

基于 MODIS 数据的全国 144 个重点湖库营养状态监测: 以 2018 年夏季为例*

曹 畅^{1,2}, 王胜蕾^{2,3}, 李俊生^{2,4**}, 赵红莉⁵, 申 维¹, 谢 娅^{1,2}

(1: 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

(2: 中国科学院空间信息创新研究院, 数字地球重点实验室, 北京 100094)

(3: 北京大学遥感与地理信息研究所, 北京 100871)

(4: 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

(5: 中国水利水电科学研究院, 水资源研究所, 北京 100048)

摘 要: 随着经济社会的快速发展和进步, 我国湖库水体富营养化情况越来越严重. 卫星遥感在水体营养状态监测方面具有重要潜力, 但基于卫星遥感的全国范围内湖库水体营养状态监测和分析方面还鲜有研究. 本文基于 2018 夏季的 MODIS 卫星遥感数据生产 *FUI* 指数产品, 构建基于 *FUI* 水色指数的湖库营养状态评价方法, 监测全国范围内 144 个重点湖库水体的营养状态等级. 结果表明: 贫营养、中营养、富营养的湖库比例分别为 16%、24%、60%; 营养状态在空间上分布不均匀, 总体上呈现东高西低的现象; 东北山地与平原和东部平原湖区以富营养状态水体为主; 西部湖库水体以贫到中营养状态为主, 尤其是青藏高原湖区贫营养比例比较高; 海拔和地表温度等自然因素与工业点源和农业面源污染等人为因素是湖库营养状态的重要影响因素.

关键词: MODIS; 湖库; *FUI*; 水色指数; 营养状态等级

MODIS-based monitoring of spatial distribution of trophic status in 144 key lakes and reservoirs of China in summer of 2018*

Cao Chang^{1,2}, Wang Shenglei^{2,3}, Li Junsheng^{2,4**}, Zhao Hongli⁵, Shen Wei¹ & Xie Ya^{1,2}

(1: *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geoscience (Beijing), Beijing 100083, P.R.China*)

(2: *Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, P.R.China*)

(3: *Institute of Remote Sensing and Geographic Information System, Peking University, Beijing 100871, P.R.China*)

(4: *School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China*)

(5: *Department of Water Resources, China Institution of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, P.R. China*)

Abstract: With the rapid development of the economy and society, the eutrophication of lakes and reservoirs in China is becoming increasingly serious. Satellite remote sensing has a great potential in the monitoring of water nutrient status, but little research exists on the monitoring and analysis of the water trophic status of lakes and reservoirs on a nationwide scale based on satellite remote sensing. In this study, MODIS data from summer 2018 was used to produce *FUI* index products, construction of evaluation method of lake and reservoir nutrition state based on *FUI* water color index and monitored the trophic status of 144 key lakes and reservoirs in China. The results show that the proportion of oligotrophic, mesotrophic, and eutrophic lakes and reservoirs is 16%, 24%, and

* 2020-04-10 收稿; 2020-08-21 收修改稿.

国家重点研发计划项目(2017YFC0405804)、国家自然科学基金面上项目(41971318)和高分辨率对地观测系统重大专项(04-Y30B01-9001-18/20)联合资助.

** 通信作者; E-mail: lij@radi.ac.cn.

60%, respectively. The proportion of eutrophication is very high; the spatial distribution of trophic status is uneven, and the overall eutrophication is higher in the east than the west. Most reservoirs and lakes in the northeast and the east are eutrophic. The water bodies of western lakes are mostly oligotrophic to mesotrophic, an especially high percentage of oligotrophic in the Qinghai Tibet Plateau. Natural factors such as altitude and surface temperature, industrial point source, and agricultural non-point source pollution are important factors influencing the trophic state of lakes and reservoirs.

Keywords: MODIS; lake and reservoir; *FUI*; watercolor index; trophic status

水体富营养化是水体中营养盐增多而导致浮游植物爆发性生长的一种现象,富营养化的湖库水体透明度和溶解氧浓度下降,容易暴发蓝藻水华,对水环境质量造成严重的威胁^[1-3].因此,动态监测和评价湖库水体的营养状态具有重要的意义.水体营养状态的常规监测方法是水面采集水样并送到实验室内测量叶绿素 *a*、总氮、总磷等水质参数,进而计算营养状态指数,然后根据营养状态指数分级可以将水体营养状态分为贫营养、中营养和富营养^[4-6].这种方法虽然精度较高但费时、费力、费用高,而且只能获得个别采样点的结果.与之相比,基于卫星遥感监测水体营养状态具有快速、范围广、成本低等优势,适合开展大范围动态监测.

