

薛 艳,王锦旗,宋玉芝,等. 紫外辐射在不同水体衰减影响因素分析[J]. 江苏农业科学,2018,46(19):297-302.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.19.076

# 紫外辐射在不同水体衰减影响因素分析

薛 艳<sup>1,3</sup>,王锦旗<sup>2,3</sup>,宋玉芝<sup>2,4</sup>,郑建伟<sup>2,4</sup>

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院,江苏南京 210044; 2. 南京信息工程大学应用气象学院,江苏南京 210044;  
3. 南京信息工程大学江苏省大气环境监测与污染控制高技术重点实验室,江苏南京 210044;  
4. 南京信息工程大学大气环境与装备技术协同创新中心,江苏南京 210044)

**摘要:**通过现场测定水体中紫外线 A (ultra violet - A radiation,简称 UV - A)、紫外线 B (ultra violet - B radiation,简称 UV - B)、紫外辐射 (ultra violet radiation,简称 UVR,UV - A + UV - B) 强度、水体浊度、透明度 (secchi disc,简称 SD) 及总溶解性固体质量浓度 (total dissolved solids,简称 TDS),并结合室内测定水体溶解性有机碳质量浓度 (dissolved organic carbon,简称 DOC)、有色可溶性有机物 (chromophoric dissolved organic matter,简称 CDOM) 在 280、355、440 nm 处的吸光度及叶绿素 a 的质量浓度,研究 UV - A、UV - B、UVR 的水体衰减系数与水环境因子之间的关系。结果表明,江苏省南京地区水体中紫外线衰减系数分别与水体的 SD、TDS 质量浓度呈极显著负相关 ( $r \leq -0.74, n = 26$ ); 水体中紫外线衰减系数与水体浊度、DOC 质量浓度、水体叶绿素 a 质量浓度及 288 nm 处 CDOM 吸收系数呈显著正相关 ( $r \geq 0.48, n = 26$ ),其中与水体浊度、DOC 质量浓度相关性达极显著水平 ( $r \geq 0.56, n = 26$ )。这说明南京地区水体中紫外线衰减受水体浊度、TDS 质量浓度、CDOM 质量浓度、DOC 质量浓度、Chla 质量浓度等多种环境因子的影响,其中浊度起主导作用。

**关键词:**紫外辐射;衰减系数;水体浊度;溶解性有机碳;叶绿素 a 质量浓度;相关关系

**中图分类号:** X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)19-0297-05

近几十年来,人类活动引起的全球平流层臭氧总量减少已被许多观测事实所证实,随着臭氧层变薄,到达地面的紫外辐射 (ultra violet radiation,简称 UVR) 也逐渐增加。日益强烈的 UVR 给全球生态系统、气候和环境变化<sup>[1]</sup>、生物效应及人类健康<sup>[2-3]</sup>带来了不容忽视的影响。因此,各国在 UVR 方面都积极开展了相关研究,我国也不例外<sup>[4-5]</sup>。深入研究我国广大地区地面紫外线的分布状况,对采取一定的有效措施预防紫外线对生态系统的破坏,提高环境生态质量显得十分必要<sup>[4]</sup>。

紫外线一直影响着生命进化。最新研究发现,在某些特定环境中(如高山湖泊)水生生物已经适应长期高强度的紫外线 B (ultra violet - B radiation,简称 UV - B) 辐射<sup>[6]</sup>,如紫外线对水体底栖硅藻及无脊椎动物物种组成已经产生深远的影响,在一些静水和流水环境中物种组成已经发生明显变化,这些变化能够证实是由于 UVR 的变化引起的群落结构变化<sup>[7]</sup>。随着南极臭氧减少、北极臭氧在春季和夏初减少,地表获得的 UV - B 得以增加,UV - B 增加通过北极区可覆盖北极、北欧、中欧甚至阿尔卑斯地区的水体、海洋中,紫外线可深入水下很深深度<sup>[8]</sup>。除了两极地区 UVR 增强外,在中纬度地区 UV - B 水平也在增加,加上水体人为酸化(酸化会进一步减小

UV - B 衰减系数)和臭氧层变薄可能会使更多 UV - B 渗透进入水体,使 UV - B 对水生生态系统的影响加剧<sup>[7]</sup>。而我国东部浅水型湖泊中紫外线进入水体后衰减规律又如何呢?不同水体对紫外线衰减是否有影响?研究紫外线在我国东部地区水体中的分布状况,研究其衰减的影响因素,为进一步探索紫外线衰减规律,减少对水生生物的伤害有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 紫外线分布监测点概况

分别选择泥沙型、富营养化、清洁水体作为 UVR 在水体中分布的监测对象,作者所在课题组选择泥沙含量及富营养化均较高的玄武湖北湖区(32.08°N,118.78°E)为泥沙型水体,该湖区面积为玄武湖 3 个湖区中最大,湖区风浪较大,水体紊动程度最高,水体浊度为 18.3 ~ 31.3 NTU,平均浊度为 25.1 NTU。富营养化水体选取玄武湖西南湖区,该湖区面积为 3 个湖区中最小,水体富营养化程度较高,浊度介于 10.4 ~ 19.5 NTU 之间,平均浊度为 14.3 NTU,藻类 Chla 质量浓度为 388.65 mg/m<sup>3</sup>。清洁水体选择南京仙林大学城仙林宾馆前一池塘(32.11°N,118.91°E),该池塘无外源污染,为自然降水汇流池塘,水体无任何外源污染,水体来源为天然降水,水体清澈见底,浊度最低,仅为 5.1 ~ 7.1 NTU。

