

# 数字图像水印技术综述

王树梅

(江苏师范大学 计算机科学与技术学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 数字水印技术是一项保护版权的信息隐藏技术。数字图像作为网络传播的主要媒体内容, 数字水印技术对保证其在互联网传播过程中的安全性具有重要意义。通过归纳分析近年关于数字水印技术的研究成果, 对数字水印技术分类、水印生成过程、水印嵌入类型以及水印评价标准等方面进行阐述, 对部分典型水印算法进行总结, 并结合当前信息安全和信息隐藏研究现状, 展望数字水印技术未来发展前景。

**关键词:** 数字水印; 数字图像; 鲁棒性; 信息隐藏

**中图分类号:** TP391

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-5298(2022)01-0031-06

## Overview of Digital Image Watermarking Technology

WANG Shumei

(School of Computer Science and Technology, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Digital watermarking is an information hiding technology that protects copyright. Digital images are the main media content of network transmission. Digital watermarking has the great significance in ensuring the transmission security on the Internet. Through the inductive analysis of the research results of digital watermarking in recent years, the classification of digital watermarking, watermarking generation process, watermarking embedding types and watermarking evaluation criteria were explained. In addition, some typical watermarking algorithms were summarized, and combined with the current research status of information security and information hiding, and the future development prospects of digital watermarking was analyzed.

**Key words:** digital watermark; digital image; robustness; information hiding

### 0 引言

随着互联网和移动互联网技术的发展, 使得信息的发布和传输实现了“数字化”和“网络化”, 以数字图像为代表的数字信息的传递和存取渠道得到了扩展, 同时也大大提高了数字信息表达的效率和准确性。但是, 这些数字信息很容易借助互联网被复制、处理、传播和公开, 各类数字媒体的传播达到了前所未有的深度和广度, 引发出数字信息传输的安全问题和数字产品的版权保护问题<sup>[1]</sup>。近些年关于网络传播内容的版权纠纷不断增加, 侵犯作品作者的合法版权的案件越来越多。在互联网环境中如何有效保护版权, 如何提高水印信息的安全性, 已成为信息安全和信息隐藏领域的热门课题。

加密技术是信息安全专家较早提出的一种技术, 指的是利用私钥或公钥将明文信息加密为旁人无法识别的密文信息, 若没有密钥则无法解密密文。另外一种加密技术是在传输过程中为信息设置密码, 信息在传输状态是不可读的, 从而对数据从发送到接收过程起到有效的保护<sup>[2]</sup>。数字签名技术是通过私钥对每个消息进行签名。随着数据的增加, 签名数量也随之增加, 因此也为数字产品的传输带来诸多不便。随着科学技术的发展, 新的攻击技术也在不断涌现, 传统的加密技术和数字签名技术已经不能满足数字信息安全的需要, 急需新的技术对数字信息进行更加安全的保护。

在众多学者的努力下, 数字水印技术作为一种新型信息隐藏技术问世。这种技术可以为解密后的数据提供进一步的保护, 而且可以在原始载体中嵌入大量的水印信息。数字水印技术主要用于数字图像的版权保护和完整性认证, 作为一种保护数字图像版权的主要技术, 通过水印算法将版权信息以一种隐蔽

收稿日期: 2021-07-12

基金项目: 江苏省现代教育技术研究重点课题(2021R92021); 教育部第二批新工科项目校内子课题(XJXGKY07)。

作者简介: 王树梅, 女, 博士, 副教授。主要研究方向: 数字图像处理和信息安全。

的形式嵌入到宿主图像。在数字图像版权受到侵犯时,能够通过水印提取算法将版权信息提取出来,作为数字图像归属的主要证据<sup>[3]</sup>。本文对数字图像水印技术的基本模型、特点、分类、攻击和评测进行综述和分析,根据现有水印算法的优势和不足,展望未来的发展趋势和下一步的研究方向。