基于卫星遥感监测水体营养状态主要是基于卫星遥感反演的叶绿素 *a* 浓度计算水体营养指数,进而得到水体的营养状态^[7-8].Thiemann 等利用 IRE-1C 数据反演德国梅克伦堡州湖泊水体中的叶绿素 *a* 浓度,基于卡尔森模型评价其水体的富营养化状态^[9];Matthews 等通过测量内陆水体叶绿素 *a* 浓度,监测非洲南部多个湖库水体 10 年间的富营养化及其变化情况^[10].Gilerson 等利用红色和近红外波段算法评价美国布拉斯加州的叶绿素 *a* 浓度,观测该州湖泊水体的营养状态^[11];朱利等利用 GF-1 号卫星 WFV 数据对太湖叶绿素 *a* 浓度、透明度、悬浮物浓度进行遥感监测,并评价水体富营养状态和水质参数空间分布^[12];Le 等在三波段算法的基础上发展四波段解析算法提高三波段算法的性能,比较两种算法在反演太湖叶绿素 *a* 浓度的精度,并对太湖营养状态进行评价^[13].

然而,由于内陆水体光学特性复杂,受浮游植物、悬浮泥沙、有色可溶性有机物共同影响,而且随区域和季节变化大,因为不同季节的水体温度变化对于藻类生长的影响、地表径流和风速变化对于悬浮物的影响往往存在差异,进而导致很多湖库水体叶绿素 *a* 反演算法都具有很强的区域和季节局限性^[14-16],因此限制了基于卫星遥感的大范围水体营养状态监测.与传统的基于叶绿素 *a* 反演结果的营养状态卫星遥感监测不同,Wang 等^[17]发展了基于水色指数的水体营养状态等级评价方法,并且成功应用于 2012 年全球大型湖库水体营养状态评价,利用文献和公报中的 100 个水体实地监测结果进行评价得到精度为 80%,这为开展大范围湖库水体营养状态评价奠定了基础.

随着工农业的快速发展,我国湖库水体富营养化的趋势较为严重,开展全国范围内重点湖库营养状态的动态监测具有重要意义,有利于宏观掌握全国湖库营养状态的时空分布,为管理决策提供数据支持.但是,《2018 年中国生态环境状态公报》只监测了 111 个湖库的营养状态,前几年监测的湖库数量更少.因此,非常有必要开展基于卫星遥感的全国范围内湖库的营养状态监测,作为公报的补充,一方面可以从空间上监测更多的湖库,另一方面可以从时间上追溯湖库营养状态的变化.因此本文将利用基于水色指数的营养状态评价方法^[17],生产全国范围内重点湖库的营养状态遥感监测产品,进而分析全国重点湖库营养状态空间分布规律及其主要影响因素.

1 数据源和研究区

1.1 数据源

搭载在 Terra 和 Aqua 卫星的中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 具有较高的时间分辨率,一天内可以覆盖全球两次(部分赤道低纬度地区除外).MOD09 数据是 MODIS (Terra) 的地表反射率产品,包含 MODIS 的 1~7 共 7 个波段.MOD09A1 数据是八天合成的 MOD09 数据,降低了部分有云等质量不好数据的影响而且将全球范围划分为 460 个规则的网格分块,便于生产大范围产品并进行时序产品叠加分析,因而在业务化的大范围水质监测中具有重要优势.因此本文选择 MOD09A1 数据作为全国重点湖库营养状态业务化监测的遥感数据源,利用覆盖全国重点湖库的 18 块 MOD09A1 产品,网格分块行列号包括:h23v04、h23v05、h24v04、

h24v05、h25v03、h25v04、h25v05、h25v06、h26v04、h26v05、h26v06、h27v04、h27v05、h27v06、h28v05、h28v06、h28v07、h29v06.

1.2 研究区

MOD09A1 数据的空间分辨率是 500 m,为了降低岸边混合像元或临近像元的影响,本文主要研究面积大于 5 km²的湖库水体,也就是水体的联通像元数量大于 20 个.

在全国面积大于 5 km²的湖库中选择了 144 个主要湖库,包括 111 个湖泊和 33 个水库. 111 个湖泊中包括洱海等 5 个饮用水源地,也包括巢湖等较浑浊和抚仙湖等较清洁的 106 个非饮用水源地湖泊;33 个水库包括密云水库等 19 个饮用水源地,以及于桥水库等较浑浊和新安江水库等较清洁的 14 个非饮用水源地水库. 这些湖库的空间分布覆盖了中国的五大湖区,其中 20 个位于蒙新高原湖区,34 个位于青藏高原湖区,7 个位于云贵高原湖区,66 个位于东部平原湖区,17 个位于东北山地与平原湖区.

2 研究方法

本文首先对 MOD09A1 地表反射率产品进行离水反射率校正,然后提取湖库水体分布范围,进而计算水色指数(*FUI*),并利用 *FUI* 生产水体营养状态等级,最后分析全国重点湖库营养状态的空间分布规律.

2.1 离水反射率校正

MOD09A1 是地表反射率产品,已对其 7 个波段进行了气溶胶校正、卷积云校正和瑞利散射校正^[18],但是没有对天空光及太阳耀斑的水面反射进行校正. 本文采用基于近红外波段(NIR)和短波红外波段(SWIR)的暗目标法进行校正^[19],将 MOD09A1 的地表反射率($R(\lambda)$)减去这个像元的近红外和短波红外的最小值,再除以 π ,转换成离水反射率($R_{rs}(\lambda)$).

