

引用格式:周玲,李云梅,赵焕,等.滇池湖滨带植被时空变化及其对滇池总磷浓度的影响[J].地球信息科学学报,2020,22(10):1946-1958. [Zhou L, Li Y M, Zhao H, et al. The spatiotemporal changes of vegetation in lakeshore of Dianchi Lake and its impact on total phosphorus concentration in Dianchi Lake[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(10):1946-1958.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.200205

滇池湖滨带植被时空变化及其对滇池总磷浓度的影响

周玲¹,李云梅^{1*},赵焕²,房晟忠³,颜翔³,吕恒¹

1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室,南京 210023; 2. 生态环境部卫星环境应用中心,北京 100094;
3. 昆明市环境监测中心,昆明 650228

The Spatiotemporal Changes of Vegetation in Lakeshore of Dianchi Lake and Its Impact on Total Phosphorus Concentration in Dianchi Lake

ZHOU Ling¹, LI Yunmei^{1*}, ZHAO Huan², FANG Shengzhong³, YAN Xiang³, LV Heng¹

1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;
2. Environment Satellite Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094, China;
3. Kunming Environmental Monitoring Center, Kunming 650228, China

Abstract: Dianchi Lake, the largest plateau freshwater lake in China, is an important part of the ecological security pattern in the upper reaches of the Yangtze River. In order to restore the ecology of Dianchi Lake and its lakeside, farmland along the lake has been converted to grasslands and forests on a large scale since 2008. The influence of vegetation in the lakeside on the total phosphorus concentration in Dianchi Lake is a long-term process, and it needs to be evaluated through long-term continuous monitoring data based on remote sensing. In this paper, Dianchi Lake and its lakeshore are taken as research areas. From the perspectives of spatial distribution and seasonal differences, combined with the annual change of total phosphorus load of the rivers flowing into the lake, the effect of the spatial and temporal changes of the vegetation in the lakeside on the total phosphorus concentration in Dianchi Lake from 2005 to 2018 was studied. The main conclusions in this paper are as follows: (1) In terms of the spatial variation, the multi-year average of total phosphorus concentration in the Dianchi Lake gradually decreases from the edge of the lake to the center, and it is higher in the north and south. From the aspect of temporal changes, the annual average of total phosphorus concentration in the Dianchi Lake shows a significant downward trend from 2005 to 2018. (2) The significant reduction of total phosphorus concentration in Dianchi Lake from 2011 to 2018 is closely related to vegetation in the lakeside, and the growth of vegetation has a certain degree of interception on the input of total phosphorus. (3) The results of vegetation extraction show that the area of herbs and woody plants in the lakeside of Dianchi Lake increased significantly from 2005 to 2018, and the period with the most dramatic increase in both was from 2010 to 2011. (4) Compared with the normal water period and the high water period, the NDVI of herb and woody plants has the strongest negative correlation with the total phosphorus concentration in the strongly affected area during the low water period, and the negative correlation between the NDVI of woody plants and the concentration of total

收稿日期:2020-04-27;修回日期:2020-08-16.

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0503902)。[**Foundation item:** National Key Research and Development Program of China, No.2017YFB0503902.]

作者简介:周玲(1993—),女,湖北黄冈人,硕士生,主要从事水环境遥感应用研究。E-mail: zhouzhoulingya@163.com

*通讯作者:李云梅(1966—),女,云南澄江人,教授,博导,主要从事水环境遥感监测。E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn

phosphorus in the strongly affected area is stronger than that of herbs. This paper studied the response relationship between the total phosphorus concentration in Dianchi Lake and vegetation on its lakeshore based on long-term remote sensing data, and provided scientific basis for the ecological restoration of Dianchi Lake.

Key words: Dianchi Lake; total phosphorus concentration; lakeside; vegetation; long time series; remote sensing monitoring; temporal and spatial changes; response

***Corresponding author:** LI Yunmei, E-mail: liyunmei@nynu.edu.cn

摘要:滇池是中国最大的高原淡水湖泊,是长江上游生态安全格局的重要组成部分。自2008年起政府在滇池湖滨带大规模退耕还草还林,以恢复滇池及其湖滨生态。湖滨带植被对滇池总磷浓度的影响是一个长期过程,需要通过遥感长时间连续监测的数据来评价。本文以滇池和滇池湖滨带为研究区,从空间分布、季节差异2个角度,结合入湖河流总磷负荷,研究2005—2018年滇池湖滨植被时空变化对滇池总磷浓度的影响。主要结论如下:①滇池总磷浓度由湖缘向湖心逐渐降低,并且北部和南部偏高;2005—2018年,滇池总磷浓度呈现显著下降趋势;②2011—2018年滇池总磷浓度显著减小与湖滨带植被的拦截作用密切相关;③2005—2018年滇池湖滨带草本和木本植物面积都显著增加,增加最剧烈的年份是2010—2011年;④相比于平水期和丰水期,枯水期NDVI与强影响区总磷浓度负相关关系最强,且木本植物NDVI与强影响区总磷浓度负相关性强于草本。本文利用长时间序列数据评价滇池总磷浓度与其湖滨植被的响应关系,可为滇池湖泊生态恢复提供科学依据。