## 1 数字图像水印的基本模型

数字图像水印系统中载体是数字图像,水印信息可以是图像、文字等其他含有版权信息的数据。数字图像水印系统主要包括水印生成、水印嵌入和水印提取三个步骤<sup>[4]</sup>。水印经过加密算法进行加密,加密后的水印信息在不知密钥的前提下是不可以看出原始水印图像信息的。数字水印的嵌入过程是将加密后的水印信息利用嵌入算法隐藏到宿主图像中,嵌入位置的选择有时需要密钥加以控制。不同的水印算法有不同的水印提取过程,盲水印算法在水印提取时不需要原始宿主图像,只要含水印图像即可提取水印;非盲水印算法在提取水印过程中则需要原始图像。提取出来的水印利用解密算法还原为原始水印<sup>[5]</sup>。数字图像水印基本模型如图 1 所示。

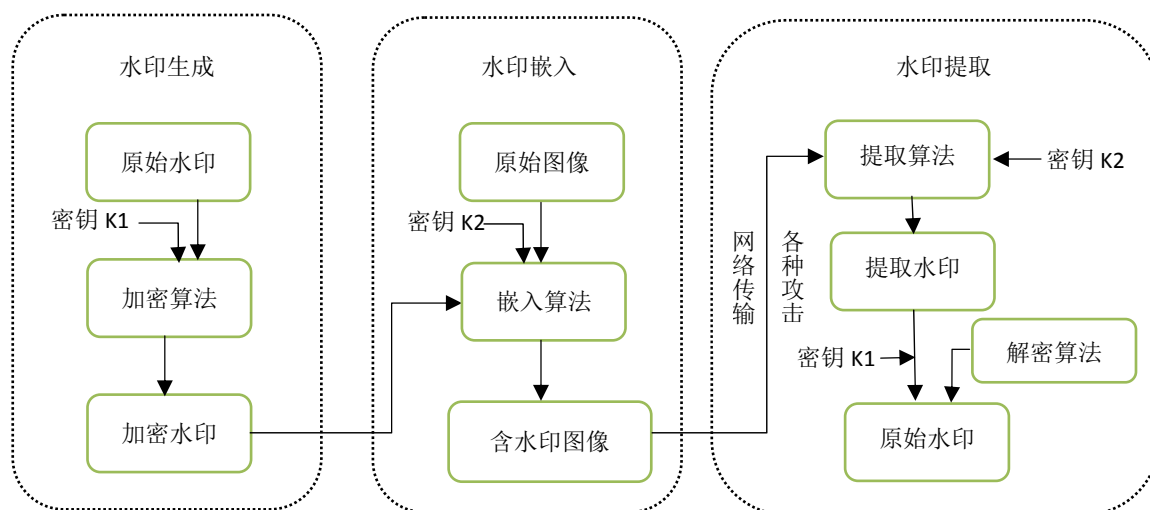


图 1 数字图像水印的基本模型

(1)水印生成。原始水印含有图像和其他版权信息,对水印图像加密一般采用置乱方法,常用的置乱方法有变化模板形状、幻方变换、hash 置乱等,水印图像经置乱方法处理后得到无法辨认的加密水印图像,密钥  $K_1$  是置乱函数的参数。其他版权信息包括文字信息和数字序列信息,对这类信息加密的方法是使用伪随机数发生器,其特点是:能通过所有正确的随机性检验、序列的产生是不可预知的、在完全相同的操作条件下得到的序列是不重复的。常见的伪随机数发生器有线性同余伪随机数发生器、小数开方伪随机数发生器、Logistic 方程作为模型的混沌序列发生器和  $N$  级最长反馈序列( $m$  序列)<sup>[6-8]</sup>。

(2)水印嵌入。按照水印嵌入算法将处理后的秘密水印信息嵌入到原始宿主图像中,嵌入算法不同,则嵌入的位置和频域也不同。空域情况下,通过密钥  $K_2$  选择嵌入水印的像素位置和像素数量;频域情况下,依据水印信息的数量选择在变换后的高频、中频或者低频域中嵌入水印。嵌入水印后的图像称为含水印图像,也是发布到互联网上的图像,人眼看上去这个图像与原始图像是没有区别的,因此可以和原始图像一样使用。

