

## 基于 MODIS 数据的 2000—2010 年乌梁素海“黄苔”时空变化\*

王艳<sup>1</sup>, 黄永梅<sup>1\*\*</sup>, 于长水<sup>2,3</sup>, 祁瑜<sup>1</sup>, 张景慧<sup>1</sup>

(1: 北京师范大学资源学院, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

(2: 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

(3: 内蒙古自治区环境科学科学院, 呼和浩特 010070)

**摘要:** 利用 2000—2010 年每年 5—9 月 MODIS 数据根据比值算法提取乌梁素海湖区黄苔的面积和空间分布信息并进行统计分析, 探求乌梁素海黄苔产生的时空分布规律及特征, 从而为黄苔的预防和治理提供支持. 结果表明: (1) 黄苔面积变化的年际和月际特征方面, 2000、2001、2005、2006、2008、2010 年黄苔面积超过了多年平均值 (24 km<sup>2</sup>). 5—7 月份黄苔面积较小, 保持在 20 km<sup>2</sup> 左右; 8 月黄苔面积迅速增长 (约 28 km<sup>2</sup>), 9 月黄苔面积最大, 达到 40 km<sup>2</sup> 左右. (2) 黄苔发生频率方面, 2001 年黄苔的规模和频率最高, 发生频率达到 0.58; 2005、2006、2010 年次之, 发生频率在 0.25 附近波动 (多年年均黄苔暴发频率为 0.19); 其他年份黄苔的发生频率处于低于 0.10 的水平. 黄苔发生规模较大、次数较多的月份集中在 8、9 月, 发生频率分别达到 0.27、0.52, 超过多年均黄苔暴发频率 0.19; 其他月份黄苔的发生频率处于低于 0.10 的水平. (3) 黄苔出现的空间分布方面, 西大滩为东大滩的北部至中部, 以及乌梁素海南部明水区排干口附近的西部沿岸是黄苔出现频率较高的区域. (4) 2 个月前的日均温度、降雨和营养盐浓度及当月风速与黄苔的产生具有极显著相关性; 营养盐含量 (TN、TP) 的空间分布与黄苔的空间分布表现出较好的相关性. 乌梁素海黄苔面积的年际变化受人类活动特别是生态补水的影响明显.

**关键词:** 乌梁素海; 黄苔; MODIS; 时空变化

## Detection of temporal and spatial variation of Huangtai algae bloom using MODIS satellite data in Lake Ulansuhai from 2000 to 2010

WANG Yan<sup>1</sup>, HUANG Yongmei<sup>1</sup>, YU Changshui<sup>2,3</sup>, QI Yu<sup>1</sup> & ZHANG Jinghui<sup>1</sup>

(1: *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, P. R. China*)

(2: *College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, P. R. China*)

(3: *Inner Mongolia Environmental Sciences Academy, Hohhot 010070, P. R. China*)

**Abstract:** Understanding the temporal-spatial distribution characteristics of Huangtai algae bloom can provide support decision-making for prevention and control of Huangtai algae bloom in Lake Ulansuhai, China. Cloud-free images shot by MODIS sensor from May to September and from 2000 to 2010 were utilized to extract algae bloom area and spatial distribution by means of Normalized Difference Vegetation Index. According to the analysis, conclusions are as below: (1) as for area variation, Lake Ulansuhai had a severe situation of Huangtai algae bloom in 2000, 2001, 2005, 2006, 2008 and 2010, more than the average of the whole period (24 km<sup>2</sup>). In regard to monthly variation, Huangtai algal areas in May, June, July remained low around 20 km<sup>2</sup>. Yet Lake Ulansuhai have larger Huangtai algal areas in August and September, around 28 km<sup>2</sup> and 40 km<sup>2</sup>, respectively. (2) As for occurrence frequency, the highest frequency of Huangtai algae bloom occurred in 2001 (0.58), followed by 2005, 2006 and 2010 fluctuating around 0.25 (higher than the average of 11 a, 0.19); occurrence frequency in other years kept a low level around 0.10. In the aspect of monthly variation, occurrence frequency in May, June, July kept a low level around 0.10. The times of Huangtai algal bloom experienced a more rapid increase and a larger scale of outbreak frequency in August and September, 0.27 and 0.52,

\* 内蒙古自然科学基金项目(2011MS0511)资助. 2011-09-12 收稿; 2012-02-22 收修改稿. 王艳, 女, 1985 年生, 硕士研究生; E-mail: octoberofsky@gmail.com.

\*\* 通信作者; E-mail: ymhuang@bnu.edu.cn.

respectively, higher than the average of 5 months (0.19). (3) Huangtai algae blooms mostly lied in the region called Xidatan, the north coast and middle of the region called Dongdatan, and along the west coast of south Lake Ulansuhai, where local agricultural irrigation drainage water flows into the lake and thus the most striking algal blooms emerge there. (4) Daily average temperature, precipitation and nutrient concentrations (total nitrogen and total phosphorus) in two months ago have a significant correlation relationship with Huangtai algae's occurrence. Additionally, synchronous wind speed has a significant correlation relationship with Huangtai algae's occurrence. The spatial distribution of nutrient (TN, TP) is well consistent with the distribution of Huangtai algae's occurrence. Human activities, especially artificial supplement for water in Lake Ulansuhai, have great impact on the variation of Huangtai algae occurrences.

