

基于 MODIS 的 2000 ~ 2013 年巢湖蓝藻水华暴发时空分布特征

顾长梅^{1,2}, 张运^{1,2*}, 钱贞兵³, 徐升³, 黄晨^{1,2}

(1. 安徽师范大学国土资源与旅游学院, 安徽芜湖 241000; 2. 安徽省自然灾害过程与防控重点实验室, 安徽芜湖 241000; 3. 安徽省环境监测中心站, 安徽合肥 230000)

摘要 [目的]研究 2000 ~ 2013 年巢湖蓝藻水华暴发时空分布特征, 为巢湖流域水环境的综合治理提供决策支持。[方法]利用 2000 ~ 2013 年长时间序列 MODIS 遥感影像数据计算归一化植被指数, 着重分析巢湖蓝藻水华时空分布特征。[结果]巢湖蓝藻水华总体暴发频率较高, 以小面积水华为主, 大面积水华暴发具有偶然性。2010 年起, 蓝藻水华暴发频次和程度有增加趋势, 其中 2010 年水华暴发程度最严重。2000 ~ 2013 年巢湖蓝藻水华发生区域呈扩大趋势, 发生时间呈延长趋势。4 月就开始出现且伴有大面积水华暴发, 7、8、10 月是蓝藻暴发主要月份, 9 月份次之, 11 月明显减少; 蓝藻水华先在西北湖区产生, 逐渐向东部和中部蔓延, 在高峰期覆盖至整个湖心区域, 其中湖区南部、东南和东北沿岸是最后新增的水华区域。[结论]2000 ~ 2013 年巢湖蓝藻水华总体暴发频率较高, 发生时间呈延长趋势, 发生面积呈扩大趋势。

关键词 巢湖; 蓝藻; 归一化植被指数; 时空分布特征

中图分类号 S181 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)12-075-04

Characteristics of Spatial and Temporal Distribution of Blue-green Algae Blooms Outbreak in Chaohu Lake Based on MODIS in 2000 - 2013

GU Chang-mei^{1,2}, ZHANG Yun^{1,2*}, QIAN Zhen-bing³ et al (1. College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000; 2. Anhui Key Laboratory of Natural Disaster Process and Prevention, Wuhu, Anhui 241000; 3. Anhui Environmental Monitoring Center, Hefei, Anhui 230000)

Abstract [Objective] To research the characteristics of spatial and temporal distribution of blue-green algae blooms outbreak in Chaohu Lake, and to provide policy decision support for the comprehensive control of water environment in Chaohu basin. [Method] A set of MODIS images from 2000 and 2013 were used to calculate the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), in order to figure out the time and spatial distribution of the blue-green algae blooms. [Result] The overall outbreak frequency of blue-green algae blooms was relatively high with a small area of algae bloom as the main factor, and the large area of algae bloom as accidental factor. The frequency and scale of the blooms became higher and larger since 2010, which was the most serious in 2010. From 2000 to 2013, the occurrence of algae bloom was increasing, and the occurrence time was prolonged. The algae bloom began to appear in April within a large area. July, August and October were the major months for outbreak of blue-green algae, followed with September; and November reduced significantly. Blue-green algae blooms always showed up in northwest part of the lake, and spread to eastern and central part of the lake. It could reach the middle of the lake when the blue-green algae was the maximum in quantity. The south, southeast and northeast coasts were finally added to the bloom region. [Conclusion] Blue-green algae blooms outbreak has high frequency in Chaohu Lake in 2000 - 2013, the occurrence time is prolonged, and the occurrence area showed an enlarging trend.

Key words Chaohu Lake; Blue-green algae; NDVI; Temporal and spatial distribution characteristics

巢湖地处淮河中下游, 流域广, 污染重, 因此加强对该流域的蓝藻水华监测开展相关技术研究, 对该流域的可持续发展及湖泊水污染治理具有重大意义^[1]。目前, 遥感监测已成为蓝藻水华监测的重要方法, 也取得了一定研究成果^[2-3]。李亚春等^[4]研究表明, 归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 可以较好地提取蓝藻水华信息; 刘莹^[5]利用 MODIS 和巢湖水质监测数据初步建立巢湖蓝藻富营养化监测预警体系; 陈静等^[6]利用环境一号卫星 CCD 数据建立巢湖叶绿素 a 的反演模型, 反映湖泊富营养化程度。陈春波等^[7]利用 2012 年 5 月 10 日至 6 月 20 日的 HJ1A/1B 数据, 提取巢湖蓝藻的归一化植被指数, 开展巢湖蓝藻的遥感监测研究。上述研究着重于巢湖的蓝藻预警和遥感监测模型的建立, 对蓝藻水华暴发时空分布特征研究还不够深入。目前, 巢湖长期处于富营养化状态, 由于蓝藻水华暴发具有突发性, 在适宜条件下藻类暴发生长, 特别是西半湖已出现大面积水华。因此, 利用长时间序列的遥感数据