2.2 湖库水体提取

在对 MOD09A1 数据进行离水反射率校正的基础上,还要对湖库的水体边界进行提取. 水体在短波红外波段具有强吸收作用,因而水体像元在短波红外波段反射率很低,相反陆地像元的反射率较高^[20],因此本文采用基于短波红外波段灰度直方图的双峰谷值阈值自动化确定的方法提取水体边界^[21]. 为了降低接近陆地区域混合像元和光学浅水的影响,将得到的水体部分向内腐蚀一个像元. 最后,去除联通像元数小于 20 的水体,只保留面积在 5 km²以上的水体.

2.3 水色指数计算

利用 Wang 等^[22]提出的从太湖 MOD09 数据产品中提取 *FUI* 指数的方法对全国主要湖库的 *FUI* 指数进行求解. *FUI* 是一种比色表,将水体颜色从深蓝色到黄褐色划分为 21 个级别. 利用 MODIS 的第 1(红)、3(蓝)、4(绿)波段计算 CIE 颜色空间中的三刺激值 $[x]$ 、 $[y]$ 、 $[z]$ ^[23],并进一步计算 CIE 颜色空间色度图中找到颜色对应的坐标 (x, y) ,进而找到色度角 α ,在 *FUI* 指数查找表中找到与色度角最接近的色度值,此值对应的 *FUI* 值就是水体的 *FUI* 值^[22].

2.4 基于 *FUI* 的营养状态等级评价

采用基于 *FUI* 和红波段阈值法对湖库营养状态进行评价^[22]. 贫营养水体一般比较清洁,藻类浓度比较低,水体一般呈现蓝色;富营养水体较为浑浊,藻类浓度较高,水体颜色多为黄绿色;中营养水体的藻类浓度以及水体颜色一般介于贫营养和富营养之间. *FUI* 可以表示水体颜色,因此可以使用 *FUI* 的阈值分割来评价水体的营养状态;当 $FUI < 7$ 时,水体为贫营养;当 $7 \leq FUI < 10$ 时,水体为中营养;当 $FUI \geq 10$ 时,水体为富营养. 但是,也有一些中营养水体的 $FUI \geq 10$,使用上述分割模型会被误判为富营养水体. 通过分析发现这些误判水体的红波段离水反射率($R_{rs}(645)$)一般较小,因此增加一个阈值分割限制条件进行二次限定:当 $R_{rs}(645) < 0.00625$ 时,即使 $FUI \geq 10$,水体仍然是中营养^[22].

2.5 精度评价

可以利用与 MODIS 卫星同步测量的水面实测数据计算水体营养状态等级,对 MODIS 监测结果进行精度评价. 于 2018 到 2019 年在太湖和于桥水库分别获取了 12 个和 46 个采样点的叶绿素 *a* 浓度实测数据,利用这些叶绿素 *a* 浓度数据可以计算综合营养状态指数(*TLI*)^[2]. 由于这些点大部分属于富营养,为了增加贫营养水体的检验数据,从文献[24]中获取了 2014—2016 年青藏高原纳木错、塔若错、色林错、多尔索洞错、

赤布张错 5 个湖泊的透明度数据,利用营养状态指数计算公式: $TLI(Chl.a) = 10(2.5 + 1.086 \ln Chl.a)$ 、 $TLI(TP) = 10(9.436 + 1.624 \ln TP)$ 、 $TLI(TN) = 10(5.453 + 1.694 \ln TN)$ 、 $TLI(SD) = 10(5.118 - 1.94 \ln SD)$ 、 $TLI(COD) = 10(0.109 + 2.661 \ln COD)$ (式中,叶绿素 $a(Chl.a)$ 单位为 mg/m^3 ;透明度(SD)单位为 m;其他指标单位均为 mg/L)可以计算综合营养状态指数,通过 TLI 数值大小和分级标准对湖库水体进行营养状态分级^[2]. 利用这 63 个采样点实测数据计算得到的营养状态等级与同步 MODIS 卫星遥感监测的营养状态等级进行对比,计算得到基于 MODIS 监测营养状态等级的总体精度为 88.9%. 其中,贫营养的判别精度比较高,少量误判主要发生在部分富营养和中营养之间. 总体上来说,营养状态评价的精度基本上可以满足大范围应用研究需求. Guan 等^[25]在 2018 年实地测量的叶绿素 a 浓度数据中有 26 个湖泊与本文研究区域一致,采用综合营养状态指数法计算 26 个湖泊的营养状态,有 25 个湖泊与本文研究结果相同,MODIS 的监测精度达到 96.0%,邹伟等^[26]在 2018 年 7—8 月份采集了长江中下游地区 19 个湖库水体的叶绿素 a 浓度,其中与本文研究区重叠的湖库共有 13 个,基于叶绿素 a 浓度计算的营养状态等级为 12 个湖库为富营养化,1 个湖库为中营养. 这 13 个湖库中的 12 个的营养状态调查结果与本文基于 MODIS 监测的结果一致,精度为 92.3%. Song 等^[27]对 2014—2018 年夏季全国面积大于 80000 m^2 的湖库进行大范围高精度水体透明度反演,利用综合营养状态指数计算得到东北山地与平原湖区和东部平原湖区水体较多呈现富营养状态,对比图 1,与本文研究的结果一致.