**Keywords:** Lake Ulansuhai; Huangtai algae bloom; MODIS; spatial and temporal variation

乌梁素海是全球荒漠半荒漠地区极为少见的具有高生物多样性的的大型草型湖泊,为地球上同一纬度最大的天然湿地,在调节内蒙古西部干旱区的生态环境和气候<sup>[1]</sup>以及维持生物多样性等方面具有重要作用。近年来,乌梁素海明水区域连续暴发黄苔<sup>[2]</sup>,使湖区野生鸟类栖息和鱼类的生存受到极大威胁,还可能促进乌梁素海的沼泽化。目前针对乌梁素海的“黄苔”开展了一些基于遥感数据的监测工作,但更多的工作集中在地面监测<sup>[3]</sup>。本文通过 2000—2010 年乌梁素海地区的 MODIS 遥感影像,分析乌梁素海黄苔的时空变化特征及环境因子对黄苔发生的影响,以期对黄苔预防和预警提供支持。

水生浮游藻类在适宜的环境条件下具有突发性<sup>[4]</sup>,因此对藻类进行长期、实时的动态监测,要求遥感数据必须具有高的时间分辨率。目前 MODIS 数据因其获取周期短、光谱分辨率高并可免费获得的优势,在水华监测研究中越来越多地被采用<sup>[4-5]</sup>。国外对藻类水华的监测多是基于 SeaWiFS, MODIS, MERIS 遥感数据估计水表层叶绿素或浮游植物浓度来实现对藻类水华的监测<sup>[5-9]</sup>。Kahru 等<sup>[9]</sup>分别用 CZCS 数据对 1979—1984 年以及 SeaWiFS 和 MODIS-Aqua 数据对 1998—2006 年波罗的海藻类出现的时间和空间频率进行计算,同时发现水中磷酸盐含量可以很好地指示藻类发生的频率。Vincent 等<sup>[10]</sup>基于 Landsat ETM 数据检测特定色素含量从而达到对 Erie 湖蓝藻水华的监测。然而由于水体的复杂性,在不同地区和不同季节,可能需要不同的遥感算法来获得。段洪涛等<sup>[11]</sup>对不同遥感数据对比发现波段比值(近红外/红光 > 1)算法稳定,发展成为蓝藻水华遥感提取普适模式,其中 MODIS/Terra 数据可以利用判别式  $\text{Band2} > 0.1$  和  $\text{Band2}/\text{Band4} > 1$  提取蓝藻水华。孔维娟等<sup>[12]</sup>基于 2007 年 10—12 月长时间序列 MODIS 卫星遥感影像,根据段洪涛等提出的蓝藻提取模式获取了太湖蓝藻水华信息。马荣华等<sup>[13]</sup>基于段洪涛等提出的多源卫星遥感影像的太湖蓝藻水华提取模式,收集 1979 年以来太湖 MODIS, CEBERS, TM/ETM 和 IRSP6 卫星遥感影像分析了太湖水华时空分布特征。周立国等<sup>[4]</sup>基于 MODIS 数据采用比值植被指数(近红外/红光)确定蓝藻分布的相对浓度信息;最后通过不同时相蓝藻浓度的叠加分析,得出蓝藻水华的动态变化信息。徐京萍等<sup>[14]</sup>针对 2007 年 5 月太湖暴发的蓝藻水华事件,发现利用 MODIS 近红外/红光波段比值指数、*NDVI*、*EVI* 指数均可确定蓝藻分布范围。

## 1 研究区概况

乌梁素海(40°36'~41°03'N, 108°43'~108°57'E)位于内蒙古巴彦淖尔盟河套灌区末端,湖区南北长 35~40 km,东西宽 5~10 km,库容量为  $2.5 \times 10^8 \sim 3.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,湖面平均高程为 1018.5 m,水深 0.5~2.5 m,80% 水域水深为 0.8~1.0 m,为大型水生植物响应型重度富营养化湖泊。湖泊所在地区四季更替明显,多年平均气温为 7.3℃,全年日照时数为 3185.5 h。湖泊流域内降雨少而蒸发大,多年平均降雨量为 224 mm,水面蒸发量为 2000~2600 mm<sup>[15]</sup>。湖面于每年 11 月初结冰,翌年 3 月末到 4 月初开始融化,冰封期约为 5 个月<sup>[15]</sup>。

乌梁素海是内蒙古河套灌区排灌水系的重要组成部分,当地农田退水及工业、生活污水流经乌梁素海最后汇入黄河,其中总排干沟的排水是乌梁素海主要的来水源<sup>[16]</sup>。乌梁素海湖区暴发的黄苔是由绿藻门接合藻纲双星藻目双星藻科的几种丝状藻类组成,主要是水绵、双星藻、转板藻 3 个属的藻类。丝状绿藻首先附着在沉水植物或底泥表面生长,达到一定生物量后,形成团块,随光合作用产生的气泡飘浮至水面,团块表层受强光照射部分死亡而呈黄色,被称为“黄苔”<sup>[3]</sup>(图 1)。

## 2 数据和方法

### 2.1 数据源和数据预处理

乌梁素海的黄苔多发生于 5—9 月<sup>[3,15]</sup>,所以本文采用 MODIS LIB 数据,共选取了 2000—2010 年内 5 月 1 日—9 月 30 日(即每年的第 121~270 d)能见度高的 208 幅遥感影像。根据影像的质量和相邻影像之间时间的均匀性,以每 10 d 为一组,得到 15 组时间区间,每组时间区间内选一期影像,共筛选出 137 幅。根据 Alberts Equal Area 投影进行几何校正<sup>[4]</sup>,并重采样至 250 m,再经过辐射定标<sup>[17-18]</sup>和大气校正<sup>[3]</sup>将遥感影像像元亮度值(DN 值)转化为地物的真实反射率。

为了分析环境条件对黄苔发生的影响,采用来自中国气象科学数据共享服务网的乌拉特中旗 2000 年 1 月 1 日—2010 年 12 月 31 日的气象日报表数据,包括平均气温、日最高气温、日最低气温、20:00 至次日 20:00 降水量、平均相对湿度、平均风速、极大风速、日照时数;由内蒙古环境科学研究院提供 2000—2010 年乌梁素海营养盐月全氮(TN)、全磷(TP)数据资料。