(3)水印提取。在互联网接收端接收到的含水印图像,可通过水印提取算法提取水印。若在水印嵌入算法中用到了密钥  $K_2$ ,则提取时也要用到,有时密钥还可能不止一个。通过水印提取算法提取出来的水印是置乱信息,无法看出任何有意义的标识,需要进一步利用解密算法或者逆置乱算法恢复原始水印,这个过程要用到加密密钥  $K_1$ 。如果含水印图像在传输过程中被攻击,提取出来的水印信息就会有不同程度的缺损,但可以通过计算与原始水印的相似度或者相关系数判断水印信息是否存在。

## 2 数字图像水印的特点

### 2.1 透明性

水印的透明性主要指数字图像嵌入水印信息后与嵌入之前在人眼视觉上没有发生明显变化,也就是宿主图像与含水印图像对观察者的视觉系统是不可察觉的<sup>[9]</sup>。另外,透明性也表现为即使用统计方法也不能恢复出原始水印。这里需要指出的是,透明性是相对于被保护数字图像的使用而言,即加在图像上的水印不应干扰图像的视觉欣赏效果,但也并不是不可见。

### 2.2 鲁棒性

鲁棒性指含水印图像在受到攻击后仍然可以从中提取出水印信息,仍能保持其完整性和认证真实性。常见的对图像的攻击有滤波、压缩、旋转、平移等。透明性和鲁棒性是数字图像水印的两个重要特性,水印既要具备隐蔽性,又要具有一定的鲁棒性。主观上讲,理想的水印算法既能隐藏大量的水印数据,又可以抵抗各种攻击。

### 2.3 安全性

安全性表现为水印能够抵抗恶意攻击的能力。一方面,水印的嵌入算法和提取算法框架是秘密的,嵌入的数字水印信息是利用密钥经过加密算法处理过的。另一方面,嵌入的数字水印统计上是不可检测的,非授权用户无法检测和破坏水印。嵌入水印的数字图像遭受恶意攻击后水印信息仍会一直存在,直到图像严重失真,丧失使用价值。

## 3 数字图像水印算法的分类

### 3.1 空域数字图像水印技术

#### (1) 最低有效位(LSB)数字水印

最低有效位又称最不显著位,是指数字图像像素值用二进制表示时的最低位。空域数字水印中最简单和最有代表性的方案是用水印信息代替数字图像像素值的最低有效位<sup>[2]</sup>。水印信息和像素值都是二值比特序列,如果用8位比特的二进制表示灰度图像的每一个像素值,改变最低位的值不会对视觉效果产生明显影响。其嵌入过程如图2所示。

以3×3大小的块图像为例,将水印信息为{0,1,1,0,0,0,1,0,0}以LSB水印算法嵌入其中。

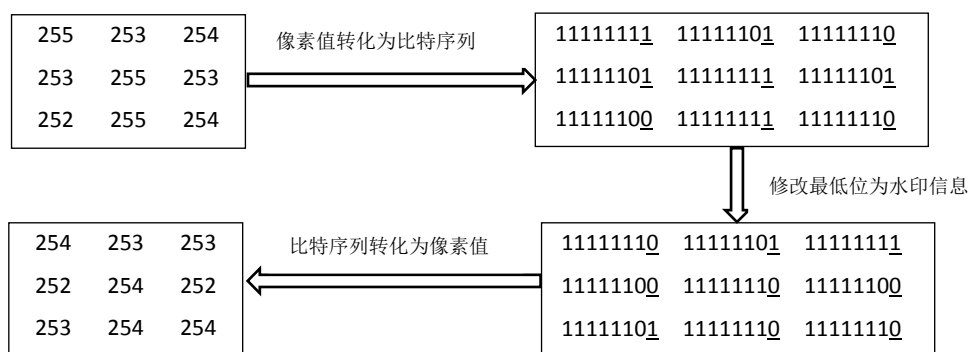


图2 LSB水印算法嵌入过程

水印信息的提取只需要将对应像素值转换为二进制比特序列,然后提取每个比特序列的最低位。这种提取水印的方法属于盲检测,即不需要原始载体图像的数据便可以提取出全部水印信息。正是因为提取算法简单,这种水印很容易被恶意提取出来并修改为其他信息。为了提高水印的安全性,在嵌入之前先对水印信息进行加密或者置乱,这样在没有密钥的前提下就无法准确获取到水印信息。