2.6 全国重点湖库营养状态产品生产及空间分析

基于上述技术流程,编写 IDL 程序,实现基于 MOD09A1 数据的全国重点湖库营养状态产品自动化批量生产. 由于水色指数的营养状态评价方法主要是基于藻类对水体颜色的影响,因此选择藻类生长情况最好的夏季来分析全国重点湖库水体营养状态的空间分布情况,进而分析其主要影响因素.

3 结果与讨论

3.1 全国重点湖库营养状态空间分布格局

基于 2018 年 6—8 月之间的 MOD09A1 数据,生产了全国 144 个重点湖库的营养状态夏季均值产品. 为了便于统计分析,将每个湖库所有像元的营养状态求一个均值,得到每个湖库平均的营养状态等级,其中贫营养、中营养、富营养的湖库数量分别为 23、34、87 个,144 个重点湖库营养状态空间分布如图 1 所示,可以看出我国湖库水体的营养状态分布不均匀,东部湖库水体以中到富营养状态为主,尤其是长江中下游和东北山地与平原湖区湖库水体富营养化比例非常高,西部湖库水体以贫到中营养状态为主,尤其是青藏高原湖区贫营养比例很高. 不同水体类型营养状态等级比例如表 1,其中湖泊型饮用水源地的富营养化比例要高于水库型饮用水源地.

表 1 基于 MODIS 监测的 2018 年夏季全国重点湖库中不同类型水体的营养状态等级比例
Tab.1 Proportion of different trophic status of national key lakes and reservoirs in summer of 2018 monitored by MODIS data

水体类型	贫营养	中营养	富营养
湖泊(饮用水源地)	17%	0	83%
湖泊(非饮用水源地)	21%	19%	60%
水库(饮用水源地)	0	53%	47%
水库(非饮用水源地)	0	21%	79%

五大湖区中各营养状态等级所占的比例如图 2 所示,东北山地与平原湖区水体富营养状态比例最大,东部平原湖区次之,2 个湖区均无贫营养状态水体. 中营养状态水体在蒙新高原湖区数量最多. 青藏高原湖区贫营养状态水体数量最多,其次是云贵高原湖区. 在五大湖区中各选 1 个典型湖泊,营养状态分布如图 3 所示. 其中,兴凯湖(东北山地与平原湖区,中俄跨界湖)、巢湖(东部平原湖区)水体富营养化程度较高;博斯腾湖(蒙新高原湖区)整体上为中营养状态;色林错(青藏高原湖区)、抚仙湖(云贵高原湖区)整体上为贫营养,水质情况较好.

自然环境是影响水体营养状态的重要因素. 青藏高原湖区的海拔较高,多在 3500 m 以上,气温较低^[28-29],水中藻类进行光合作用的速率受低水温限制^[30],藻类数量一般较少,水体多为贫营养状态^[31]. 云贵高原湖区深水湖和浅水湖交错分布,该湖区水体营养状态差异较大^[32]. 东北地区的中部为平原,周围三面环山,位于平原地区的湖泊面积较小,且湖水较浅^[33],降水多集中在夏季,会带入营养盐等物质,造成富营养