### 1.2 监测方案

分别测定上述 3 种水体紫外线 A (ultra violet - A radiation,简称 UV - A)、UV - B 强度,测定时从水面约 1 ~ 2 mm 处开始,每隔 10 cm 测定 1 次 UV - A、UV - B 强度,直至 UV - B 强度衰减到 0,因 SpectroSense2 紫外光谱测量仪是利用电源电压转换成 UV - A、UV - B 强度,穿透深度指的是

收稿日期:2017-08-06

基金项目:国家自然科学基金(编号:511091091);教育部人文社会科学研究一般项目(编号:15YJCZH167);江苏政府留学奖学金。

作者简介:薛 艳(1977—),女,山东临沂人,博士,讲师,主要从事水体重金属污染的植物修复与机理研究。E-mail: xueyan@nuist.edu.cn。

SpectroSense2 读数表测定到小数点后连续 2 位数字均为 0 时,即认为 UV - A 或 UV - B 衰减为 0,若该深度再向下测量,仪表上会出现负值。该测量仪使用单位为  $\text{mW}/\text{m}^2$ ,  $1 \text{ mW}/\text{m}^2 = 0.1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。另外,由于 UV - A 强度较高,一般直至测定到水底时,强度仍不会低于 0,故测定 UV - B 为 0 时终止监测。每次测定重复 3 次,取平均值。

对上述 3 种不同水体监测时间随机,有上午、中午、下午,有晴天、阴天、暴雨,其中玄武湖北湖区、西南湖区各随机监测 9 次,清洁水体监测 8 次,合计 26 个样本,监测时间段从 4 月底持续至 7 月,每隔 1 ~ 2 周监测 1 次。

### 1.3 紫外线剂量及紫外线衰减影响因子测定方法

1.3.1 UV - A 及 UV - B 剂量测定 采用英国 Skye 公司的 SpectroSense2 4 通道手持表测定,连接 SKU 420UV - A 传感器(315 ~ 380 nm)及 SKU 430UV - B 传感器(280 ~ 315 nm),自水面向下每隔 10 cm 测定 1 次水体中的 UV - A 及 UV - B 强度。

1.3.2 浊度、透明度(secchi disc,简称 SD)、总溶解性固体(TDS)测定 采用透明度盘(塞氏盘)于现场测定水体透明度;浊度用 HACH 浊度仪测定;TDS 质量浓度用上海三信仪表厂生产的 5031TDS 计测定;同时在水下 5 cm 处取水样,带回实验室分析其余指标。

1.3.3 溶解性有机碳(dissolved organic carbon,简称 DOC)测定 将水样经  $0.20 \mu\text{m}$  聚酯纤维滤膜过滤,用总有机碳分析仪(Multi N/C 3000)测定水体的 DOC 质量浓度。

1.3.4 有色可溶性有机物(chromophoric dissolved organic matter,简称 CDOM)测定 由于 CDOM 物质质量浓度无法直接测定,故国际一般测定其在 280、355、440 nm 处的吸收峰,CDOM 的光谱吸收系数测定采用 GF/F 滤膜过滤的水样在 MAPADAUV - 1100 分光光度计下先测定其吸光度,然后根据公式(1)计算各波长的吸收系数:

$$a_g(\lambda') = 2.303D_\lambda/r. \quad (1)$$

式中: $a_g(\lambda')$ 为波长  $\lambda$  未校正的吸收系数; $D_\lambda$ 为在波长  $\lambda$  处的吸光度; $r$ 为光程路径; $\lambda$ 为波长。

由于过滤清液还有可能残留细小颗粒,会引起散射,为此

作如下散射效应订正:

$$a_g(\lambda) = a_g(\lambda') - a_g(700') \cdot \lambda/700. \quad (2)$$

式中: $a_g(\lambda)$ 为波长  $\lambda$  的吸收系数;吸收系数越大表示 CDOM 浓度越高<sup>[9]</sup>。

1.3.5 藻类叶绿素 a 质量浓度测定 浮游植物叶绿素 a 质量浓度测定参照《水和废水监测分析方法》(第四版)<sup>[10]</sup>,将 100 mL 水样经  $0.45 \mu\text{m}$  乙酸纤维滤膜过滤,滤膜保存,利用丙酮提取测定。

### 1.4 紫外线衰减系数确定

UVR、UV - A、UV - B 在 3 种水体中的衰减均呈指数衰减模式,紫外辐射衰减系数用公式(3)计算获得。

$$E_d = E_0 \cdot e^{-Kd}. \quad (3)$$

式中: $E_d$ 为水下  $d$  深度的 UVR、UV - A、UV - B 强度; $E_0$ 为入射紫外线强度; $K$ 为衰减系数; $d$ 为水深。其中 UVR 衰减系数以  $K_{\text{UVR}}$  表示,UV - A 衰减系数以  $K_{\text{UV-A}}$  表示,UV - B 衰减系数以  $K_{\text{UV-B}}$  表示,衰减系数为水下每隔 10 cm 测得的衰减系数。

### 1.5 数据分析

试验数据用 Excel 和 SPSS 软件进行统计分析 & 图表制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 紫外线衰减系数与浊度关系