对巢湖蓝藻进行长期、实时的动态监测很有必要。笔者采用 2000 ~ 2013 年巢湖 MODIS 影像, 通过计算 NDVI 指数, 求取每幅影像中蓝藻水华的面积及其占总湖区面积的百分比, 总结和分析蓝藻水华时空分布特征, 以为巢湖流域水环境综合治理与管理提供决策支持。

1 材料与方法

1.1 数据获取 选取 2000 ~ 2013 年 3 ~ 11 月的 MODIS 影像, 共 1 237 景。先对影像进行人工筛选, 剔除湖区上空受云影响严重的影像及一些明显异常的影像, 得到的有效影像占总影像的 78.4%; 选取 MODIS 影像后, 对图像进行几何校正、大气校正和裁剪掩膜等预处理工作^[8]。

1.2 水华遥感识别

1.2.1 NDVI. NDVI 法是目前应用最为广泛的一种植被指数方法^[9], 根据 NDVI 值可有效判别蓝藻水华在遥感影像的空间分布情况。NDVI 法是对红光波段和近红外波段反射率差值, 并归一化所得 -1 和 1 之间的比值, 即:

$$NDVI = (\rho_{nir} - \rho_{red}) / (\rho_{nir} + \rho_{red}) \quad (1)$$

式中, ρ_{nir} 为近红外波段反射率, ρ_{red} 为红光波段反射率。

1.2.2 水华识别. 采用 NDVI 法确定蓝藻与水体的阈值, 提取巢湖蓝藻水华范围, 计算面积。为进一步提高水华提取精

基金项目 安徽省环境保护厅科研项目(2012-008)。

作者简介 顾长梅(1990-), 女, 安徽六安人, 硕士研究生, 研究方向: 水体遥感。* 通讯作者, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事地理信息系统和遥感的应用研究。

收稿日期 2016-03-30

度,刘淑英等^[10]通过研究蓝藻水华暴发程度与其光谱反射率之间的关系确定 MODIS 遥感影像,识别水华暴发级别 NDVI 的阈值。

其中, $NDVI \leq -0.13$,第1类属于湖泊水体无明显水华; $-0.13 < NDVI \leq -0.01$,第2类属于轻度蓝藻水华覆盖区; $-0.01 < NDVI \leq 0.25$ (其中 $-0.000\ 001 \leq NDVI \leq 0.000\ 001$ 是掩膜背景值),第3类属于中度蓝藻水华覆盖区;当 $NDVI$

> 0.25 时,第4类属于重度蓝藻水华覆盖区。

将蓝藻水华水体分4类,绘制了巢湖蓝藻水华特征等级 MODIS 影像解译图。图1a为2008年5月7日巢湖蓝藻暴发时 MODIS 影像,图1b为由 NDVI 模型阈值划分的4类蓝藻水华。经数次现场勘察,发现遥感监测蓝藻水华的分类情况与实际一致,因此可用于巢湖蓝藻水华暴发的动态监测。