### 2.2 数据分析方法

2.2.1 比值算法提取黄苔信息 由于比值算法能有效减少大气和镜面反射的影响<sup>[4]</sup>,可更直观地得出黄苔发生位置、范围等专题信息,因此本文通过比值算法对乌梁素海地区 2000—2010 年间不同时期的 208 幅影像提取黄苔信息。本文比值算法采用郑伟等<sup>[3]</sup>提出的归一化差异指数,提取黄苔信息,其表达式为:

$$I_{RB} = \frac{(R_{Red} - R_{PRed}) - (R_{Blue} - R_{PBlue})}{(R_{Red} - R_{PRed}) + (R_{Blue} - R_{PBlue})}$$

式中, $R_{Red}$ 代表红光波段的反射率; $R_{Blue}$ 代表蓝光波段的反射率。在 MODIS 影像中分别对应于 1,3 波段。 $R_{PRed}$ 表示红光波段由于程辐射影响增加的反射率; $R_{PBlue}$ 表示蓝光波段由于程辐射影响增加的反射率。选取乌梁素海湖中的一块纯净明水体,根据暗目标法,得到  $R_{PRed}$  为 0.040、 $R_{PBlue}$  为 0.065<sup>[3]</sup>,从而消除大气程辐射的影响。根据已有研究<sup>[3]</sup>,当  $-0.1 \leq I_{RB} < 1$  时为黄苔,进行黄苔分布面积的提取(图 2)。



图 1 乌梁素海的黄苔

Fig. 1 Huangtai algae in Lake Ulansuhai

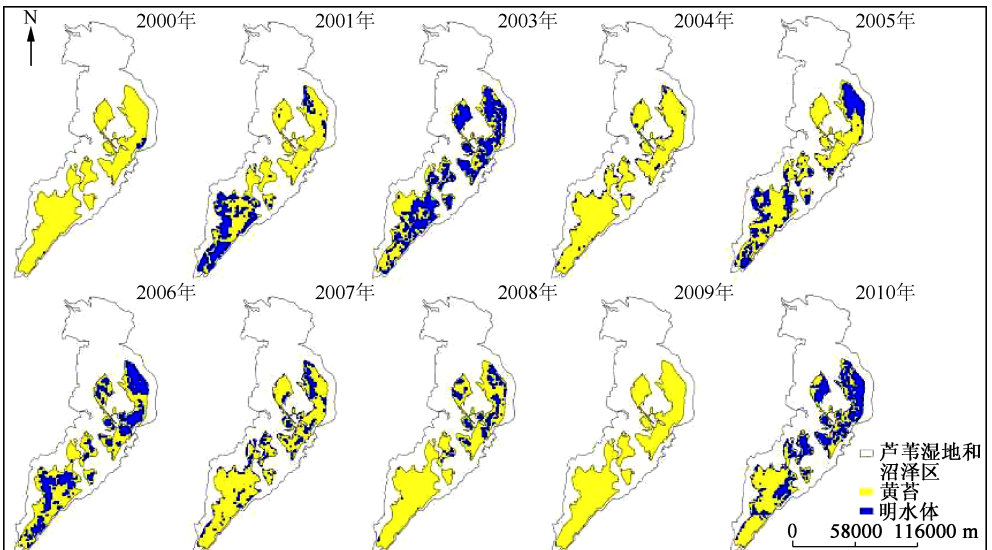


图 2 乌梁素海 2000—2010 每年 8 月(第 231~240 d)黄苔发生的空间分布

Fig. 2 Extracted spatial distribution of Huangtai algae occurrence in August(231–240 d) from 2000 to 2010 in Lake Ulansuhai

2.2.2 黄苔发生频率的统计方法 在已有藻类暴发的研究基础上<sup>[19]</sup>, 本文以黄苔面积超过湖区面积 40% 作为黄苔暴发的标准来统计黄苔暴发频率。

第  $j$  年黄苔暴发频率  $P_j = \sum_{i=1}^{15} b_{ij}/N_j$ ; 多年第  $k$  月黄苔暴发频率  $P_k = \sum_{j=2000}^{2010} \sum_{i \in k} b_{ij}/M_k$ ; 多年年均黄苔暴发频率  $\bar{P}_y = \sum_{j=2000}^{2010} P_j/11$ ; 多年月均黄苔暴发频率  $\bar{P}_m = \sum_{k=5}^9 P_k/5$ . 式中,  $j$  表示年份;  $i$  表示时间区间组号;  $k$  表示月份;  $b_{ij}$  表示第  $j$  年第  $i$  组时间区间黄苔暴发情况, 若暴发, 则  $b_{ij}$  记为 1, 否则记为 0;  $N_j$  表示第  $j$  年有效影像的个数;  $M_k$  表示第  $k$  月有效影像的个数;  $P_j$  表示第  $j$  年黄苔发生频率;  $P_k$  表示多年第  $k$  月黄苔暴发频率;  $\bar{P}_y$  表示多年年均黄苔暴发频率;  $\bar{P}_m$  表示多年月均黄苔暴发频率。

2.2.3 黄苔面积的统计方法 根据提取的各期黄苔分布图, 分别统计每年 5—9 月的逐月平均黄苔面积、逐年年均黄苔面积、多年年均黄苔面积和多年月均黄苔面积。

第  $j$  年平均黄苔面积  $A_j = \sum_{i=1}^{15} S_{ij}/N_j$ ; 多年第  $k$  月平均黄苔面积  $A_k = \sum_{j=2000}^{2010} \sum_{i \in k} S_{ij}/M_k$ ; 多年年均黄苔面积  $\bar{A}_y = \sum_{j=2000}^{2010} A_j/11$ ; 多年月均黄苔面积  $\bar{A}_m = \sum_{k=5}^9 A_k/5$ . 式中,  $j, i, k, N_j$  和  $M_k$  同上,  $S_{ij}$  表示第  $j$  年第  $i$  组时间区间的黄苔面积;  $A_j$  表示第  $j$  年年均黄苔面积;  $A_k$  表示多年第  $k$  月月均黄苔面积;  $\bar{A}_y$  表示多年年均黄苔面积;  $\bar{A}_m$  表示多年月均黄苔面积。