由图 1 可见,UVR、UV - A、UV - B 在水体中的衰减均随浊度的增大,其衰减系数增大,三者衰减系数均与浊度呈极显著相关( $|r| > 0.479$  为极显著相关, $0.374 < |r| \leq 0.479$  为显著相关, $|r| \leq 0.374$  为不相关,下同),相关系数分别达 0.86、0.91、0.93( $n = 26$ )。当浊度高于 20.0 NTU 时, $K_{\text{UVR}}$  大于 0.127, $K_{\text{UV-A}}$ 、 $K_{\text{UV-B}}$  均大于 0.105;当浊度低于 10.0 NTU 时, $K_{\text{UVR}}$  小于 0.083, $K_{\text{UV-A}}$ 、 $K_{\text{UV-B}}$  均小于 0.071;当浊度最高高达 31.3 NTU 时, $K_{\text{UV-A}}$  也达到最高,为 0.126, $K_{\text{UV-B}}$  达 0.157,在所有监测样本中位列第 3, $K_{\text{UVR}}$  达 0.125,在所有监测样本中位列第 2;当浊度最低为 4.94 NTU 时, $K_{\text{UVR}}$ 、 $K_{\text{UV-A}}$ 、 $K_{\text{UV-B}}$  分别为 0.041、0.041、0.052,均达各组中的最低值。

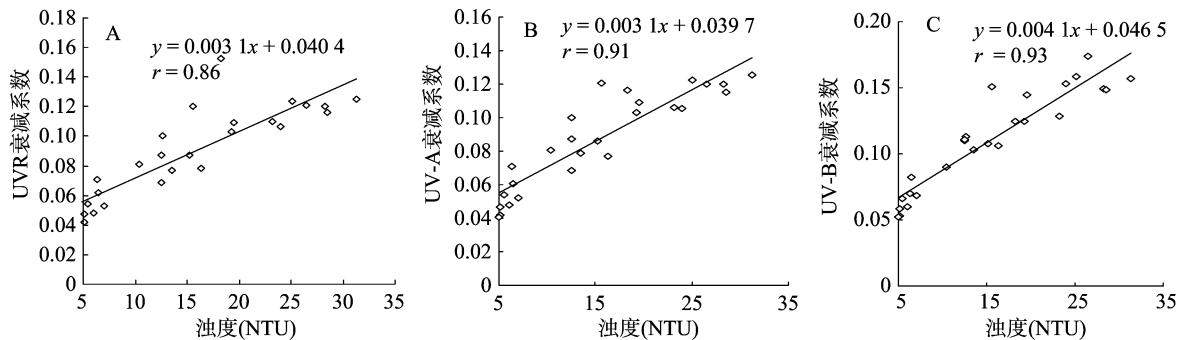


图1 紫外线衰减系数与浊度相关关系

### 2.2 紫外线衰减系数与 SD 关系

由图 2 可见,水体中 UVR、UV - A、UV - B 均随 SD 的增大其衰减系数逐渐减少,两者呈极显著负相关关系,其相关系数分别为 -0.86、-0.89、-0.90( $n = 26$ )。当 SD 低于 40 cm 时, $K_{\text{UVR}}$ 、 $K_{\text{UV-A}}$  均大于 0.100, $K_{\text{UV-B}}$  大于 0.120;当 SD 大于

90 cm 时, $K_{\text{UVR}}$ 、 $K_{\text{UV-A}}$ 、 $K_{\text{UV-B}}$  均小于 0.071;其中当 SD 最大为 105 cm 时, $K_{\text{UVR}}$ 、 $K_{\text{UV-A}}$ 、 $K_{\text{UV-B}}$  均达最低值,分别为 0.041、0.041、0.052;当  $K_{\text{UVR}}$ 、 $K_{\text{UV-A}}$ 、 $K_{\text{UV-B}}$  达最高值时,SD 均处于 35 ~ 38 cm 之间。总体而言,随着 SD 增加,UV - A 衰减系数减少,两者呈极显著负相关关系。

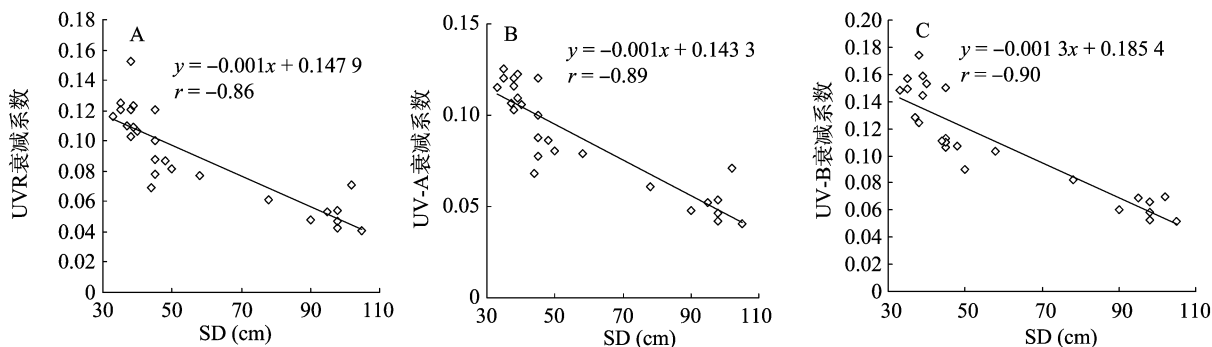


图2 紫外线衰减系数与 SD 的相关关系

### 2.3 紫外线衰减系数与 TDS 的关系

由图 3 可见,水体中 UVR、UV-A、UV-B 的衰减系数随 TDS 质量浓度的增高而逐渐减小,两者呈极显著负相关关系,相关系数分别达  $-0.74$ 、 $-0.77$ 、 $-0.78$  ( $n=26$ )。当 TDS 质量浓度为  $219 \text{ mg/L}$  时,  $K_{\text{UVR}}$ 、 $K_{\text{UV-A}}$  约为  $0.040 \sim 0.048$ ,  $K_{\text{UV-B}}$  为  $0.052 \sim 0.059$  之间,三者均为各组中的最低值;当 TDS 质量浓度为  $180 \sim 181 \text{ mg/L}$  时,  $K_{\text{UVR}}$ 、 $K_{\text{UV-A}}$  均达最高值,分别为  $0.153$ 、 $0.126$ ,  $K_{\text{UV-B}}$  也较高。TDS 质量浓度与水体清洁程度