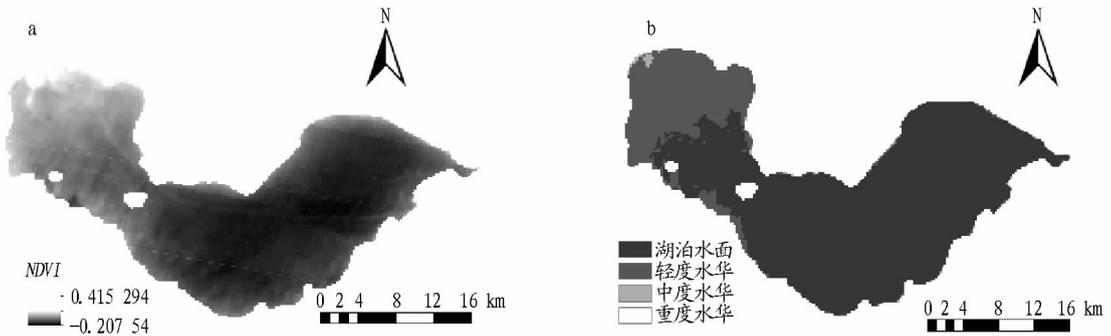


图1 MODIS 影像蓝藻水华解译

Fig.1 Interpretation of blue-green algae blooms in MODIS image

2 结果与分析

2.1 水华发生频率

2000~2013年对巢湖水域监测了970次,其中有水华数据574景,无水华(少云)数据224景,无效数据(大部分水域被云层覆盖的数据)172景,数据有效率(未大部分被云层覆盖数据)为82.23%。

从图2可见,2000~2013年巢湖区域发生水华的总频率为59.18%,巢湖水域大部分区域被云层覆盖的景数大致一致,无云覆盖的数据影像可以满足巢湖蓝藻水华的常规监测需求。从有效数据分析,水华发生频率为71.93%,2000~2013年水华发生频率虽有波动,但总体呈增长趋势,水华发生率较高,这表明巢湖水域水体富营养化程度严重。

水华面积小于 100 km^2 为小面积水华,暴发频率总比为90.52%,平均每年暴发频次达到63次; $100\sim 300\text{ km}^2$ 为中等面积水华,暴发频率总比为7.53%,暴发频次明显少于小面积水华; $> 300\text{ km}^2$ 为大面积水华,暴发频率总比为2.00%,无明显变化规律,表明大面积水华暴发具有偶然性,其中2010

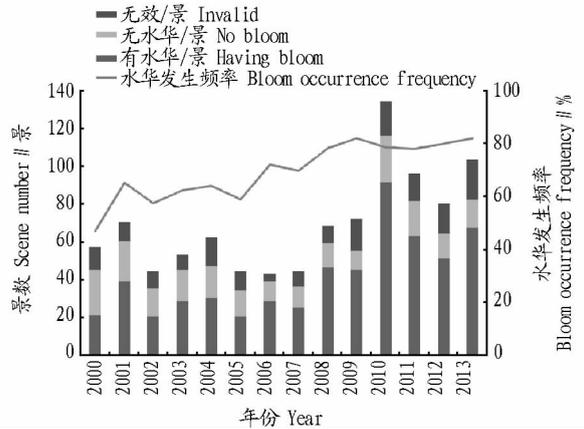
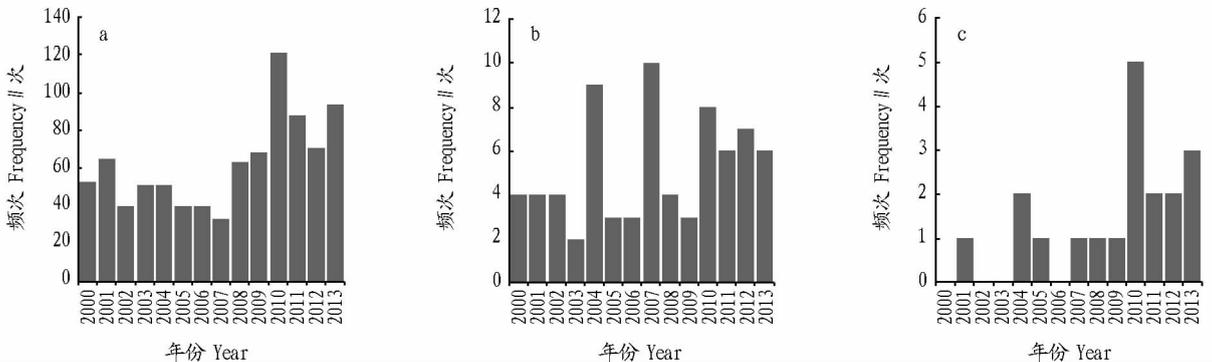


图2 2000~2013年巢湖水华发生频率

Fig.2 Occurrence frequency of blue-green algae bloom in Chaohu Lake in 2000-2013

年大面积水华暴发次数较多,为5次,水华程度较严重(图3)。



注:a为小面积水华发生频次;b.为中等面积水华发生频次;c.为大面积水华发生频次。

Note:a was outbreak frequency of small area bloom;b was outbreak frequency of middle area bloom;c was outbreak frequency of large area bloom.