### 3 结果

#### 3.1 乌梁素海黄苔面积的变化特征

乌梁素海在 2000—2010 年间, 共有 6 年(2000、2001、2005、2006、2008、2010 年)的黄苔年均分布面积超过多年年均黄苔暴发面积(约 24 km<sup>2</sup>) (图 3a); 2002、2003、2004、2007、2009 年的黄苔年均分布面积低于多年年均黄苔暴发面积。黄苔面积在 5—7 月多年月均黄苔面积约为 20 km<sup>2</sup>; 8—9 月黄苔面积由 28 km<sup>2</sup> 开始呈迅速上升趋势, 在 9 月黄苔面积达到最大(40 km<sup>2</sup> 左右) (图 3b), 与黄苔逐月暴发频率的趋势相似。

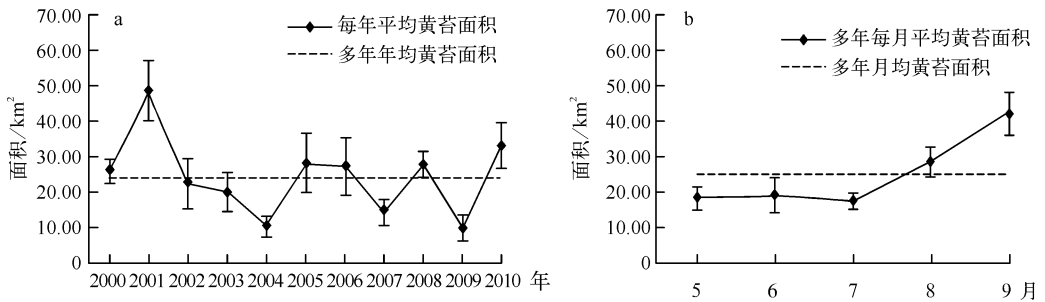


图 3 2000—2010 年乌梁素海年均(a)和月均(b)黄苔分布面积

Fig. 3 Variations of yearly(a) and monthly(b) average area of Huangtai algae bloom from 2000 to 2010 in Lake Ulansuhai

#### 3.2 黄苔暴发频率的变化特征

2000—2010 年每年黄苔的暴发频率表明, 2001 年黄苔的暴发频率最高, 可达到 0.58; 2002—2004 年有逐渐下降的趋势, 低于多年年均黄苔暴发频率(0.19); 2005 和 2006 年又有所增加, 达到 0.27 左右; 2007—2009 年暴发频率很低, 约 8%; 2010 年又有所增加, 可达到 0.23 (图 4a)。总体上说, 除 2001 年暴发频率最高外, 其它年份呈波动变化的状态。2000—2010 年多年每月黄苔暴发频率表明, 5—7 月黄苔暴发频率低于 0.10, 低于多年月均黄苔暴发频率(0.19), 8 月和 9 月黄苔的暴发频率迅速增加, 9 月可达到 0.52 (图 4b)。

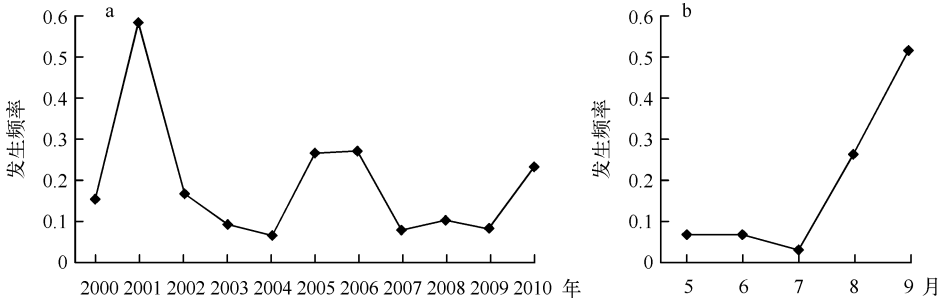


图 4 2000—2010 年乌梁素海黄苔暴发频率的 annual 变化(a) 和 monthly 变化(b)

Fig. 4 Variations of yearly(a) and monthly(b) occurrence frequency of Huangtai algae bloom from 2000 to 2010 in Lake Ulansuhai

基于 2000—2010 年乌梁素海黄苔暴发的空间分布,分析黄苔暴发的多年平均频率空间分布特征,结果表明西大滩(区 1)大部分、东大滩(区 2)的北部至东中部沿岸、区 3 的西部沿岸及南部出口处是黄苔暴发频率较高的区域(图 5).

### 3.3 多年月均黄苔面积的变化特征

2000—2010 年 5—9 月黄苔面积变化表明,2000、2001 和 2008 年的 5 月份,2000、2001、2008、2010 年的 6 月份以及 2000、2001、2003、2006、2008、2010 年的 7 月份黄苔面积超过了对应月份的多年均值 16.95、21.32、18.41 km<sup>2</sup>. 其他年份 5—7 月的黄苔面积较小,只有 10 km<sup>2</sup> 左右. 而 2001、2002、2003、2005 年的 8 月份黄苔面积超过了该月的多年均值(28.17 km<sup>2</sup>),其他年份 8 月的黄苔面积在 3~20 km<sup>2</sup> 范围内变化. 2001、2002、2005、2006、2010 年的 9 月份黄苔面积超过了该月的多年均值(42.40 km<sup>2</sup>),其他年份 9 月的黄苔面积在 10~30 km<sup>2</sup> 范围内变化(图 6). 综上所述,黄苔暴发较严重的月份有 2000 年 5—7 月、2001 年 5—8 月、2002 年 8—9 月、2003 年 7—8 月、2005 年 7 月、2006 年 7 月和 9 月、2008 年 5—7 月、2010 年 6—9 月.