有关,水体越清洁,水体中 TDS 质量浓度越高,清洁水体 TDS 质量浓度较高,  $K_{\text{UVR}}$ 、 $K_{\text{UV-A}}$ 、 $K_{\text{UV-B}}$  较低,浑浊水体与富营养化水体 TDS 质量浓度较低,  $K_{\text{UVR}}$ 、 $K_{\text{UV-A}}$ 、 $K_{\text{UV-B}}$  则较高。

### 2.4 紫外线衰减系数与不同波长 CDOM 吸光系数的关系

由图 4 可见,  $K_{\text{UVR}}$ 、 $K_{\text{UV-B}}$  与 CDOM 在  $280 \text{ nm}$  处吸收系数呈显著正相关,相关系数分别为  $0.479$ 、 $0.417$  ( $n=26$ ),  $K_{\text{UV-A}}$  与 CDOM 在  $280 \text{ nm}$  处吸收系数呈极显著正相关,相关系数为  $0.490$  ( $n=26$ )。

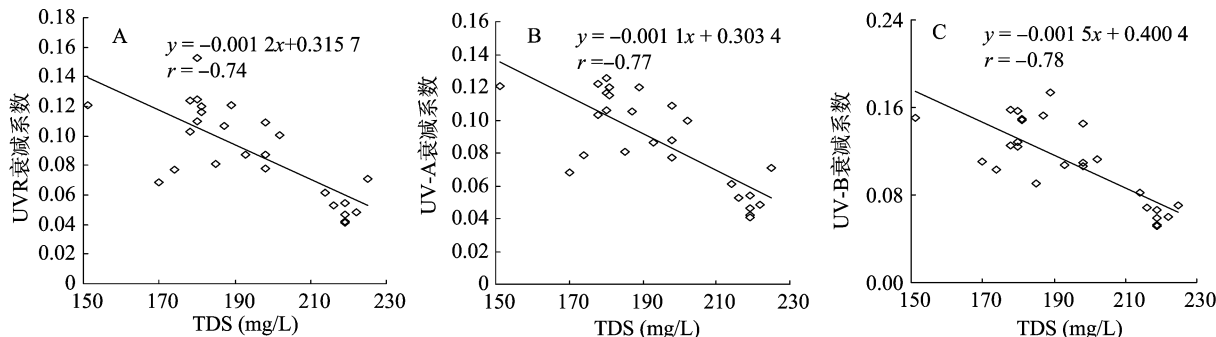
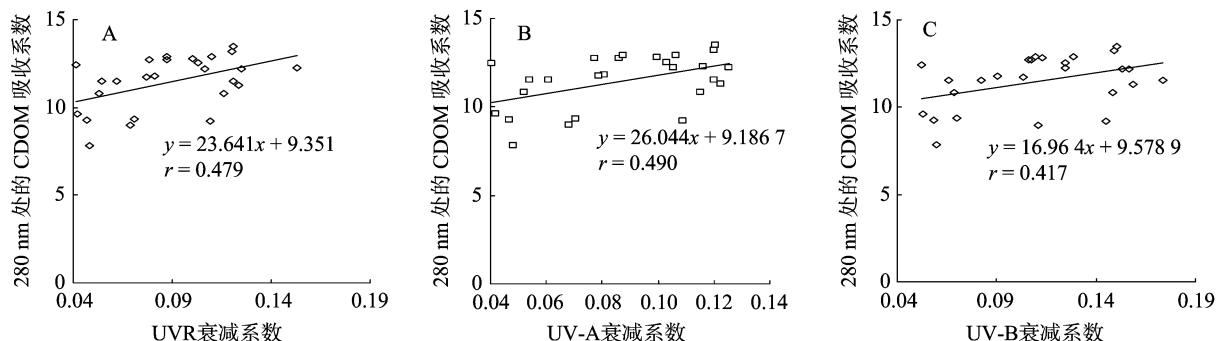


图3 紫外线衰减系数与 TDS 的相关关系

图4 紫外线衰减系数与 CDOM 在  $280 \text{ nm}$  处吸收系数的相关关系

由图 5 可见,CDOM 在  $355 \text{ nm}$  处的吸收系数与  $K_{\text{UVR}}$ 、 $K_{\text{UV-B}}$  均无显著相关性(相关系数分别为  $0.37$ 、 $0.38$ ,  $n=26$ ),而与  $K_{\text{UV-A}}$  呈显著正相关(相关系数为  $0.40$ ,  $n=26$ )。

由图 6 可见,CDOM 在  $440 \text{ nm}$  处的吸收系数与  $K_{\text{UVR}}$ 、 $K_{\text{UV-A}}$ 、 $K_{\text{UV-B}}$  无显著关系。但总体而言,CDOM 含量对 UV-A 在水体中的衰减有一定的影响,特别是在  $280 \text{ nm}$  处吸收系数表现突出,  $K_{\text{UVR}}$ 、 $K_{\text{UV-A}}$ 、 $K_{\text{UV-B}}$  随 CDOM 吸收光系数增加而增加。