图3 2000~2013年巢湖蓝藻水华暴发面积强度区间分布

Fig.3 Interval distribution of the outbreak area and intensity of blue-green algae bloom in Chaohu Lake in 2000-2013

从图 4 可见,3、4、5 月的小面积水华暴发频次较多,平均暴发频次 114 次,其中 4、5 月出现大面积水华且暴发频次分别是 5 和 3 次,5 月份水华暴发面积超过 600 km² 的有 2 次;6、7、8 月的小面积水华暴发频次相对春季减少,为 97 次,而大面积水华暴发频次明显增加,其中 7、8 月的大面积水华暴发次数占大面积水华总暴发次数的 47.37%,暴发强度达到最高。9、10、11 月的小面积水华和中等面积水华暴发频次相对夏季略有减少,大面积水华明显减少,10 月份仅出现 2 次。

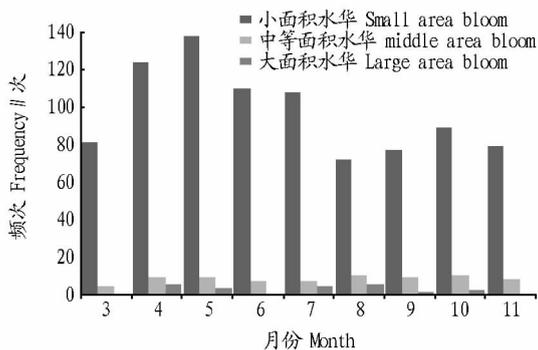


图 4 2000~2013 年巢湖逐月水华暴发面积强度区间分布

Fig. 4 Interval distribution of the outbreak area and intensity of monthly blue-green algae bloom in Chaohu Lake in 2000-2013

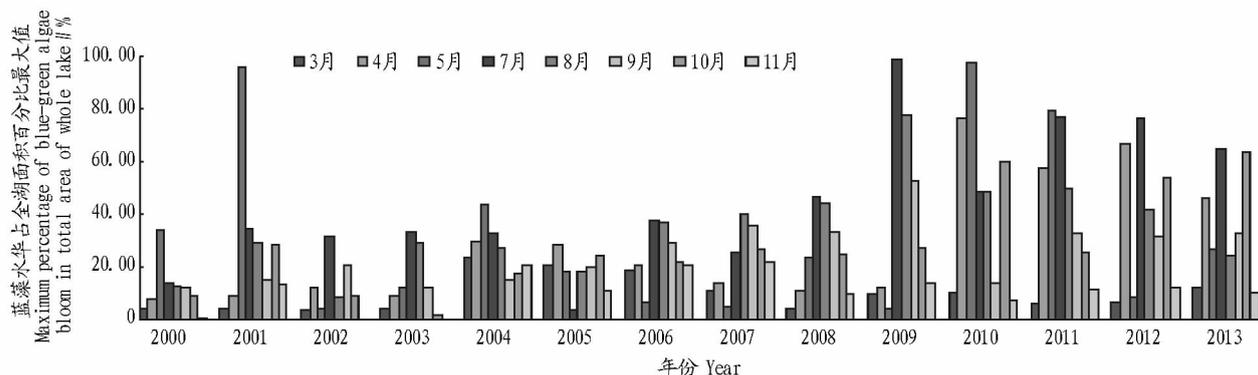


图 5 蓝藻水华占全湖面积百分比最大值(年际)

Fig. 5 The maximum percentage of blue-green algae bloom in total area of Chaohu Lake(interannual)

2.2.2 空间分布特征。2000~2013 年 3~11 月每月 1 景(除去 6 月),按月份对比,将各月蓝藻水华暴发面积最大 1 景的影像按月份分开,求出 2000~2013 年中每个月影像的蓝藻水华暴发面积均值,取最接近当月均值的那年影像作为对应月份的特征代表。

理论上蓝藻在春季基本处于休眠状态,无明显水华,但从图 8 可见,4 月份巢湖湖区周边有少许蓝藻暴发,不排除可能有部分水草的干扰;5 月份蓝藻开始出现局部性暴发,暴发范围分布在湖区西北部。夏季受持续高温和日照时间等的影响,西北湖区的蓝藻暴发区逐渐向湖中心和东部移动和扩散,8 月份甚至占据了整个西半湖和湖区中部;9 月份蓝藻暴发减轻,主要分布在湖区的西岸和西南沿岸,但水华覆盖面积很大;10 月份蓝藻暴发范围扩散到湖区南部,范围较 9 月大,但强度低于 9 月,只有小面积的重度水华;11 月基本消