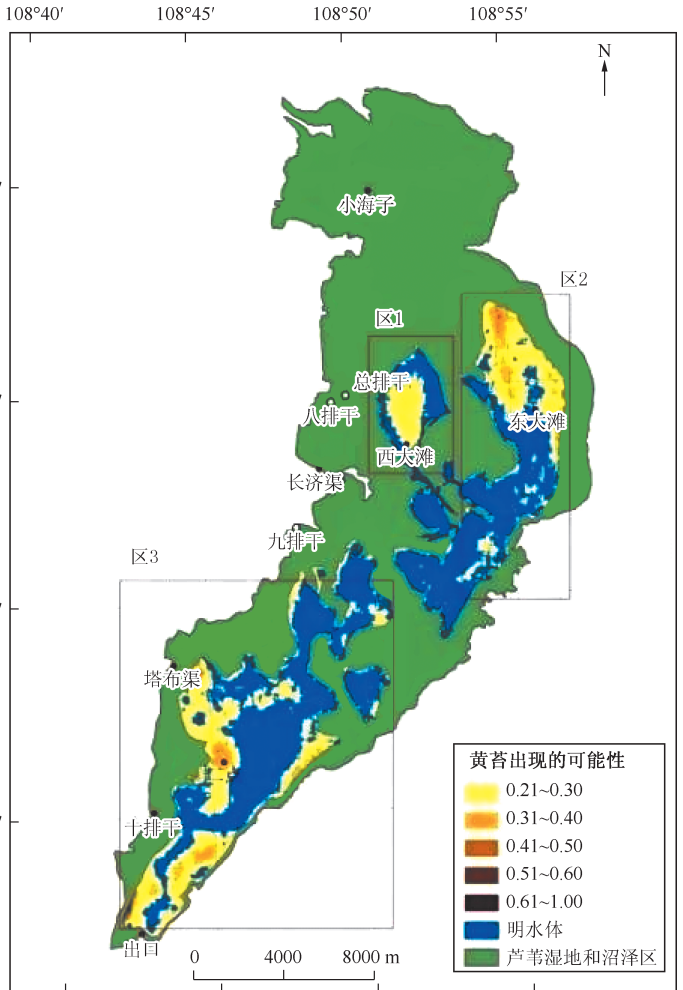


图 5 2000—2010 年乌梁素海黄苔暴发频率的空间分布特征  
Fig. 5 Average occurrence frequency of Huangtai algae blooms' spatial distribution from 2000 to 2010 in Lake Ulansuhai

## 4 分析和讨论

通过 2000—2010 年 MODIS

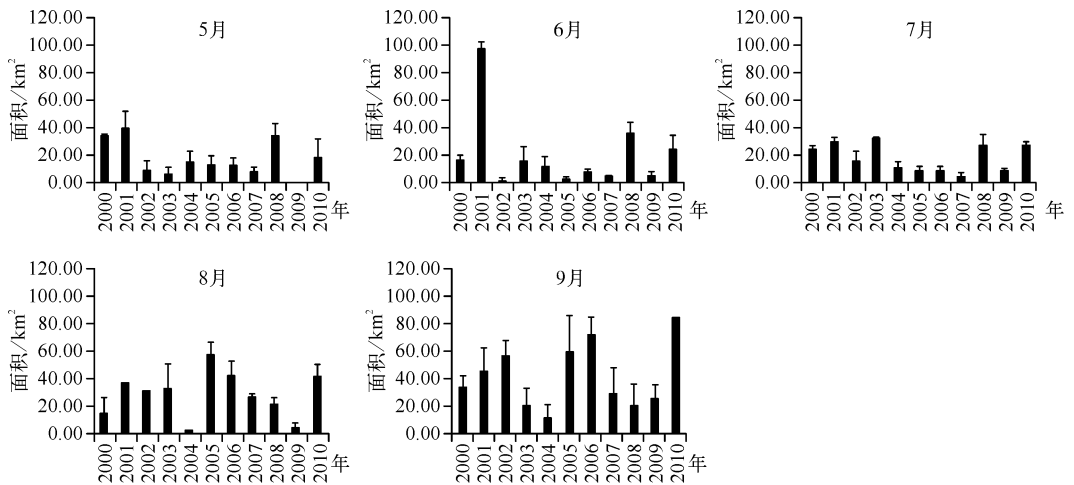


图6 2000—2010年乌梁素海每月月均黄苔面积

Fig. 6 Variations average monthly area of Huangtai algae bloom from 2000 to 2010 in Lake Ulansuhai

数据监测结果表明,乌梁素海的黄苔暴发具有明显的季节性,一般从5月份开始,8、9月份达到最大,9月底开始减少直至消亡.解华明等<sup>[20]</sup>利用HJ1A/1B-CCD数据对巢湖2009和2010年蓝藻水华的逐月监测结果表明巢湖蓝藻暴发一般从5、6月开始,9月达到最大,10月下旬开始减少,11月基本消亡.藻类水华的形成和优势种群的演替不仅与其自身的生理特征有关,同时与外界环境因子密切相关.黄苔是湖泊环境因子综合作用的结果.环境因子对藻类生长影响的研究表明,气象因素、水文因素以及生物活动(包括浮游动物、水生植物以及人类活动)对藻类的生长起着重要作用<sup>[19-22]</sup>.

#### 4.1 气象因子对黄苔暴发的影响

乌梁素海黄苔面积与气象因素相关性分析表明,当月平均风速对黄苔的产生具有极显著负相关关系(-0.375);两个月前的日均温度、月均降雨对黄苔的产生具有极显著正相关关系(分别为0.527和0.364);月均日照时数与黄苔面积呈极显著正相关(0.398),但月均日照时数对黄苔发生的影响呈现时间上3个月的滞后性(表1).