### 2.5 紫外线衰减系数与 DOC 质量浓度关系

由图 7 可见,  $K_{\text{UVR}}$ 、 $K_{\text{UV-A}}$  与水体 DOC 质量浓度呈极显著

正相关关系(相关系数分别  $0.52$ 、 $0.53$ ),  $K_{\text{UV-B}}$  与水体 DOC 质量浓度呈显著正相关关系(相关系数为  $0.48$ ,  $n=26$ ),总体上随水体中 DOC 质量浓度的增高,  $K_{\text{UVR}}$ 、 $K_{\text{UV-A}}$ 、 $K_{\text{UV-B}}$  也随之增高。其中,当 DOC 质量浓度大于  $200 \text{ mg/L}$  时,  $K_{\text{UVR}}$ 、 $K_{\text{UV-A}}$   $> 0.120$ ,  $K_{\text{UV-B}}$   $> 0.149$ ;当 DOC 质量浓度小于  $20 \text{ mg/L}$  时,  $K_{\text{UVR}}$ 、 $K_{\text{UV-A}}$   $< 0.055$ ,  $K_{\text{UV-B}}$   $< 0.067$ ;但当  $K_{\text{UVR}}$ 、 $K_{\text{UV-A}}$ 、 $K_{\text{UV-B}}$  达最高值时,DOC 质量浓度为  $80 \sim 135 \text{ mg/L}$  之间;但 DOC 质量浓度的极值与  $K_{\text{UVR}}$ 、 $K_{\text{UV-A}}$ 、 $K_{\text{UV-B}}$  极值不能完全吻合。

### 2.6 紫外线衰减系数与水体 Chla 质量浓度关系

由图 8 可见,水体 Chla 质量浓度与  $K_{\text{UVR}}$ 、 $K_{\text{UV-A}}$ 、 $K_{\text{UV-B}}$  均