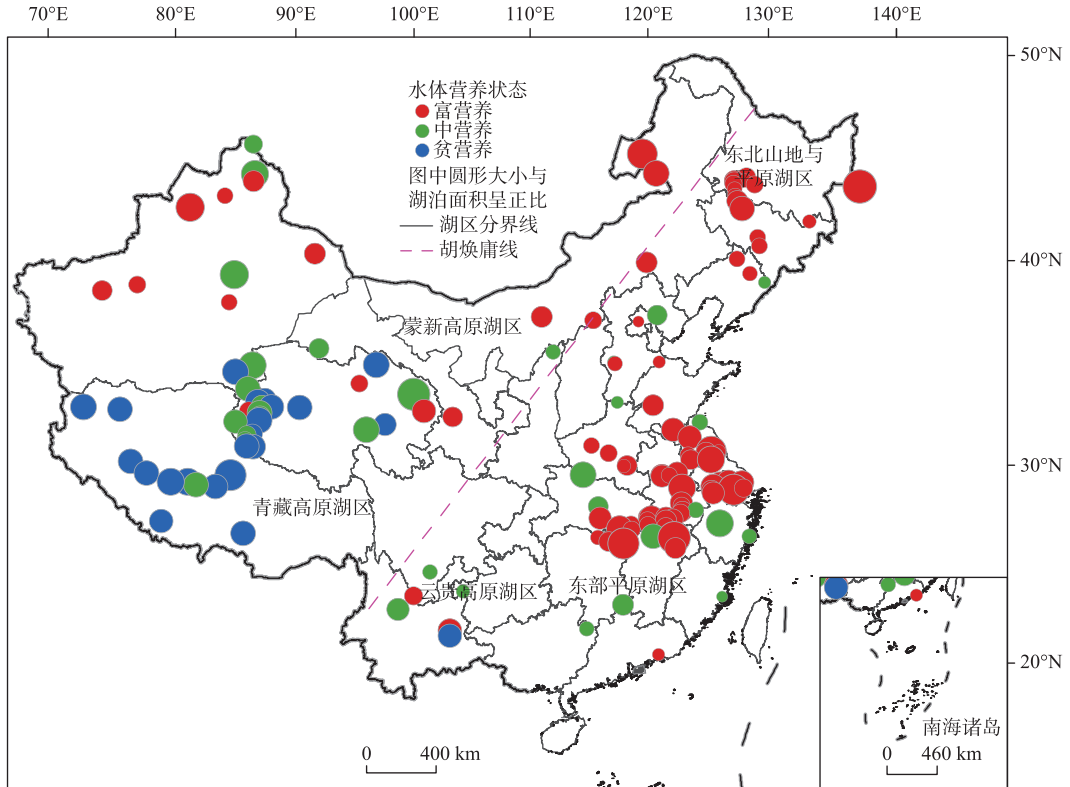


图 1 基于 MODIS 监测的 2018 年夏季全国重点湖库水体营养状态等级分布

Fig.1 Distribution of trophic status of national key lakes and reservoirs in summer of 2018 monitored by MODIS data

状态水体数量较多. 东部平原湖区人口密度高, 面源污染带来大量的营养盐; 同时长江中下游地区主要湖泊的水深多在 10 m 以下^[34-35], 湖泊底泥在环境条件适宜时与湖水进行交互, 也成为营养盐的主要来源之一^[36]. 蒙新高原湖区降水少, 蒸发强, 该湖区草场退化且土地沙漠化, 造成地表径流减少, 再加上水土流失导致入湖水体中营养盐浓度上升, 水体营养状态较高^[37-38].

人类活动也是影响水体营养状态的重要因素, 湖泊的富营养化水平与社会经济发展进程密切相关^[39]. 东部平原湖区和东北山地湖区人口众多, 加上经济发展速度快, 工业点源污染以及农业非点源污染都会为周边湖库带来营养物质^[40-41], 导致湖库水体的营养状态整体偏高. 青藏高原湖区海拔较高, 自然环境较恶劣, 人口密度小, 城市化进程缓慢, 水体受人为干扰因素较小, 水体多为贫营养状态.

3.2 营养状态等级监测结果与环境公报的对比

基于 *FUI* 的营养状态评价方法是利用影响水体颜色的叶绿素 *a* 和透明度信息, 因此应该使用藻类生长最充分的夏季, 才能对比出来不同水体的差异. 而且很多北方和青藏高原湖库在冬季结冰, 也无法使用. 综上所述, 基于 *FUI* 的营养状态评价方法主要适用于夏季. 《2018 中国生态环境状态公报》监测了 111 个湖库 2018 年平均的营养状态, 其中有 40 个湖库与本文研究区重叠. 经过对比发现, 其中, 有 24 个湖库 (占 60%) 的营养状态与本文监测结果一致, 另外 16 个湖库 (占 40%) 的营养状态不一致, 主要是公报评价为中营养, 而本文评价为富营养. 公报方法与本文方法不同, 主要体现在: (1) 公报是基于叶绿素 *a*、透明度、总氮、总磷、化学需氧量 5 个参数计算综合营养状态指数, 而本文是基于水体颜色信息评价水体营养状态, 其中主要是利用了对水体颜色影响较大的叶绿素 *a* 和透明度信息; (2) 公报一般是基于每月一次测量的少数几个采样点的数据的评价结果, 而本文是基于时间序列的全湖遥感图像平均的结果. 本文的营养状态评价方法可

以作为公报的补充,一方面可以用于监测公报没有监测的湖库,另一方面对于公报监测的湖库,还可以补充其空间分布和时间变化信息.

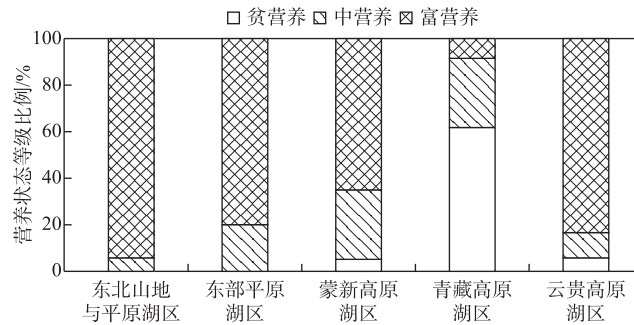


图 2 基于 MODIS 监测的 2018 年夏季全国五大湖区湖库营养状态等级比例

Fig.2 The proportion of trophic status of national key lakes and reservoirs in five major lake regions in summer of 2018 monitored by MODIS data