表1 环境因素与黄苔面积之间的Spearman相关系数矩阵

Tab. 1 Spearman's correlation coefficient between environmental factors and Huangtai algae area

变量	S	V <sup>1</sup>	T <sup>2</sup>	P <sup>2</sup>	T <sup>3</sup>	H <sup>3</sup>	T <sup>4</sup>	H <sup>4</sup>
S	1.000	-0.375 **	0.527 **	0.364 *	0.483 **	0.398 **	0.451 **	0.424 **
V <sup>1</sup>		1.000	-	-	-	-	-	-
T <sup>2</sup>			1.000	0.731 **	-	-	-	-
P <sup>2</sup>				1.000	-	-	-	-
T <sup>3</sup>					1.000	0.775 **	-	-
H <sup>3</sup>						1.000	-	-
T <sup>4</sup>							1.000	0.836 **
H <sup>4</sup>								1.000

\*\*表示极显著相关( $P < 0.01$ ), \*表示显著相关( $P < 0.05$ );S表示当月月均黄苔面积,V<sup>1</sup>表示当月月均平均风速;T<sup>2</sup>表示两个月前的月均平均气温,P<sup>2</sup>表示两个月前的月均降雨量;T<sup>3</sup>表示三个月前的月均平均气温,H<sup>3</sup>表示三个月前的月均日照时数;T<sup>4</sup>表示四个月前月均平均气温,H<sup>4</sup>表示四个月前月均日照时数.

根据相关分析的结果,黄苔生长对月均温度、日照时数的变化分别表现出两个月、三个月的延迟效应.从乌梁素海当地气温的月际变化来看(图7a),3—7月气温上升,7月气温达到最大值;气温在5—9月体现

为促进黄苔的生长,并在 9 月可能达到最有利于黄苔生长的气温条件.而日照时数(图 7a)从 3 月增长到 6 月,在 6 月达到最大;日照时数在 6—9 月期间也表现为有利黄苔生长,并在 9 月最有利.这与黄苔面积的月际变化(图 3b)相一致.根据已有研究,气温和日照时数这种滞后性是由于太阳光能通过气温和光照时间作用于湖水,湖水水温的变化需要两个月或者更长时间的能量积累<sup>[23]</sup>.

降水可以通过径流和湿沉降的方式来增加湖水中营养盐的输入<sup>[24]</sup>,相关分析结果表明(表 1),黄苔生长对月均降水量的变化表现出两个月的延迟效应.由于这种滞后性,从乌梁素海当地降雨的月际变化来看(图 7b),3—7 月降水量增大,7 月达到最大值;降雨在 5—9 月期间表现为促进黄苔的生长,9 月达到对黄苔生长最有利的降雨条件.

在浅水湖泊中,由于风力的搅动,导致底泥再悬浮,从而造成磷的释放,水体中磷含量进一步增加,因此有利于藻的生长<sup>[25-26]</sup>.风速还可以影响黄苔在水中的空间分布<sup>[19]</sup>.George 等<sup>[27]</sup>在 Eglwys Nynydd 湖中观察发现当风速较大(3 m/s)时,水力扰动能消除表面的水华,并且使蓝藻比较均匀的分布在水柱中.另外在芬兰的 Gulf 湖,蓝藻水华的形成也得益于高温和风平浪静的天气<sup>[28]</sup>.一个较浅的水库中,大于 3 m/s 的风速可以使藻类群体向水底层迁移从而改变水表层的混合模式<sup>[27]</sup>.适宜的扰动既能提高微囊藻的生长速率又能防止其沉降,从而维持水体中微囊藻的高丰度.每年 3—9 月期间,乌梁素海日平均风速最大值出现在 5 月,此后风速下降,9 月份风速达到最小;而根据相关分析的结果(表 2),当日平均风速的变化可以直接影响当时黄苔发生情况.由于当日平均风速在 5—9 月期间一直减小(图 7b),因而 5—9 月更加有利于黄苔迁移到湖水表层,并在 9 月达到最有利于黄苔聚集在湖面的风速条件.这与黄苔面积的月际变化(图 3b)相一致.

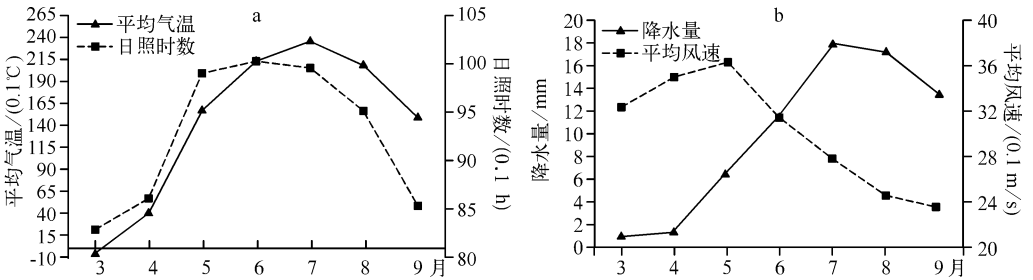


图 7 乌梁素海 2000—2010 年多年每月平均日照时数和气温(a)及降水量和平均风速(b)

Fig. 7 Average monthly temperature and sunshine hour(a), wind speed and precipitation(b) from 2000 to 2010 in Lake Ulansuhai

#### 4.2 营养盐对黄苔生长的影响

对乌梁素海黄苔面积与湖水的 TN、TP 含量进行相关分析,结果表明水体中 TN、TP 含量对黄苔的产生具有极显著负相关关系(相关系数分别为  $-0.545$  和  $-0.510$ )(表 2),但黄苔发生对 TN、TP 含量变化表现出两个月的滞后效应.而当月水体以及三个月前水体中 TN、TP 的含量对黄苔的产生不具有显著或极显著的相关性.

从乌梁素海 2000—2010 年多年 TN、TP 含量的月际变化来看(图 8),3—5 月水中两种营养盐含量下降,6 月两种营养盐含量短暂回升,7 月继续下降;TN、TP 含量均在 5、6 月达到高峰,这与该时期水生植物处于生长初期,对氮、磷吸收利用缓慢有关;另外该时期温度不断升高,风速不断加大,水体上下混合较充分,水动力增强,底质大量释放氮、磷也是氮、磷浓度较高的原因.因此在 5—7 月期间应该表现为促进黄苔生长的营

表 2 TN、TP 含量与黄苔面积之间的 Spearman 相关系数矩阵

Tab. 2 Spearman's correlation coefficient between concentrations of TN, TP and Huangtai algae area

变量	S	TN <sup>2</sup>	TP <sup>2</sup>
S	1.000	$-0.545^{**}$	$-0.510^{**}$
TN <sup>2</sup>		1.000	$0.789^{**}$
TP <sup>2</sup>			1.000

\*\*表示极显著相关( $P < 0.01$ );S 表示当月月均黄苔面积;TN<sup>2</sup>表示两个月前的水体中月均 TN 含量;TP<sup>2</sup>表示两个月前的水体中月均 TP 含量.