关键词:滇池;总磷浓度;湖滨带;植被;长时间序列;遥感监测;时空变化;响应

1 引言

20世纪70—90年代,由于人类不合理的开发利用,滇池湖滨湿地严重退化,湖滨带逐渐以耕地为主导,工业、农业的发展导致滇池富营养化不断加剧,氮磷污染严重^[1],滇池污染治理问题受到了政府的高度重视。2003年5月,云南省委提出了以滇池为中心,实施“一湖四环”建设,在环湖公路内侧建设湖滨湿地,以拦截外源污染物进入滇池^[2]。自2008年以来,滇池湖滨带大规模退耕还林还草,以恢复滇池湖滨生态系统功能,进而改善滇池水生态环境^[3]。经过十余年滇池湖滨人工湿地建设,环湖带植被面积显著增加,植物种类也逐渐演变为以中山杉和芦苇为主^[3],然而,湖滨植被的种植,对滇池磷输入的影响,以及对滇池水生态环境的作用如何,需要通过有一定时间尺度的监测结果进行评价。

目前,国内外已有许多学者从化学、物理、生物学等角度研究湿地植被对磷的去除机理^[4-6]。研究表明,人工湿地中植被对总磷浓度有显著影响,具体表现为自身吸收利用、吸附、为微生物分解创造适宜环境条件、增加水体在湿地的停留时间等。磷最终能否从湿地系统中去除,依赖于湿地植物的收割和饱和基质的更换。上述成果为研究湿地对总磷的影响提供了理论基础,但其研究局限于对局部小范围进行短期监测,而遥感技术获得的监测信息具有空间连续性,这有助于获取湖滨带植被空间信息、滇池总磷浓度空间分布规

律,这是传统地面监测无法做到的。此外,长时间序列的遥感影像数据也有利于动态监测湖滨湿地和滇池总磷的演变迁移过程,有利于对二者相互作用关系的深入挖掘。

遥感对总磷浓度的监测主要采用直接法和间接法建立总磷浓度估算模型,其中,直接法即直接找到与总磷浓度相关性高的波段或波段组合,将总磷浓度与该敏感波段或波段组合进行回归,建立总磷浓度遥感估算模型^[7-9]。间接法则是找到与总磷浓度相关性高的其他光学特性显著的水质参数(如叶绿素a浓度、悬浮物浓度、透明度、颗粒物吸收系数等),通过其他水质参数间接估算总磷浓度^[10-12]。直接法是基于总磷浓度与遥感反射率之间的纯统计学关系建立的,往往在局部研究区范围内精度较高,但是其适用范围较小;间接法考虑了总磷浓度与其他水质参数的关系,在直接法的基础上结合了水色光学机理,其适用性相对较广,但是由于间接法建立过程中的递推会导致误差传递累积,其精度可能受一定影响。因此,目前两种方法各有优劣,需要根据研究区的具体情况确定算法。基于遥感的湿地植被分类的常用算法主要有目视解译、计算机分类(阈值、监督与非监督分类、基于对象的分类等)、人工智能等方法。其中,NDVI阈值法是最为简单常用的有效方法^[13]。当前基于遥感手段对湿地植被与水体中磷的研究多以植被NDVI^[14]、植被景观格局^[14-16]为研究对象从不同季节^[16]、不同空间尺度^[14,16-17]研究湿地植被与水体磷浓度的关系。

本文以滇池和滇池湖滨带为研究区,基于2005—2018年Landsat TM和OLI影像,分析滇池湖滨带植被变化对滇池总磷浓度的影响,以期对滇池湖泊生态恢复与管理提供决策参考。