从 LSB 水印算法的嵌入过程来看, 由于嵌入的位置是最低有效位, 故对噪声的抵抗力较差, 并且嵌入位置固定, 容易遭受攻击. 针对以上不足, 研究者提出一些改进的 LSB 算法, 在像素选择方面进行了加密, 可以在奇数行嵌入水印, 也可以在偶数行嵌入水印, 还有根据密钥随机选择像素值嵌入水印. 改进后的 LSB 算法在安全性和鲁棒性等方面都得到了提高.

### (2) 二值图像中的数字水印

所谓二值图像, 就是将一个多灰度级的输入图像经过处理后变成只有两个灰度级的图像<sup>[10]</sup>. 二值图像的像素值只有 0 和 1 两个数值, 0 代表黑, 1 代表白, 因此二值图像又称黑白图像. 可通过修改黑白像素个数的奇偶性嵌入水印信息, 如果嵌入的水印信息为 0, 修改所选择的像素, 使得黑像素个数为偶数; 如果要嵌入的水印信息为 1, 则修改所选择的像素, 使得黑像素的个数为奇数. 水印信息的提取是依据黑像素个数的奇偶性提取, 若黑像素个数为偶数, 则提取的水印信息为 0, 如果黑像素的个数为奇数, 则提取的水印信息为 1.

### (3) 基于图像特征的数字水印

基于图像特征的数字水印算法有基于图像亮度值分析的水印算法, 还有基于图像统计特征的水印算法<sup>[11,12]</sup>. 利用统计特征是空域嵌入算法中的一类重要嵌入技术, 主要思想是通过修改原始图像数据使得原始图像的某些统计特征发生变化, 检测时只需要查看含水印图像的统计特征即可, 从而达到盲检测的目的<sup>[13]</sup>. 这些统计特征的获得需要密钥控制来保证其安全性, 常用的统计特征有平均值、标准偏差和直方图等.

## 3.2 变换域数字图像水印技术

空域数字水印算法存在的缺点是嵌入的信息量太小和鲁棒性安全性差, 导致使用过程中具有一定的局限性. 变换域数字水印具有较好的不可见性、鲁棒性和较大嵌入水印信息量等优点, 引起了研究者的关注. 根据一定的嵌入规则在相应的频带上嵌入水印, 嵌入水印的方式有修改、替换和交换频带的系数, 如图 3 所示. 数字图像变换域的低频信息反映了图像的主要轮廓, 不应有较大的失真, 但会影响到水印的不可见性. 而高频区域是人眼视觉系统不敏感的部分, 因此在此区域嵌入水印能够保证水印的良好的不可见性. 但是高频区域也是压缩技术常常剔除的部分, 所以鲁棒性较差<sup>[1]</sup>. 为同时满足水印的鲁棒性和不可见性, 大多数变换域数字图像水印算法将水印嵌入到变换域的中频区域.