2.2 蓝藻水华时空变异特征

2.2.1 时间分布特征。由于有些月份的数据仅有 1~2 景(其中 6 月份的数据大多数年份仅有 1 景),数据量偏少,代表性不够,故这些月份的数据不作分析。选取各月蓝藻水华占整个湖区面积比例最大的 1 景影像作为代表,进行蓝藻暴发情况的年际和月际变化比较。

从图 5 可见,2000~2009 年巢湖的蓝藻水华暴发情况基本平稳,除了 2001 年 5 月,最大暴发面积超过全湖的 40.00% 外,其余年份的平均暴发面积比为 21.81% 左右。2009 年后,平均暴发面积在 40.00% 以上,2010 年平均水华面积比达到 45.55%,最大一次暴发发生在 2010 年 5 月 24 日,暴发面积超过 90.00%;2010 年开始,水华面积百分比一直维持在较高水平,其中有 5 次暴发面积超过 70.00%,但蓝藻水华暴发面积总体呈下降趋势。

由于遥感影像受天气的限制,蓝藻逐月最大暴发面积百分比难以全面反映各月实际情况。相对而言,逐月暴发平均面积百分比能更准确地反映各月蓝藻水华暴发强度。图 6、7 的变化趋势整体上一致,在 4、5 月巢湖蓝藻已经小范围暴发,暴发面积逐月增加,7 月达到最大,接着开始缓慢减少。10 月份蓝藻水华暴发面积比 9 月严重,9、10 月的暴发面积最大百分比分别为 25.09%、29.22%;暴发面积的平均百分比分别为 11.20%、12.18%。

亡,出现零星块状分布,可能受风浪等影响,东半湖少量沿岸呈带状分布。

3 结论与讨论

(1) 该研究获得的 MODIS 数据总体质量良好,满足动态遥感监测水华演变趋势的需求;对水华严重程度进行分级,提高了水华提取的精度。

(2) 近些年由于巢湖湖区水质持续重度污染,巢湖蓝藻水华总体暴发频率较高,其水华发生时间呈延长趋势,发生区域呈扩大趋势:①时间分布上:4、5 月出现蓝藻,且伴有 6 次大面积蓝藻水华暴发;7、8 月暴发强度高;9 月蓝藻暴发程度较 7、8 和 10 月轻,这与以往研究中 9、10 月是蓝藻的主要暴发期不一致。这可能是由于夏季持续高温对蓝藻积聚有明显的抑制作用,致使 9 月巢湖未发生大面积严重水华;11 月蓝藻明显减少。总体上,2000~2009 年蓝藻水华暴发相对

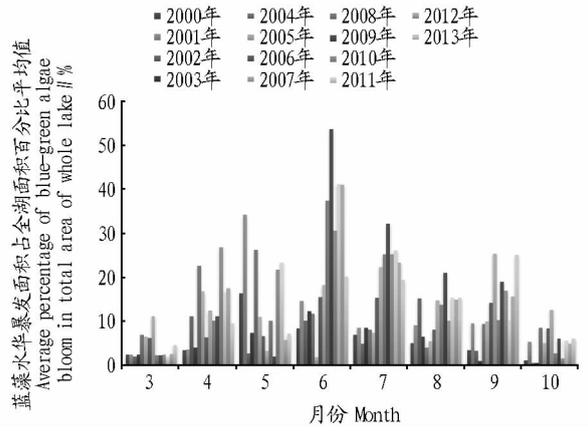
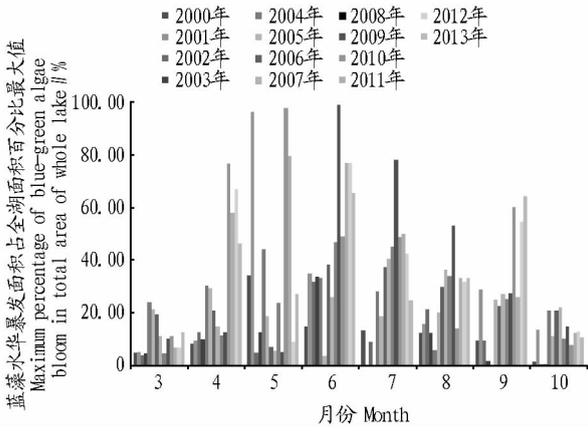