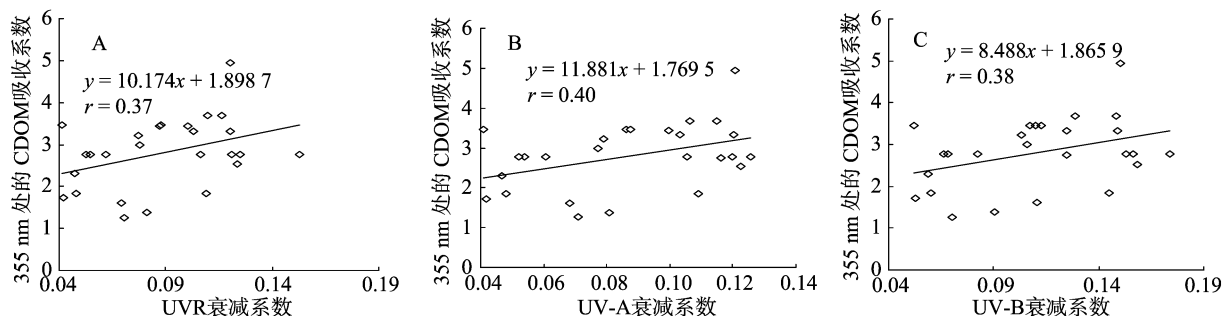


图5 紫外线衰减系数与 CDOM 在 355 nm 处吸收系数的相关关系

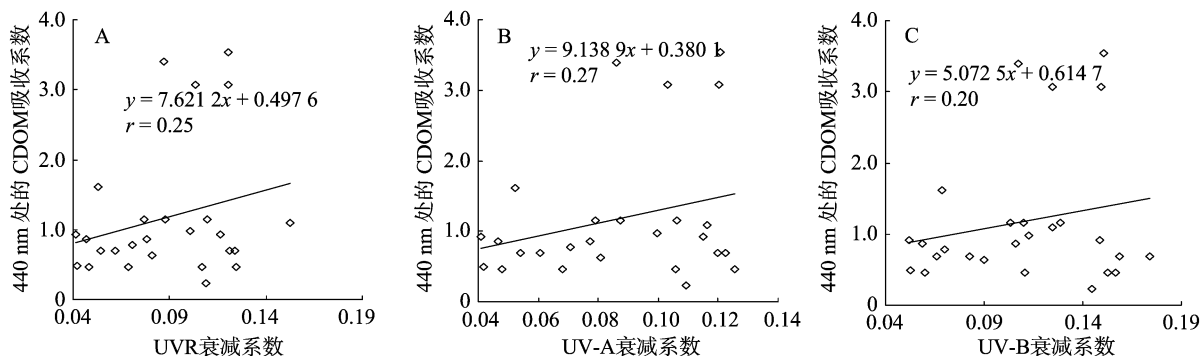


图6 紫外线衰减系数与 CDOM 物质 440nm 处吸收系数相关关系

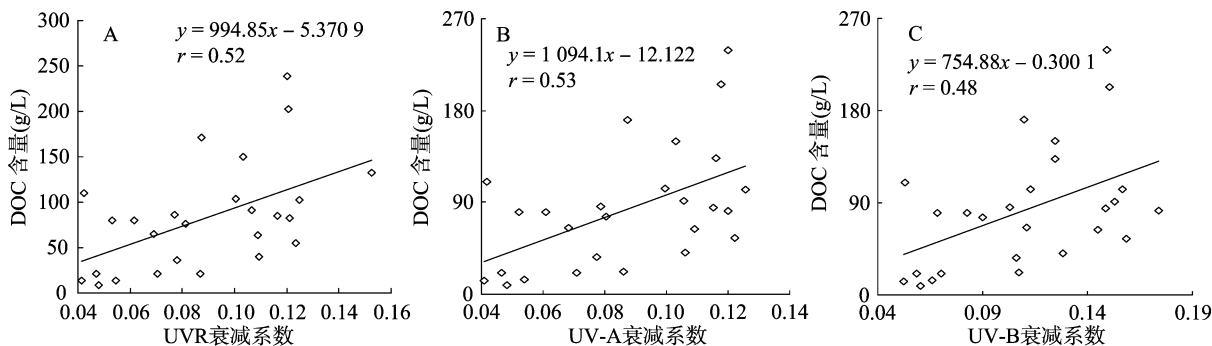


图7 紫外线衰减系数与 DOC 质量浓度相关关系

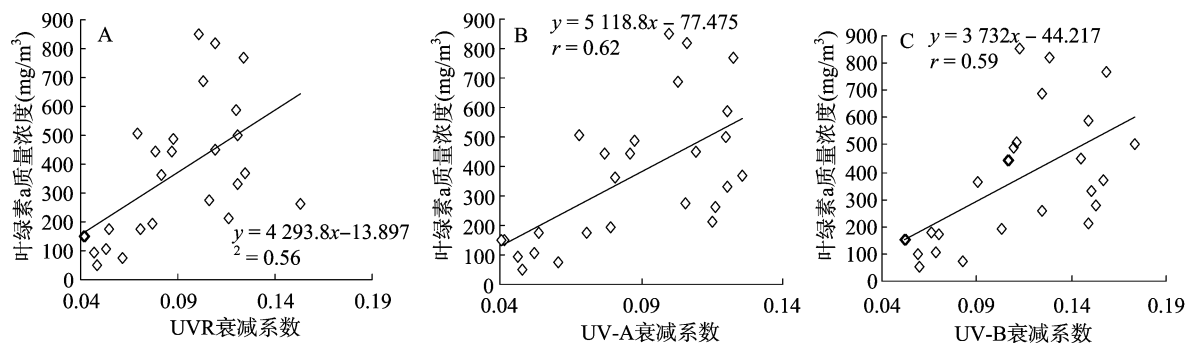


图8 紫外线衰减系数与藻类叶绿素 a 质量浓度相关关系

呈极显著正相关,  $K_{UV-R}$ 、 $K_{UV-A}$ 、 $K_{UV-B}$  随叶绿素 a 质量浓度增加而增加, 其相关系数分别为 0.56、0.62、0.59 ( $n=26$ )。但当叶绿素 a 质量浓度低于  $100 \text{ mg/m}^3$  时,  $K_{UV-R}$ 、 $K_{UV-A}$  均低于 0.062,  $K_{UV-B}$  低于 0.083; 而当叶绿素 a 质量浓度高于  $510 \text{ mg/m}^3$  时,  $K_{UV-R}$ 、 $K_{UV-A}$  分别大于 0.010 及 0.099,  $K_{UV-B}$  大于 0.120。

### 3 结论与讨论

国外对紫外线在水体中衰减的研究主要集中在 UV-B

的衰减研究上, 研究区域主要集中在海洋和高山湖泊<sup>[6]</sup>。已有研究认为, UV-B 在水中的传输主要受水中组成物质的影响, 包括黄色物质、悬浮物质以及浮游藻类等<sup>[11]</sup>。不同的物质组成对 UV-B 的衰减影响不同, 在清洁的海水中 UV-B 可渗入水下 30 m, 而 UV-B 的生物效应可达 60~70 m<sup>[12]</sup>。在高山深水湖泊中, UV-B 的穿透深度也常达 20 m 以上, 对阿尔卑斯和比利牛斯山脉上 26 个湖泊 UV-B 的真光层深度进行测定, 其平均深度为 8 m, 最深达 27 m<sup>[7]</sup>。在受人类活动

影响较大和富营养化的浅水湖泊中,由于水中溶解性有机物对 UV-B 的强烈吸收,其真光层深度往往要小得多,说明不同类型的湖泊对 UV-B 辐射衰减的影响差异显著<sup>[13]</sup>。太阳辐射在水下的传输和分布主要受制于 4 种物质的吸收和散射,即纯水、非生物悬浮颗粒物、溶解性有机物及浮游植物,其中水分子对红外光谱有强烈的吸收性,溶解性有机物对紫外光有强烈的吸收作用,水体各组分及其含量的不同会造成水体吸收和散射的变化<sup>[14]</sup>。在这几种物质中,除了悬浮物在其自然浓度条件下对光不发生明显吸收外,其余 3 种物质分别选择吸收一定波长范围的光<sup>[15]</sup>。

浊度是由水中所存在的颗粒物如黏土、淤泥、胶体颗粒、浮游生物及其他微生物形成的,它是水对光的散射和吸收能力的量度,与水中颗粒的数量、大小、折光率及入射光的波长有关。形成水的浊度的颗粒大小变动于 1 nm ~ 1 mm 之间<sup>[16]</sup>。水的浑浊程度以浑浊度作指标,浑浊度是一种光学效应,它表现为光线透过水层时受到阻碍的程度,这种光学效应与颗粒的大小及形状有关<sup>[17]</sup>。浊度物质的存在降低了水的透光率,降低了紫外线透过率<sup>[18]</sup>。水的浑浊度越高,反射光和散射光越强,而透射光越弱;反之,水的浊度越低,反射光和散射光越弱,而透射光越强<sup>[17]</sup>。因此,水体浊度越大,阻碍太阳光透过水体,故水体浊度越大,SD 越低,UVR、UV-A、UV-B 衰减系数越大。