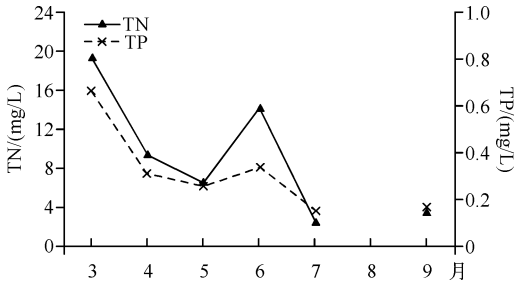


图8 乌梁素海 2000—2010 年多年月平均 TN 和 TP  
Fig. 8 Average monthly TN and TP from 2000 to 2010 in Lake Ulansuhai

“引黄入海”工程,引黄河水入乌梁素海  $1400 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 2004 年春季通过专用补水渠引水  $5100 \times 10^4 \text{ m}^3$  [2,29]。自 2003 年起连续 5 a 时间里累计向乌梁素海生态补水  $3.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,有力促进了湖区水质持续好转。另一方面是因为对总排干入乌梁素海的红坨卜扬水站维修改造,提高了输水能力,同时对入乌梁素海的三大排干渠实施清淤疏浚,并对塔布渠、长济渠、义和渠三条引水渠道进行拓宽 [15]。2007—2010 年间乌梁素海补水量与黄苔发生的年际变化相关性较大(图 3a)。

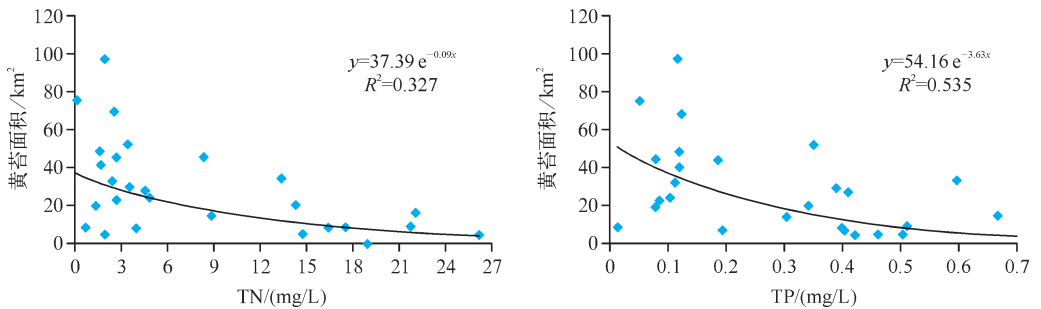


图9 黄苔面积与 TN、TP 关系的回归拟合  
Fig. 9 The regression between Huangtai algae area and TN, TP

#### 4.3 黄苔暴发的空间分布

黄苔在乌梁素海中的空间分布除了由风生流驱动的表层黄苔的迁移和随湖流发生的藻类交换量引起,可能还与湖区水位深度的空间分布、水体营养盐含量空间分布有关。由于数据获得的限制,仅对营养盐的空间分布对黄苔暴发的影响进行分析。

在不同的风浪条件下,藻类在水柱中的垂直分布受到显著影响。根据许多学者 [30-31] 的监测数据,总体上看,不同形态氮浓度(亚硝酸盐氮,氨氮, TN) 的分布特征均表现出由北至南逐渐降低,以及西高东低的规律。这种分布规律与黄苔频发的空间位置相吻合。由于总排干渠携带大量污染物从湖区西北端入湖,受芦苇区阻碍向东向南分流,向南分流的污水与八排、九排等干渠污水混合叠加,使得各形态氮均在乌梁素海西部湖区出现高值分布区,水流的营养元素在向南流动途中被水生植物吸收而使不同形态氮浓度自北向南降低。这与黄苔在区 1 西大滩(图 5)大部分区域和区 3 西部沿岸具有高的发生频率是一致的。向东分流的污水则进入相对较为封闭的湖区,由于水动力条件渐趋稳定,氮素更容易在该区表层沉积物中累积,因而在湖区东北部产生氮素高值区,并在水流方向上表现出递减的趋势。这与黄苔在区 2(图 5)的北部至东中部沿岸水域更容易产生是一致的。湖泊中氮、磷在空间分布上的分布规律基本一致 [16,30,32]。因此营养盐浓度的空间分异可能是导致乌梁素海黄苔集中于湖区北部和西岸排干口附近区域的主要原因。然而,由于水华暴发是一个受到水环境条件和水生态等众多生物和非生物因素影响的复杂过程,因此黄苔暴发的空间分布原因还需要从水深分布、风生流等方面来进一步分析。

养盐条件,8月黄苔生长受到营养盐的限制,9月营养盐再次表现为促进黄苔生长。然而这与黄苔面积实际表现出的月际变化(图 3b)不太一致。由于藻类吸收营养盐和生长是两个过程,黄苔是否受营养盐限制尚不确定。根据简单相关分析和拟合(图 9)的结果,黄苔受 TP 限制的可能性更大一些。

人类活动,尤其是生态补水和打捞,对于乌梁素海黄苔的发生主要体现在年际变化的影响上。由于每年生态补水主要发生在 10 或 11 月,每年的春浇秋灌带来的灌溉排水分别发生在 5 月初和 10 月,因此其对黄苔发生的月际变化影响不明显。乌梁素海的水质在 2003、2004 年有变好的趋势,一方面因为每年引入大量的黄河水有利于水体周转。2003 年当地政府实施



致谢:感谢龚吉蕊副教授,王佳津、易文斌同学在本文撰写和修改过程中的热心帮助!