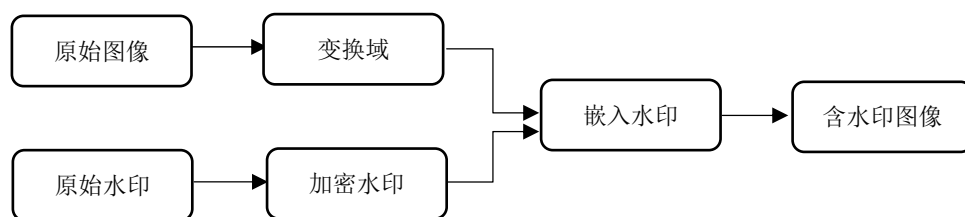


图 3 变换域数字图像水印嵌入过程

变换域数字图像水印算法主要包括离散余弦变换(DCT)域<sup>[14,15]</sup>、离散小波变换(DWT)域<sup>[12,16]</sup>、离散傅里叶变换(DFT)域<sup>[17,18]</sup>. 离散余弦变换是实变换, 具有较好的能量压缩能力和去相关能力, 将数字图像的主要信息集中到少量的低频系数上. 嵌入水印时先将图像进行分块, 然后对每一块进行离散余弦变换, 通过加性、乘性、量化和基于关系等方式对频域系数进行修改以达到嵌入水印的目的. 离散余弦变换是全局变换, 变换空间中任何一个数据的误差都会影响到图像的每一个像素.

离散小波变换是一个局部变换, 可以将原始图像分解成多频段的图像, 能适应人眼的视觉特性, 水印的嵌入和检测分多个层次进行, 且水印的不可见性和鲁棒性较好. 离散小波变换每一尺度的变换都将低频区域分解为四块, 分别为高频(对角)、低频(下 2 采样)、水平、垂直, 水印嵌入到低频块会影响不可见性, 水印嵌入到高频块会影响鲁棒性, 因此大多数算法将水印嵌入到水平和垂直两块. 根据水印信息量的大小, 确定将原始图像进行多少级别的分解, 分解级别越高, 各频段信息量越少.

离散傅里叶变换是复数变换,在幅度和相位满足特定的条件下,数字水印信息可以嵌入到数字图像的幅度或者相位上.考虑到傅里叶变换系数幅度的平移不变性,通过加性和乘性规则修改幅度达到鲁棒嵌入的目的.为了使修改后系数的逆变换仍是实数,修改幅度要满足正对称的条件.实际上,在傅里叶变换中,相位分量比幅度更为重要,因此在相位中嵌入水印鲁棒性更强.不论是在幅度还是相位中嵌入水印,嵌入规则中的比例系数越大,嵌入水印的量越大,水印的稳健性越好,但会影响不可见性.所以,嵌入规则中的比例系数的取值范围要根据嵌入水印的稳健性要求和图像的具体应用背景折中考虑并确定.

## 4 数字图像水印算法的攻击

数字图像水印的攻击技术分类方法较多,这里将水印攻击技术分为三大类:鲁棒性攻击、安全性攻击和系统攻击.鲁棒性攻击是指含水印图像在检测水印之前必须经历的常规信号处理操作,常用于检验水印算法的有效性,是较为常见的水印攻击技术.安全性攻击是指攻击者为了某种利益对水印算法、水印密钥或者含水印图像所进行的各种恶意攻击.系统攻击是针对水印系统中所涉及的其他问题进行攻击.

文[3]将攻击技术分为鲁棒性攻击、表示攻击和解释攻击.表示攻击的目的是使得检测器检测不到水印的存在,而解释攻击利用水印技术的逆方法伪造水印,以达到伪造水印的所有权的目的.

鲁棒性攻击又分为非几何攻击、几何攻击和组合攻击.非几何攻击以削弱原始水印信息强度为主,对含水印图像进行小幅度的篡改或添加噪声.常见的非几何攻击有噪声攻击、滤波攻击、压缩攻击和增强处理攻击.噪声分为椒盐噪声、高斯噪声和随机噪声,滤波分为中值滤波、低通滤波和维纳滤波.压缩分为JPEG和JPEG2000.增强处理攻击有锐化、钝化、直方图均衡、Gamma校正和图像恢复等.

几何攻击通过改变含水印图像的像素位置来破坏水印的检测结果,与非几何攻击相比,几何攻击对水印的影响更大.几何攻击采取遮挡、平移和旋转等操作来改变像素的局部或整体位置,结果会导致水印信息提取不全或无法提取.常见的几何攻击有剪切攻击、旋转攻击、行列偏移攻击和缩放攻击<sup>[19,20]</sup>.