据研究表明,水体中的黄色物质、叶绿素 a、其他光合色素、有机或非有机颗粒物均能影响紫外线的水体渗透,UV-B 辐射能分解高分子量物质,使之成为细菌能利用的物质<sup>[19]</sup>。DOC、颗粒性有机碳微粒状有机物及腐殖质影响紫外线渗入水下<sup>[8]</sup>,DOC 能吸收短波辐射,特别是在海滨区及淡水生态系统中,如阿比斯库瑞典(68°N,19°E)、加那利群岛(27°N,17°W)、北海、波罗的海、卡特加特海峡、地中海东部和西部、北大西洋等海域。由于腐殖质难以被细菌分解,一旦分解,其产物(甲醛、乙醛、乙醛酸、丙酮酸)易被浮游细菌利用。但腐殖质能强烈吸收紫外线,进而加剧 DOC 分解,其产物被细菌利用,紫外线可更深入水下。然而水表强烈的紫外线不仅能抑制浮游细菌的生长活性,又能抑制 DOC 分解,进而使紫外线难以深入水下<sup>[20]</sup>。由此可见,DOC 和腐殖质是控制湖泊 UV-B 衰减的重要因素。自然酸化的湖泊具有高浓度的腐殖质,可在表层水体几厘米范围内使 UV-B 迅速衰减<sup>[21]</sup>。从上述分析也可以看出,DOC 质量浓度与 CDOM 吸光系数与 UVR、UV-A、UV-B 衰减系数均呈正相关关系,也证实了 DOC、CDOM 能吸收紫外线,阻碍紫外线更多地渗透进入水下,很多研究也表明了 DOC 对紫外线的衰减作用较为明显<sup>[22-23]</sup>。因此,水体中 DOC、CDOM 物质含量越高,水体 UV-B 渗透深度越低。这些结果与本研究的 3 种水体 CDOM 和 DOC 质量浓度越高,UVR、UV-A、UV-B 衰减越快是一致的。Figuerola 等的研究也证实了水体中叶绿素 a 质量浓度也影响水体紫外线的渗透,即水体中藻类叶绿素 a 质量浓度越高,UVR、UV-A、UV-B 衰减系数越大,水体 UV-B 渗透深度越低<sup>[24]</sup>。

江苏省南京地区水体中紫外线衰减是水体中多种环境因子的共同作用,而浊度在多种环境因子中起主导作用,水体浊度、CDOM 物质含量、DOC 质量浓度、TDS 质量浓度、藻类叶

绿素 a 质量浓度等均对水体中的 UVR、UV-A、UV-B 衰减有重要影响,水体中 CDOM 物质含量、DOC 质量浓度、TDS 质量浓度、Chla 质量浓度等对紫外线在水体衰减的影响程度不及浊度。

## 参考文献:

- [1] Williamson C E, Zepp R G, Lucas R M, et al. Solar ultraviolet radiation in a changing climate[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(6): 434-441.
- [2] Overholt E P, Rose K C, Williamson C E, et al. Behavioral responses of freshwater calanoid copepods to the presence of ultraviolet radiation: avoidance and attraction[J]. *Journal of Plankton Research*, 2016, 38(1): 16-26.
- [3] Whitten I, Youssef G. The effect of ultraviolet radiation on ultrasonic properties of polyurea[J]. *Polymer Degradation & Stability*, 2016, 123: 88-93.
- [4] 韦惠红. 我国臭氧和紫外线的分布特征及未来变化预测[M]. 南京: 南京信息工程大学, 2005.
- [5] Liu H, Hu B, Zhang L, et al. Ultraviolet radiation over China: spatial distribution and trends [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76: 1371-1383.
- [6] Fischer J M, Olson M H, Theodore N, et al. Diel vertical migration of copepods in mountain lakes: the changing role of ultraviolet radiation across a transparency gradient [J]. *Limnology & Oceanography*, 2015, 60(1): 252-262.
- [7] Sommaruga R. The role of solar UV radiation in the ecology of alpine lake [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2001, 62(1/2): 35-42.
- [8] Häder D P, Kumar H D, Smith R C, et al. Aquatic ecosystems: effects of solar ultraviolet radiation and interactions with other climatic change factors[J]. *Photochemical & Photobiological Sciences Official Journal of the European Photochemistry Association & the European Society for Photobiology*, 2003, 2(1): 39-50.
- [9] 张运林, 秦伯强, 梅梁湾. 太湖夏季和冬季 CDOM 特征及可能来源分析[J]. *水科学进展*, 2007, 18(3): 415-423.
- [10] 国家环保总局《水与废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [11] Häder D P, Williamson C E, Wängberg S Å, et al. Effects of UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with other environmental factors [J]. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2014, 14(1): 108-126.
- [12] Smith R C, Prézélin B B, Baker K S, et al. Ozone depletion: ultraviolet radiation and phytoplankton biology in antarctic waters [J]. *Science*, 1992, 255 (5047): 952.
- [13] 张运林, 秦伯强, 陈伟民. 增强的 UV-B 对湖泊生态系统的影响研究[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 106-112.
- [14] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 龙感湖水体光学特性的观测[J]. *湖泊科学*, 2005, 17(2): 114-119.
- [15] 周艺, 周伟奇, 王世新, 等. 遥感技术在内陆水体水质监测中的应用[J]. *水科学进展*, 2004, 15(3): 312-316.
- [16] 朱普霞. 给水中的浊度问题[J]. *净水技术*, 2004, 23(5): 22-23, 41.
- [17] 贡献. 浊度单位和量程范围选择[J]. *化工自动化及仪表*, 1997(6): 46-49.