图6 2000~2013年各月巢湖最大蓝藻水华暴发面积百分比

图7 2000~2013年各月巢湖平均蓝藻水华暴发面积百分比

Fig. 6 Percentage of the monthly maximum area of blue-green algae bloom in Chaihu Lake from 2000 to 2013

Fig. 7 Percentage of the monthly average area of blue-green algae bloom in Chaihu Lake from 2000 to 2013

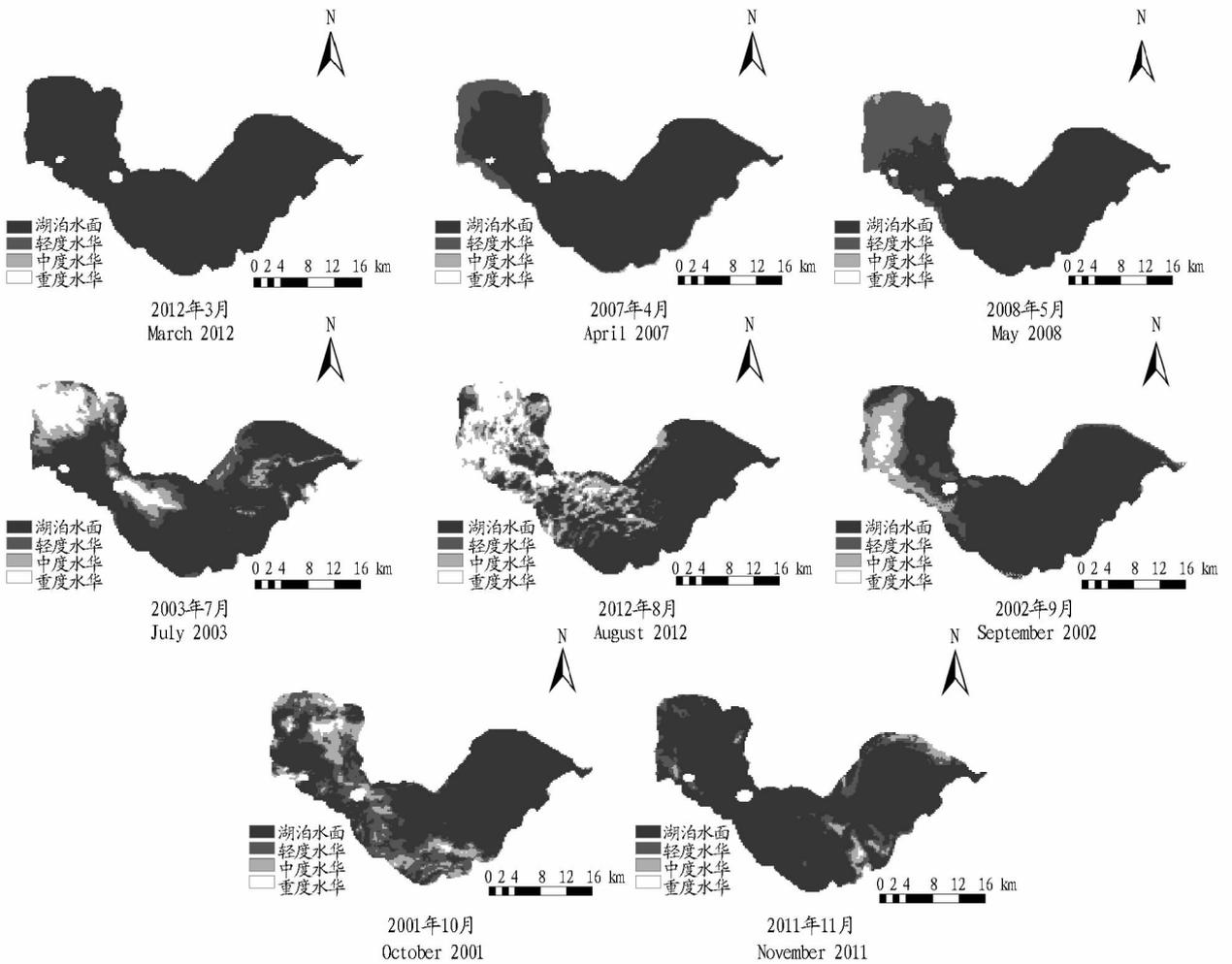


图8 巢湖蓝藻水华暴发区域月份特征

Fig. 8 Monthly characteristics of the blue-green algae bloom outbreak in Chaohu Lake