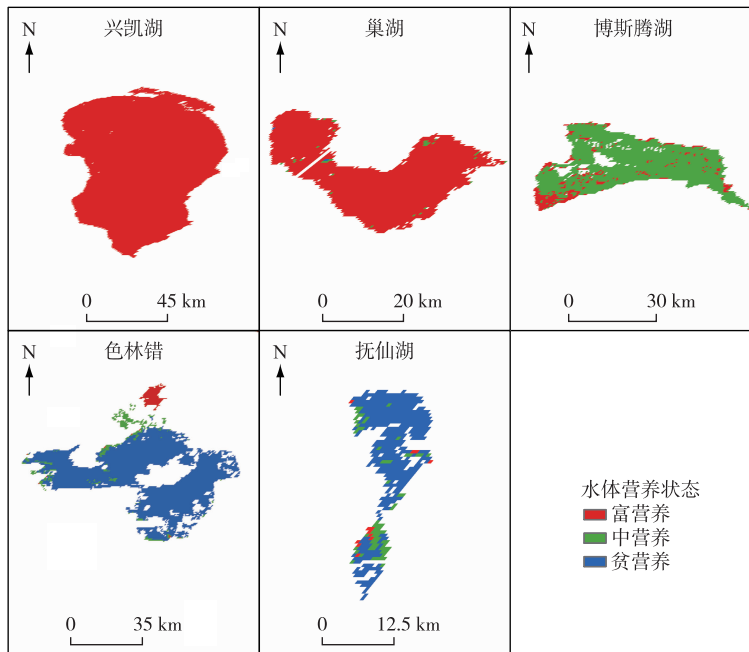


图 3 基于 MODIS 监测的 2018 年夏季全国五大湖区典型湖泊水体营养状态

Fig.3 Trophic status of five typical lakes in summer of 2018 monitored by MODIS data

4 结论

本文以 MODIS 八天合成的地表反射率产品 MOD09A1 为遥感数据源,利用基于水色指数的营养状态分级方法,监测全国 144 个重点湖库营养状态等级. 利用 63 个水面实测数据计算得到的营养状态等级与同步 MODIS 卫星遥感监测结果进行对比,得到 MODIS 的监测精度为 88.9%,精度基本上可以满足大范围应用研究需求.

利用经过检验的方法,基于 MODIS 数据生产了 2018 年夏季全国 144 个重点湖库的营养状态等级,分析了全国重点湖库营养状态的空间分布情况(图 2). 贫营养、中营养、富营养的湖库比例分别为 16%、24%、

60%,富营养化的比例很高.营养状态空间上分布不均匀,东部地区湖库(主要是东部平原和东北山地与平原湖区)多为富营养状态,东北山地与平原湖区的富营养化湖库比例最多达到 94%,东部平原湖区的富营养化湖库比例达到 80%.西部湖区湖库(特别是青藏高原湖区)多为贫营养状态,青藏高原湖区贫营养湖库比例达到 62%,富营养化水体仅占 9%.海拔和地表温度等自然因素与工业点源和农业面源污染等人为因素是湖库营养状态的重要影响因素.