唐红琴,董文斌,李忠义,等. 稻草-狐尾藻治理养殖废水效应研究[J]. 江苏农业科学,2018,46(19):302-305.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.19.077

# 稻草-狐尾藻治理养殖废水效应研究

唐红琴,董文斌,李忠义,蒙炎成,韦彩会,王瑾,俞月凤,胡钧铭,张野,李婷婷,何铁光  
(广西农业科学院农业资源与环境研究所,广西南宁 530007)

**摘要:**拟研究稻草-狐尾藻治理养殖废水的效应,为探讨狐尾藻在处理养殖废水中的应用提供理论依据。通过覆盖稻草和无稻草覆盖 2 组模拟试验,每组将狐尾藻放置于 5 级废水中培养,以自来水作为对照,每间隔一段时间测量各级废水化学需氧量(COD)与固体悬浮物(SS)、氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )、总氮(TN)、总磷(TP)的浓度,分析其变化规律。结果表明:除稻草覆盖组中 COD 和 SS 浓度 2 项指标呈现升高趋势外,其余指标均呈现前期快速降低、后期缓慢降低的趋势。处理 75 d 后,各级废水中的各指标浓度均较原水明显下降,无稻草覆盖组狐尾藻净化养殖废水效果较好,效率较高。狐尾藻能有效降低养殖废水中的各种污染物浓度,改善水质,在治理和净化养殖废水方面具有良好的应用前景。

**关键词:**稻草;狐尾藻;养殖废水;污染物;效应

**中图分类号:** X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)19-0302-04

随着畜禽养殖业的快速发展,化学需氧量、氨氮、磷等主要污染物排放量日益增多。国内外利用水生植物净化生活污水的研究已取得了一些成果,并证实利用水生植物既能治理水体污染,又能避免二次污染<sup>[1]</sup>。狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum* L.)属小二仙草科的多年生沉水植物,为  $\text{C}_4$  光合作物,能较快高效地除去水体中的氮、磷等富营养化元素,因其具有适应能力强、生物量积累较快和耐污能力较强等特点而成为水生植被恢复工程中被优先考虑的先锋物种之一<sup>[2]</sup>。利用水生植物治理或修复污染水体,具有运行成本低、净化效果好、环境效益高等优点,适用于分散式养殖的废水处理<sup>[3]</sup>。陈金发等在室内条件下模拟大藻对不同质量浓度畜禽废水的净化试验,发现大藻对养殖废水的  $\text{COD}_{\text{cr}}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 的去除率分别高达 82.33%、69.21%、45.88%<sup>[4]</sup>。此外,水葫

芦<sup>[5]</sup>、芦苇<sup>[6]</sup>等对养殖废水也具有良好的净化作用。与其他水生植物相比,狐尾藻适应性广、耐污能力强,既能快速净化水体,又能避免二次污染<sup>[2,7]</sup>,厉金炳等将狐尾藻用于禽畜养殖污水的生态处理具有显著效果<sup>[8]</sup>。2014 年陈鸿等在广西河池环江县丽源养猪场以稻草、绿狐尾藻为核心构建人工湿地治理养殖废水,发现经处理后水体中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 浓度分别下降 69%、60%、73%<sup>[9]</sup>。罗开武等也采用“稻草-绿狐尾藻”的治污技术,对猪场废水中氨氮、总氮、COD 实现较彻底的去除<sup>[10]</sup>。

在利用狐尾藻等一些水生植被处理畜禽养殖污染物方面,目前国内仍处于起步和技术探索阶段,整治工作基本处于水质改善和景观建设阶段,缺乏传统水利、生态系统栖息地和景观的有机结合,而国外已经形成了较为成熟的理念及相关技术、标准和规范。本研究针对广西南宁市养殖业迅猛发展及养殖污染亟需减排治理的现实需求,以生猪规模化养殖为研究对象,在室内环境下开展稻草-狐尾藻净化养殖水体的模拟试验,以取自养殖场 5 级滤池的废水作为原水,设置稻草覆盖与无稻草覆盖 2 组试验,研究试验期间狐尾藻对养殖废水化学需氧量(COD)、固体悬浮物(SS)、氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )、总氮(TN)、总磷(TP)的去除效果,深入探讨稻草-狐尾藻的净化效果,为其在生产中的推广和应用提供理论依据和数据参考。

收稿日期:2017-05-15

基金项目:广西科学研究与技术开发计划(编号:桂科攻 1598016-2);广西农业科学院基本科研业务专项(编号:2015YT31);南宁市科学研究与技术开发计划(编号:20153135);广西农业科学院科技发展基金(编号:桂农科 2016JZ11)。

作者简介:唐红琴(1969—),女,广西大化人,副研究员,主要从事农业生态和环境研究。Tel:(0771)3244194;E-mail:229167658@qq.com。

通信作者:何铁光,博士,研究员,主要从事环境生态研究。Tel:(0771)3243829;E-mail:tghel18@163.com。

[18]濮晨熹,张金松,安瑞,等. 某污水处理厂紫外线消毒运行效果研究[J]. 给水排水,2012,38(1):126-129.

[19]Navarro E, Muñoz S, Korkaric M, et al. Ultraviolet radiation dose calculation for algal suspensions using UVA and UVB extinction coefficients[J]. Journal of Photochemistry & Photobiology B: Biology, 2014, 132(10):94-101.

[20]Häder D P, Kumar H D, Smith R C, et al. Effects on aquatic ecosystems[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 1998, 46(1/2/3):53-68.

[21]Williamson C E. What role does UV-B radiation play in freshwater

ecosystems? [J]. Limnology & Oceanography, 1995, 40(2):386-392.

[22]杨顶田,陈伟民,张运林,等. 太湖梅梁湾水体中紫外线状况及藻体内 MAAs 的检测[J]. 植物科学学报, 2004, 22(3):264-268.

[23]张运林,秦伯强,马荣华,等. 太湖典型草、藻型湖区紫外辐射的衰减及影响因素分析[J]. 生态学报, 2005, 25(9):2354-2361.

[24]Figueroa F L, Niell F X, Figueiras F G, et al. Diel migration of phytoplankton and spectral light field in the Ría de Vigo (NW Spain) [J]. Marine Biology, 1998, 130(3):491-499.