较平稳,2010年开始,水华暴发频次、程度均呈增加趋势,其中2010年蓝藻水华暴发程度最严重。②空间分布上:先在西北湖区产生,逐渐向东部和中部蔓延,在高峰期覆盖至整个湖心区域,湖区南部、东南和东北沿岸是新增水华区域。其中,西半湖是蓝藻水华高发区,尤其是西北沿岸,几乎整个夏季均被蓝藻水华覆盖,水体富营养化最为严重,是水华监

测及治理重点区域。

(3)该研究由于光学遥感受云的影响较大,部分时段的遥感监测数据存在间断,此外,监测成果未考虑12月到次年2月的蓝藻发生情况,因此在今后的研究中,可考虑引用微波遥感及无人机遥感数据弥补可见光遥感数据的不足。

(下转第81页)

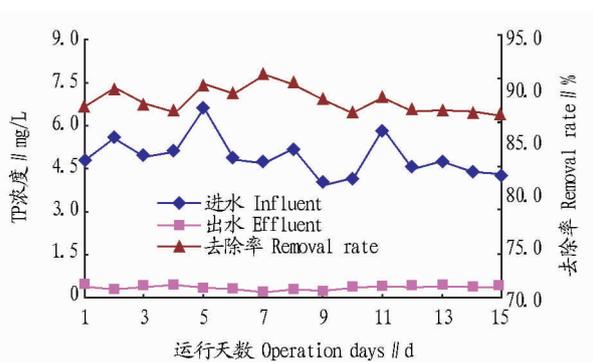
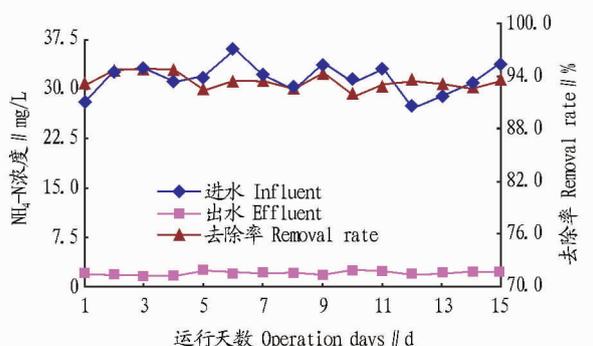


图3 TP 浓度随运行天数的变化情况

Fig.3 The change of TP content with operation days

图4 NH₄⁺-N 浓度随运行天数的变化情况Fig.4 The change of NH₄⁺-N content with operation days

BOD 为 120.0 ~ 150.0 mg/L,符合 SBBR 工艺进水要求。

预处理废水经 SBBR 最终处理后排放,出水 COD 浓度为 64.0 ~ 88.0 mg/L,NH₄-N 浓度为 2.0 ~ 4.0 mg/L,TP 浓度为 0.3 ~ 0.5 mg/L,COD、TP 和 NH₄-N 的去除率均超过 90.0%,各项指标达到且优于设计出水水质要求。

表2 项目运行成本

Table 2 The project operation cost 元/t

序号	费用项目	运行成本
Serial No.	Project cost	Operation cost
1	动力费	0.55
2	工资福利费	0.91
3	药剂费	0.11
合计		1.57

5 运行成本和效益分析

5.1 运行成本 该工程运行费用主要包括动力费,运行管

理人员工资福利和药剂费用。工程总装机运行功率 120.0 kW/d,实际运行功率 65.5 kW/d,电费按 0.6 元/(kW·h) 计算,动力费约 0.55 元/t。该废水处理站机械化、自动化程度较高,只需设置管理人员 1 名,因此,工资福利费为 24 000 元/a。药剂主要包括絮凝剂的使用,费用约 0.11 元/t。通过上述测算表明,该工程污水的运行成本为 1.57 元/t(表 2),年运行费用 3.39 万元。