组合攻击是指将几何攻击和非几何攻击进行多种组合的攻击,这种攻击类型较为复杂,不但能够影响到含水印图像的像素值,而且还会改变图像的几何结构,对水印信息的破坏性很大.这就要求数字水印算法不但要抵抗某一种攻击,还要能够抵抗多种攻击的组合.

## 5 数字图像水印技术的评测

数字图像水印算法的性能是通过有关客观性的评测数据来衡量的,评测分为算法性能评价和水印检测.数字水印算法性能评价常用的标准有峰值信噪比(PSNR)、归一化相关系数(NC)、结构相似度(SSIM).水印检测主要有基于相关的水印检测和基于决策理论的水印检测,其目的在于通过检测器的输出值判断载体图像中是否含有水印.水印算法评价标准是在已经明确载体图像中有水印的情况下,通过计算这些数据评价水印算法性能的优劣.

### (1) 峰值信噪比(PSNR)

峰值信噪比主要用于衡量嵌入水印后的图像与原始图像之间的失真程度,PSNR值越大,说明失真程度越小,水印的不可见性越好.PSNR的取值范围是[0,100].当PSNR值大于30时,人眼视觉系统不能够感知含水印图像与原始图像之间的差别.PSNR计算方式如下:

$$\text{PSNR} = 10 \lg \frac{\text{MAX}^2}{\text{MSE}}, \quad (1)$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{mn} \sum_i^m \sum_j^n [f(i, j) - g(i, j)]^2. \quad (2)$$

其中 $f$ 表示原始图像, $g$ 表示含水印图像,MAX表示图像像素的最大值.

### (2) 归一化相关系数(NC)

归一化相关系数用于衡量原始水印信息与被提取水印信息之间的相似程度,其取值范围是[0,1].NC

值越大,表示原始水印与提取出来的水印相似度越高,水印算法的鲁棒性越强;反之,NC 越小,原始水印与被提取水印相似度越低,水印算法的鲁棒性越弱.NC 的计算公式为

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (w(i, j) \times w'(i, j))}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [w(i, j)]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [w'(i, j)]^2}}. \quad (3)$$

其中  $w$  表示原始水印,  $w'$  表示提取出来的水印,  $m$  和  $n$  分别表示水印图像矩阵的行数和列数.

### (3) 结构相似度(SSIM)

结构相似度是对两个图像的亮度、对比度和结构三个量的比较,取值范围为[0,1]. SSIM 越大,两个图像之间的相似度越高,也可以用来衡量压缩图像的质量. SSIM 的计算公式为

亮度度量函数:

$$l(X, Y) = \frac{2\mu_X\mu_Y + c_1}{\mu_X^2 + \mu_Y^2 + c_1}. \quad (4)$$

对比度量函数:

$$c(X, Y) = \frac{2\sigma_X\sigma_Y + c_2}{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + c_2}. \quad (5)$$

结构对比函数:

$$s(X, Y) = \frac{\sigma_{XY} + c_3}{\sigma_X\sigma_Y + c_3}. \quad (6)$$

SSIM 函数:

$$SSIM = l(X, Y)c(X, Y)s(X, Y). \quad (7)$$

其中  $\mu_X$ ,  $\mu_Y$  分别表示图像  $X$  和  $Y$  的均值,  $\sigma_X$ ,  $\sigma_Y$  分别表示图像  $X$  和  $Y$  的方差,  $\sigma_{XY}$  表示图像  $X$  和  $Y$  的协方差.  $c_1, c_2, c_3$  为常数,为了避免分母为 0 的情况,通常取  $c_1 = (K_1L)^2, c_2 = (K_2L)^2, c_3 = \frac{c_2}{2}$ ,一般地  $K_1 = 0.01, K_2 = 0.03, L = 255$ .