## 5 参考文献

- [1] 乌云, 朝伦巴根, 李畅游等. 乌梁素海表层沉积物营养元素及重金属空间分布特征. 干旱区资源与环境, 2011, (4): 143-148.
- [2] 张世坤, 赵希林, 霍庭秀. 乌梁素海黄藻成因与防控对策. 中国水利, 2010, (7): 28-30.
- [3] 郑伟, 韩秀珍, 刘诚等. 内蒙古乌梁素海“黄苔”暴发卫星遥感动态监测. 湖泊科学, 2010, 22(3): 321-326.
- [4] 周立国, 冯学智, 王春红等. 太湖蓝藻水华的 MODIS 卫星监测. 湖泊科学, 2008, 20(2): 203-207.
- [5] Kutser T, Metsamaa L, Strömbeck N *et al.* Monitoring cyanobacterial blooms by satellite remote sensing. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, 67(1/2): 303-312.
- [6] Kuster T, Metsamaa L, Vahtmäe E *et al.* Suitability of MODIS 250 m resolution band data for quantitative mapping of cyanobacterial blooms. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 2006, 55(4): 318-324.
- [7] Hunter PD, Tyler AN, Willby NJ *et al.* The spatial dynamics of vertical migration by *Microcystis aeruginosa* in a eutrophic shallow lake: A case study using high spatial resolution time-series airborne remote sensing. *Limnology and Oceanography*, 2008, 53(6): 2391-2406.
- [8] Wynne TT, Stumpf RP, Tomlinson MC. Characterizing a cyanobacterial bloom in western Lake Erie using satellite imagery meteorological data. *Limnology and Oceanography*, 2010, 55(5): 2025-2036.
- [9] Kahru M, Savchuk OP, Elmgren R. Satellite measurements of cyanobacterial bloom frequency in the Baltic Sea: interannual and spatial variability. *Marine Ecology Progress Series*, 2007, 343: 15-23.
- [10] Vincent RK, Qin X, McKay RML *et al.* Phycocyanin detection from LANDSAT TM data for mapping cyanobacterial blooms in Lake Erie. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(3): 381-392.
- [11] 段洪涛, 张寿选, 张渊智. 太湖蓝藻水华遥感监测方法. 湖泊科学, 2008, 20(2): 145-152.
- [12] 孔维娟, 马荣华, 段洪涛等. 太湖秋冬季蓝藻水华 MODIS 卫星遥感监测. 遥感信息, 2009, (4): 80-84.
- [13] 马荣华, 孔繁翔, 段洪涛等. 基于卫星遥感的太湖蓝藻水华时空分布规律认识. 湖泊科学, 2008, 20(6): 687-694.
- [14] 徐京萍, 张柏, 李方等. 基于 MODIS 数据的太湖藻水水体识别模式. 湖泊科学, 2008, 20(2): 191-195.
- [15] 宋君. 乌梁素海湿地水质污染特征及水体自净能力探讨[学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
- [16] 史小红. 乌梁素海营养元素及其存在形态的数值模拟分析[学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.
- [17] 相云. MODIS 1B 资料处理方法研究与软件实现[学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [18] 吕恒, 魏小鸿. 太湖悬浮物浓度的 MODIS 数据定量反演提取. 地球信息科学, 2008, 10(2): 151-155.
- [19] 孔繁翔, 宋立荣等. 蓝藻水华形成过程及其环境特征研究. 北京: 科学出版社, 2011: 48.
- [20] 解华明, 潘法康, 舒莹等. 巢湖蓝藻水华时空分布特征遥感监测研究. 安徽农业科学, 2011, 21: 12825-12827.
- [21] 谢平. 太湖蓝藻的历史发展与水华灾害. 北京: 科学出版社, 2008: 205.
- [22] 杨东方. 浮游植物的生态与地球生态系统的机制. 北京: 海洋出版社, 2009: 320.
- [23] Yang DF, Gao ZH, Zhang J *et al.* Examination of daytime length's influence on phytoplankton growth in Jiaozhou Bay, China. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2004, 22(1): 70-82.
- [24] 王小治, 尹微琴, 单玉华等. 太湖地区湿沉降中氮磷输入量——以常熟生态站为例. 应用生态学报, 2009, 20(10): 2487-2492.
- [25] 杨柳燕, 肖琳. 湖泊蓝藻水华暴发、危害与控制. 北京: 科学出版社, 2011: 281.
- [26] Shi XL, Yang LY, Wang FP *et al.* Growth and phosphate uptake kinetics of *Microcystis aeruginosa* under various environmental conditions. *Journal of Environmental Sciences*, 2004, 16(2): 288-292.
- [27] George DG, Edwards RW. The effect of wind on the distribution of chlorophyll a and crustacean plankton in a shallow eutrophic reservoir. *Journal of Applied Ecology*, 1976, 13: 667-690.
- [28] Kanoshina I, Lips U, Leppänen J. The influence of weather conditions (temperature and wind) on cyanobacterial bloom development in the Gulf of Finland (Baltic Sea). *Harmful Algae*, 2003, 2(1): 29-41.
- [29] 于瑞宏, 李畅游, 刘廷玺等. 乌梁素海湿地环境的演变. 地理学报, 2004, (6): 948-955.
- [30] 李卫平, 李畅游, 任波等. 乌梁素海氮磷营养元素分布特征及地球化学环境分析. 山西水利科技, 2008, (1): 14-16.
- [31] 杨志岩, 李畅游, 张生等. 乌梁素海氮磷浓度与叶绿素 a 时空分布关系研究. 干旱环境监测, 2009, (1): 16-19.
- [32] 孙惠民, 何江, 高兴东等. 乌梁素海沉积物中全磷的分布特征. 沉积学报, 2006, (4): 579-584.