5.2 效益分析 该工程污水处理能力 $Q = 72 \text{ m}^3/\text{d}$,工程总占地面积约 80 m²,工程总投资 49.54 万元,其中土建费用 20.70 万元,设备费 26.16 万元。运行成本 1.57 元/t,年运行费用 3.39 万元。

废水处理站投入运行后,减少了污染物的排放,降低了对周边水体和生态环境的影响。工程运行期间的污染物年削减量 COD_{Cr} 为 23.65 t/a,BOD₅ 9.27 t/a,NH₄-N 0.53 t/a,TP 0.15 t/a。

6 结论

混凝沉淀-SBBR 技术处理酱菜废水工程运行表明,SBBR 工艺间歇性运行的特征很好地解决了酱菜生产企业排水水量水质波动大的问题,具有良好的操作性,投资运行成本低。工艺处理效果好,出水各项指标均可达到《污水综合排放标准》GB8978—96 一级标准,运行稳定,适合于低盐度酱菜生产废水的治理。

参考文献

- [1] 陈焱,曾朝银,龙腾锐,等. 榨菜综合废水好氧生物处理工艺的选择试验[J]. 中国给水排水,2009,25(15):21-25.
- [2] 毛雪梅. 多维曝气 SBBR 工艺处理餐饮废水实验研究[D]. 重庆:重庆工商大学,2014.
- [3] 徐峥勇,杨朝晖,曾光明,等. 序批式生物膜反应器(SBBR)处理高氨氮渗滤液的脱氮机理研究[J]. 环境科学学报,2006,26(1):55-60.
- [4] 常凤民,王启宝,周岳溪,等. SBBR 处理腈纶生产废水的实验研究[J]. 环境科学与技术,2012,35(9):117-120.
- [5] 王哲. SBR 和 SBBR 工艺处理海水养殖废水的研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.
- [6] ANDRADE DO CANTO C S, RODRIGUES J A D, RATUSZNEI S M, et al. Feasibility of nitrification/denitrification in a sequencing batch biofilm reactor with liquid circulation applied to post treatment[J]. Bioresour technology, 2008, 99(3):644-654.
- [7] 王荣娟,杨朝晖,曾光明,等. 不同供氧策略对 SBBR 反应器实现短程硝化厌氧氨氧化的影响分析[J]. 环境科学学报,2007,27(11):1809-1817.
- [8] 易艳红,李小江,孙红松,等. 新型 SBBR 工艺处理低 C/N 值生活污水的研究[J]. 中国给水排水,2011,27(3):12-15.
- [9] 汪大翠,雷乐成. 水处理新技术及工程设计[M]. 北京:化学工业出版社,2001.

(上接第 78 页)

参考文献

- [1] CARPENTER D J, CARPENTER S M. Modeling inland water quality using Landsat data[J]. Remote sensing of environment, 1983, 13:345-352.
- [2] 周先传,徐升. 巢湖蓝藻水华遥感监测初探[J]. 中国环境监测,2010,26(3):36-39.
- [3] 宋瑜,宋晓东,江洪. 太湖藻类的遥感监测研究[J]. 遥感信息,2008(4):102-108.
- [4] 李亚春,孙佳丽,谢志清,等. 基于 MODIS 植被指数的太湖蓝藻信息提取方法研究[J]. 气象科学,2011,31(6):737-741.
- [5] 刘莹. 巢湖蓝藻富营养化监测与预警优化研究[D]. 合肥:合肥工业大

- 学,2012.
- [6] 陈静,吴传庆,申维,等. 基于环境一号卫星 CCD 数据的巢湖叶绿素 a 的动态监测[J]. 中国环境监测,2012,28(1):116-119.
- [7] 陈春波,周宝同,田永中,等. 环境一号卫星多光谱数据在巢湖蓝藻动态监测中的应用[J]. 中国环境监测,2014,30(1):200-204.
- [8] 杨何群,周红妹,尹球,等. FY-3 气象卫星 MERSI 数据快速处理的 IDL 实现[J]. 遥感技术与应用,2012,27(4):566-574.
- [9] 李旭文. Landsat-7 SLC-OFF ETM 遥感数据下载及在太湖蓝藻水华监测中的应用[J]. 环境监测管理和技术,2009(3):54-57.
- [10] 刘淑英,牛志春,徐升. 巢湖富营养化遥感监测[J]. 环境监测管理和技术,2010,22(4):55-57.