26(6):20-21, 43.
 - [29] Wren G D, Barkdoll B D, Kuhnle R A, et al. Field techniques for suspended - sediment measurement [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(2):97-104.
 - [30] Gray J R, Melis T S, Patino E, et al. U. S. geological survey research on surrogate measurements for suspended sediment [EB/OL]. [2015-11-01]. <http://www.tucson.ars.ag.gov/icrw/Proceedings/Gray.pdf>.
 - [31] Agrawal Y C, Pottsmith H C. Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport [J]. Marine Geology, 2000, 168(1/2/3/4):89-114.
 - [32] Agrawal Y C, Pottsmith H C. Laser diffraction sensors measure concentration and size distribution of suspended sediment [EB/OL]. [2015-11-01]. http://www.comm-tec.com/Library/Technical_Papers/Various/cool/pl2Agrawal_Pottsmith.pdf.
 - [33] Melis T. S, Topping D. J., Rubin D M. Testing laser - based sensors for continuous in situ monitoring of suspended sediment in the Colorado River, Arizona [C]. Proceedings of the Oslo Workshop (Erosion and Sediment Transport Measurement in Rivers: Technological and Methodological Advances). Oslo, Norway: IAHS Press, 2002:21-27.
 - [34] Wei J W, Shi X F, Fang X S, et al. Measurements of suspended particulate matter with laser in - situ scattering and transmissometry in the Jiaozhou Bay in China [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 26(1):55-65.
 - [35] 杨大伟. 基于实验和实测光谱的太湖悬浮物浓度估算模型研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2008.
 - [36] 金鑫, 李云梅, 王桥, 等. 基于生物光学模型的巢湖悬浮物浓度反演[J]. 环境科学, 2010, 31(12):2882-2889.
 - [37] 王繁, 周斌, 徐建明, 等. 基于实测光谱的杭州湾悬浮物浓度遥感反演模式[J]. 环境科学, 2008(11):3022-3026.
 - [38] 孙家锋. 河口海域水体悬浮物浓度遥感反演计算的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2007.
 - [39] 张伟. 基于 HJ CCD 影像的鄱阳湖总悬浮物浓度反演与时空化研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012.
 - [40] 查桂红. 基于 GOCI 影像的内陆水体悬浮物浓度遥感估算研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2013.
 - [41] Thorne P D, Hanes D M. A review of acoustic measurement of small - scale sediment processes [J]. Continental Shelf Research, 2002, 22(4):603-632.
 - [42] Gartner J W. Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California [J]. Marine Geology, 2004, 211(3/4):169-187.
 - [43] Wren D G, Kuhnle R A. Surrogate techniques for Suspended - Sediment measurement [EB/OL]. (2002-04-30) [2015-11-01]. <http://water.usgs.gov/osw/techniques/TSS/wren.pdf>.
 - [44] Meral R. Laboratory evaluation of acoustic backscatter and LISST methods for measurements of suspended sediments [J]. Sensors, 2008, 8(2):979-993.
 - [45] Li X Y, Lei T W, Wang W, et al. Capacitance sensors for measuring suspended sediment concentration [J]. Catena, 2005, 60(3):227-237.