## 6 结束语

本文从数字图像水印技术的基本模型、特点、分类、攻击和评测五个方面对近年来数字图像水印算法进行了综述,对每一类算法的性能进行了分析.基本模型从水印生成、水印嵌入和水印提取三个方面阐述,并表示出三个方面之间的关系.根据数字图像本身的特性,其数字水印算法特点主要有透明性、鲁棒性和安全性.依据嵌入水印方式的不同,将水印算法分为空域水印和频域水印,频域水印又分 DCT、DWT 和 DFT 三类.常见水印攻击有几何攻击和非几何攻击,评价标准有 PSNR、NC 和 SSIM.以下几个方面可能是未来数字图像水印技术研究工作的重点内容:噪声建模、鲁棒性和透明性之间的平衡、水印信息的完整性检测、构造基于内容分析的水印认证系统、构造没有遗漏区域的敏感图像认证技术等.

### 参考文献:

- [1] 楼偶俊,祁瑞华,邹俊,等.数字水印技术及其应用[M].北京:清华大学出版社,2004
- [2] 王丽娜,郭迟,李鹏.信息隐藏技术实验教程[M].武汉:武汉大学出版社,2004
- [3] 吴德阳,张金羽,容武艳,等.数字图像水印技术综述[J].高技术通讯,2021,31(2):148~162
- [4] 薛冰洁.数字图像水印和加密技术的设计和研究[D].南京:南京邮电大学,2017
- [5] 赵渊.基于数字水印技术的舰船图像加密研究[J].舰船科学技术,2020,42(22):52~54
- [6] 葛琳琳,韦梦文,张威,等.基于混沌映射图像篡改检测的脆弱水印方案[J].辽宁石油化工大学学报,2020,40(6):91~96
- [7] 王树梅,张文斌.一种基于伪随机的支持大尺寸图像水印算法[J].计算机技术与发展,2017,27(8):121~124+129
- [8] 欧静.一种基于二维码和 Kent 映射以及 DCT 的数字水印技术[J].计算机时代,2020(11):7~10

(下转第 68 页)

为主。从芦苇各生长期来看, A 区发芽期及腐解期对水质影响最大, 污染程度为中度或偏重度污染。这与 A 区芦苇生长面积及产量大、污染集中及局部水动力条件差有关。

(4) Pearson 相关分析表明,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、 $\text{BOD}_5$  之间及 TN 与 Chla 之间呈极显著正相关( $P<0.01$ ),  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  与  $\text{NH}_3\text{-N}$  及  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  与 Chla 之间呈显著正相关( $P<0.01$ )。结合  $\text{BOD}_5/\text{COD}_{\text{Mn}}$  值判断 A 区污染可能与芦苇腐解等外源污染较重及局部水质扩散能力较差有关。