5 参考文献

- [1] Beeton AM, Edmondson WT. The eutrophication problem. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1972, **29** (6): 673-682. DOI: 10.1139/f72-113.
- [2] Wang MC, Liu XQ, Zhang JH. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication. *Environmental Monitoring in China*, 2002, **18**(5): 47-49. [王明翠,刘雪芹,张建辉.湖泊富营养化评价方法及分级标准.中国环境监测,2002,**18**(5):47-49.]
- [3] Shi K, Zhang YL, Zhou YQ *et al.* Long-term MODIS observations of cyanobacterial dynamics in Lake Taihu: Responses to nutrient enrichment and meteorological factors. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 40326. DOI: 10.1038/srep40326.
- [4] Carlson RE. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 1977, **22**(2): 361-369. DOI: 10.4319/lo.1977.22.2.0361.
- [5] Kondratyev KY, Pozdnyakov DV, Pettersson LH. Water quality remote sensing in the visible spectrum. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, **19**(5): 957-979. DOI: 10.1080/014311698215810.
- [6] Jin XC, Tu QY eds. Investigation of lake eutrophication (second edition). Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 239-259. [金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范(第二版).北京:中国环境科学出版社,1990:239-259.]
- [7] Brivio PA, Giardino C, Zilioli E. Determination of chlorophyll concentration changes in Lake Garda using an image-based radiative transfer code for Landsat TM images. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, **22**(2/3): 487-502. DOI: 10.1080/014311601450059.
- [8] Carpenter DJ, Carpenter SM. Modeling inland water quality using Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 1983, **13** (4): 345-352. DOI: 10.1016/0034-4257(83)90035-4.
- [9] Thiemann S, Kaufmann H. Determination of chlorophyll content and trophic state of lakes using field spectrometer and IRS-1C satellite data in the Mecklenburg lake district, Germany. *Remote Sensing of Environment*, 2000, **73**(2): 227-235. DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00097-3.
- [10] Matthews MW. Eutrophication and cyanobacterial blooms in South African inland waters: 10 years of MERIS observations. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **155**: 161-177. DOI: 10.1016/j.rse.2014.08.010.
- [11] Gilerson AA, Gitelson AA, Zhou J *et al.* Algorithms for remote estimation of chlorophyll-a in coastal and inland waters using red and near infrared bands. *Optics Express*, 2010, **18**(23): 24109. DOI: 10.1364/oe.18.024109.
- [12] Zhu L, Li YM, Zhao SH *et al.* Remote sensing monitoring of Taihu Lake water quality by using GF-1 satellite WFV data. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2015, **27**(1): 113-120. DOI: 10.6046/gtzyyg.2015.01.18. [朱利,李云梅,赵少华等.基于GF-1号卫星WFV数据的太湖水质遥感监测.国土资源遥感,2015,**27**(1):113-120.]
- [13] Le CF, Li YM, Zha Y *et al.* A four-band semi-analytical model for estimating chlorophyll a in highly turbid lakes: The case of Taihu Lake, China. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**(6): 1175-1182. DOI: 10.1016/j.rse.2009.02.005.
- [14] Ren JL, Zheng ZB, Li YM *et al.* Remote observation of water clarity patterns in Three Gorges Reservoir and Dongting Lake of China and their probable linkage to the Three Gorges Dam based on Landsat 8 imagery. *Science of the Total Environment*, 2018, **625**: 1554-1566. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.036.
- [15] Sun DY, Zhou XY, Li YM *et al.* Hyperspectral remote sensing of chlorophyll a concentrations in the lake Taihu, based on water optical classification. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 3002-3009. DOI: 10.13227/j.hjlx.2013.08.040. [孙德勇,周晓宇,李云梅等.基于光学分类的太湖水体叶绿素a浓度高光谱遥感.环境科学,2013,**34**(8):3002-3009.]
- [16] Chen XH, Li XP, Cheng X *et al.* Eutrophication evolution of typical small and medium-sized lakes in Lake Taihu basin (1991-2010). *J Lake Sci*, 2013, **25**(6): 846-853. DOI: 10.18307/2013.0608. [陈小华,李小平,程曦等.太湖流域

- 典型中小型湖泊富营养化演变分析(1991—2010年). 湖泊科学, 2013, **25**(6): 846-853.]
- [17] Wang SL, Li JS, Zhang B *et al.* Trophic state assessment of global inland waters using a MODIS-derived Forel-Ule index. *Remote Sensing of Environment*, 2018, **217**: 444-460. DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.026.
- [18] Ahn JH, Park YJ, Kim W *et al.* Simple aerosol correction technique based on the spectral relationships of the aerosol multiple-scattering reflectances for atmospheric correction over the oceans. *Optics Express*, 2016, **24**(26): 29659-29669. DOI: 10.1364/OE.24.029659.
- [19] Wang SL, Li JS, Zhang B *et al.* A simple correction method for the MODIS surface reflectance product over typical inland waters in China. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, **37**(24): 6076-6096. DOI: 10.1080/01431161.2016.1256508.
- [20] Mishra K, Prasad PRC. Automatic extraction of water bodies from landsat imagery using perceptron model. *Journal of Computational Environmental Sciences*, 2015, **2015**: 1-9. DOI: 10.1155/2015/903465.
- [21] Zhang FF, Li JS, Zhang B *et al.* A simple automated dynamic threshold extraction method for the classification of large water bodies from Landsat-8 OLI water index images. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, **39**(11): 3429-3451. DOI: 10.1080/01431161.2018.1444292.
- [22] Wang SL, Li JS, Shen Q *et al.* MODIS-based radiometric color extraction and classification of inland water with the forel-ule scale: A case study of Lake Taihu. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, **8**(2): 907-918. DOI: 10.1109/jstars.2014.2360564.
- [23] CIE. Commission Internationale de l'Eclairage Proceedings 1931. Cambridge: Cambridge University Press, 1932: 19-29.
- [24] Liu C, Zhu LP, Wang JB *et al.* Remote sensing-based estimation of lake water clarity on the Tibetan Plateau. *Progress in Geography*, 2017, **36**(5): 597-609. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.05.007. [刘翀, 朱立平, 王君波等. 基于MODIS的青藏高原湖泊透明度遥感反演. 地理科学进展, 2017, **36**(5): 597-609.]
- [25] Guan Q, Feng L, Hou XJ *et al.* Eutrophication changes in fifty large lakes on the Yangtze Plain of China derived from MERIS and OLCI observations. *Remote Sensing of Environment*, 2020, **246**: 111890. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111890.
- [26] Zou W, Zhu GW, Cai YJ *et al.* The limitations of comprehensive trophic level index (TLI) in the eutrophication assessment of lakes along the middle and lower reaches of the Yangtze River during summer season and recommendation for its improvement. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 36-47. DOI: 10.18307/2020.0104. [邹伟, 朱广伟, 蔡永久等. 综合营养状态指数(TLI)在夏季长江中下游湖库评价中的局限及改进意见. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 36-47.]
- [27] Song KS, Liu G, Wang Q *et al.* Quantification of lake clarity in China using Landsat OLI imagery data. *Remote Sensing of Environment*, 2020, **243**: 111800. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111800.
- [28] Zhu LP, Qiao BJ, Yang RM *et al.* New recognition of water storages and physicochemical property of the lakes on the Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Nature*, 2017, **39**(3): 166-172. [朱立平, 乔宝晋, 杨瑞敏等. 青藏高原湖泊水量与水质变化的新认知. 自然杂志, 2017, **39**(3): 166-172.]
- [29] Yan LX, Sun MP, Yao XJ *et al.* Lake water in the Tibet Plateau: Quality change and current status evaluation. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(3): 900-910. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2017.0390. [闫露霞, 孙美平, 姚晓军等. 青藏高原湖泊水质变化及现状评价. 环境科学学报, 2018, **38**(3): 900-910.]
- [30] Hu ZX. Study on biological diversity in different habitat type lakes and ecological classification of lakes [Dissertation]. Nanjing: Nanjing University, 2014: 80-86. [胡志新. 不同生态类型湖泊生物多样性和湖泊分类方法研究[学位论文]. 南京: 南京大学, 2014: 80-86.]
- [31] Li N, Li JQ, Li GW *et al.* The eutrophication and its regional heterogeneity in typical lake of china. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, **42**(4): 194-204. DOI: 10.7541/2018.105. [李娜, 黎佳茜, 李国文等. 中国典型湖泊富营养化现状与区域性差异分析. 水生生物学报, 2017, **42**(4): 194-204.]
- [32] Chen Q, Huo SL, Xi BD *et al.* Study on total phosphorus and chlorophyll-a reference conditions in Yungui plateau ecoregion lakes and reservoirs. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2012, **2**(3): 184-192. [陈奇, 霍守亮, 席北斗等. 云贵高原湖区湖库总磷和叶绿素a浓度参照状态研究. 环境工程技术学报, 2012, **2**(3): 184-192.]
- [33] Li Q. Phytoplankton diversity in typical lakes and reservoirs in northeast region [Dissertation]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013. [李强. 东北典型湖库浮游植物多样性研究[学位论文]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.]
- [34] Li J. The biogeochemical cycles of nutrients of shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtse River, China [Dissertation]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2005: 2-30. [李军. 长江中下游地区浅