#### 参考文献:

- [1] 宋佳伟, 徐 刚, 张 扬, 等. 环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 728~733
- [2] 冷春梅, 王亚楠, 高云芳, 等. 滨海芦苇湿地氮磷消减过程中浮游生物群落演替[J]. 环境保护科学, 2020, 46(1): 101~105
- [3] 王丽敏, 尚士友, 吴利斌, 等. 草型湖泊(乌梁素海)氮循环转化规律的研究[J]. 环境科学动态, 2004 (1): 16~18
- [4] 卢少勇, 张彭义, 余 刚, 等. 茭草、芦苇与水葫芦的污染物释放规律[J]. 中国环境科学, 2005, 25(5): 554~557
- [5] 周 静, 万荣荣, 吴兴华, 等. 洞庭湖湿地植被长期格局变化(1987—2016年)及其对水文过程的响应[J]. 湖泊科学, 2020, 32(6): 1723~1735
- [6] 黄一凡, 王金生, 王 凯, 等. 2003—2016年东洞庭湖自然保护区湿地动态变化特征[J]. 林业资源管理, 2018 (4): 41~46+140
- [7] 刘 敏. 加快洞庭湖区产业综合开发利用的思考: 以芦苇产业为例[J]. 长江经济带发展, 2019, 3(3): 42~46
- [8] 张运雄, 陈金山, 马乐凡. 洞庭湖区芦苇生产发展战略探讨[J]. 湖南造纸, 2012 (4): 11~15
- [9] 亓鹏玉, 刘金明. 挺水植物芦苇的腐解对水体水质的影响[J]. 环境工程技术学报, 2016, 6(6): 591~599
- [10] 刘 彪, 杨晓玉, 孙华鹏. 芦苇腐解对白鹤湖湿地水质的影响研究[J]. 河南城建学院学报, 2016, 25(5): 61~67
- [11] 张冬冬, 戴明龙, 徐高洪, 等. 三峡水库蓄水期洞庭湖出湖水量变化[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 613~622
- [12] 陈 栋, 渠 庚, 郭小虎, 等. 三峡建库前后洞庭湖对下荆江的顶托与消落作用研究[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(2): 86~94
- [13] 叶碧碧, 曹德菊, 储昭升, 等. 洱海湖滨带挺水植物残体腐解特征及其环境效应初探[J]. 环境科学研究, 2011, 24(12): 1364~1369
- [14] 唐金艳, 曹培培, 徐 驰, 等. 水生植物腐烂分解对水质的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 83~89
- [15] 程俊翔, 徐力刚, 王 青, 等. 洞庭湖近30 a水位时空演变特征及驱动因素分析[J]. 湖泊科学, 2017, 29(4): 974~983
- [16] 王 岩, 姜 霞, 李永峰, 等. 洞庭湖氮磷时空分布与水体营养状态特征[J]. 环境科学研究, 2014, 27(5): 484~491
- [17] 李照全, 熊 剑, 庄琼华, 等. 2018年度岳阳市生态环境质量报告书[R]. 岳阳市生态环境局, 2019
- [18] 李照全, 熊 剑, 庄琼华, 等. 2019年度岳阳市生态环境质量报告书[R]. 岳阳市生态环境局, 2020
- [19] 王 冰, 李利娟, 程伟娜, 等. 地表水中高锰酸盐指数、生化需氧量和化学需氧量的相关性分析研究[J]. 环境科学与管理, 2016, 41(4): 134~136+147
- [20] 孙 骏. 水质化学需氧量、高锰酸盐指数和生化需氧量之间的关系[J]. 环境监测管理与技术, 2000, 12(5): 35~36

(上接第 36 页)

- [9] Ashwani K. Security and privacy in digital image watermarking: recent trends and scope[J]. Recent Patents on Engineering, 2021, 15(2): 187~188
- [10] 王树梅. 数字图像中小目标自适应检测算法[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(1): 210~213
- [11] 王树梅, 范 勇. 一种基于直方图统计特征的灰度图像水印算法[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(1): 177~180+184
- [12] 王树梅. 图像特征里的小波域水印算法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(8): 175~178
- [13] Zhou Q F, Ren N, Zhu C Q, et al. Blind digital watermarking algorithm against projection transformation for vector geographic data[J]. International Journal of Geo-Information, 2020, 9(11): 1~20
- [14] Sun L M, Liang S L, Chen P P, et al. Encrypted digital watermarking algorithm for quick response code using discrete cosine transform and singular value decomposition[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80: 1~16
- [15] 崔 攀. 基于遗传算法的 DCT 域数字图像水印算法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016
- [16] 王树梅, 赵卫东, 王志成. 一种基于正交分解的离散小波域水印方案[J]. 计算机应用与软件, 2009, 26(2): 275~276+285
- [17] 王树梅, 张文斌. 一种基于傅里叶变换的鲁棒水印算法[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2019, 32(3): 17~22
- [18] 王树梅, 蔡 键. 一种基于 DFT 和曲线拟合的水印算法[J]. 计算技术与自动化, 2009, 28(2): 66~68+80
- [19] 王星茹. 抗剪切攻击的彩色图像水印算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015
- [20] 王会平. 抗几何攻击零水印算法的研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2016