- 水湖泊生源要素的生物地球化学循环[学位论文]. 贵阳:中国科学院地球化学研究所, 2005: 2-30.]
- [35] Qin BQ, Gao G, Zhu GW *et al.* Lake eutrophication and its ecosystem response. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(10): 855-864. DOI: 10.1007/s11434-012-5560-x. [秦伯强, 高光, 朱广伟等. 湖泊富营养化及其生态系统响应. 科学通报, 2013, **58**(10): 855-864.]
- [36] Kong FX, Gao G. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(3): 589-595. [孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考. 生态学报, 2005, **25**(3): 589-595.]
- [37] Zhang YL, Xu QJ, Xi BD *et al.* Major problems and control measures of water ecological environment in Inner Mongolia Xinjiang Plateau. *J Lake Sci*, 2011, **23**(6): 828-836. DOI: 10.18307/2011.0602. [张亚丽, 许秋瑾, 席北斗等. 中国蒙新高原湖区水环境主要问题及控制对策. 湖泊科学, 2011, **23**(6): 828-836.]
- [38] Xi BD, Zhang YL, Xu QJ. Possibility of total dissolved solid as one of nutrient baselines in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau. *Environmental Science*, 2012, **33**(10): 10-15. [席北斗, 张亚丽, 许秋瑾. 矿化度作为蒙新高原湖泊营养物质基准影响指标的可行性. 环境科学, 2012, **33**(10): 10-15.]
- [39] Zhao YH, Deng XZ, Zhan JY *et al.* Progress on preventing and controlling strategies of lake eutrophication in China. *Environmental Science & Technology*, 2010, **33**(3): 92-98. [赵永宏, 邓祥征, 战金艳等. 我国湖泊富营养化防治与控制策略研究进展. 环境科学与技术, 2010, **33**(3): 92-98.]
- [40] Le C, Zha Y, Li Y *et al.* Eutrophication of lake waters in China: Cost, causes, and control. *Environmental Management*, 2010, **45**(4): 662-668. DOI: 10.1007/s00267-010-9440-3.
- [41] Chen XF, Chuai XM, Yang LY. Status quo, historical evolution and causes of eutrophication in lakes in typical lake regions of China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, **30**(4): 438-443. [陈小锋, 揣小明, 杨柳燕. 中国典型湖区湖泊富营养化现状、历史演变趋势及成因分析. 生态与农村环境学报, 2014, **30**(4): 438-443.]