2 研究区概况、数据源与研究方法

2.1 研究区概况

滇池位于中国西南云贵高原中部的云南省昆明市(24°40'N—25°02'N, 102°36'E—102°47'E),由草海和外海组成,本文的研究区为滇池外海(以下非特别说明,均写为滇池)及其湖滨带。该湖是中国第六大淡水湖泊,海拔1886 m,面积达330 km²。滇池地处亚热带季风气候区,干湿分明,5—10月为雨季,期间降水量占总降水量的85%以上。滇池入湖河流众多,年均径流量约7.5万亿m³,包括盘龙江、柴河以及新宝象河、捞鱼河以及东大河等,海口河是唯一的出水河流。

“十一五”期间,昆明市在滇池湖滨带全面开展了“退田退塘、退人退房、还湖、还湿地、还林”的“四退三还”政策,该工程构建了一条平均宽度约200 m,面积达33.3 km²,植被覆盖度超过80%,以中山杉和芦苇为主的闭合生态带。

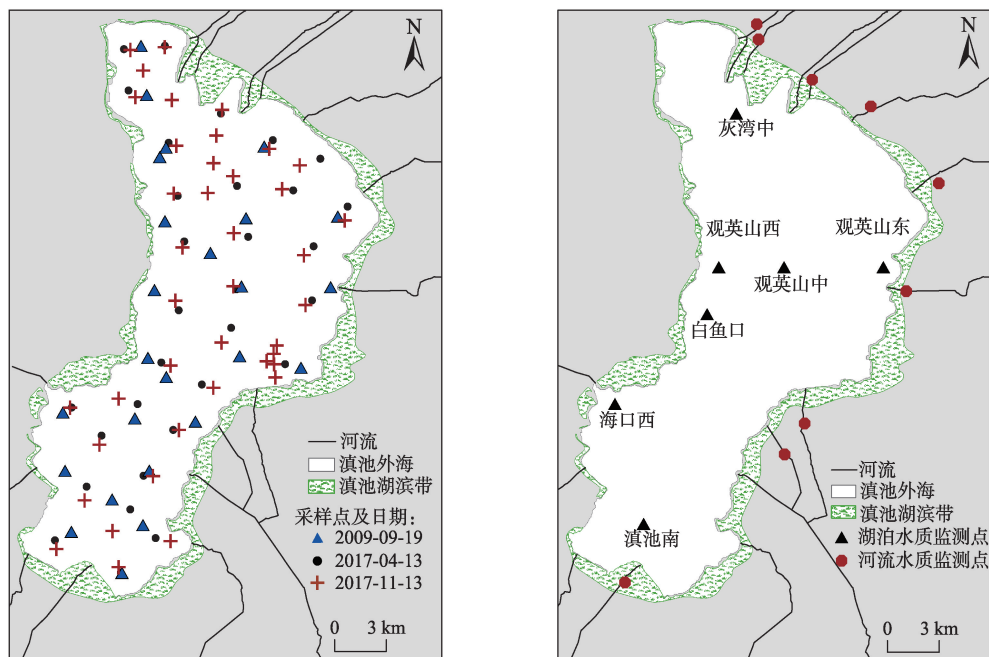
2.2 数据来源

本文数据分为地面实测数据和遥感影像数据。地面实测数据包括2种:①实验团队在2009年9月19—20日、2017年4月13—16日、2017年11月13—15日,在滇池共采集了89个表层水样数据和其对应的光谱数据(采样点分布如图1(a));②滇池湖区和入湖河流监测点总磷浓度数据,2009—2016年每月监测一次,数据来源于昆明市环境监测中心,湖区采样点与入湖河流监测点分布位置如图1(b)所示。总磷浓度的测量采用钼锑抗分光光度法。遥感影像数据来自陆地卫星Landsat的TM和OLI影像L1级产品数据,由于滇池地区多云多雨,6—10月以及12月很难获取无云覆盖的卫星影像,因此,本研究主要采用1—5月、11月卫星影像,经质量筛选,挑选了云量较少的60景TM和46景OLI影像用于研究。

2.3 研究方法

2.3.1 滇池总磷浓度的遥感估算

通过实测光谱和总磷浓度数据之间相关性分析,找出总磷浓度的敏感波段组合,建立基于TM和OLI传感器的滇池总磷浓度经验估算模型。采用平均相对百分比误差(Mean Relative Percentage Error,



(a) 滇池湖区采样点及湖滨带分布

(b) 滇池湖区和入湖河流监测点分布

图1 研究区及采样点分布

Fig. 1 Distribution of study area and sampling points

MRPE)、平均绝对百分比误差(Mean Absolute Percentage Error, MAPE)、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)这3个指标来定量评价所构建的滇池总磷浓度估算模型的精度。MRPE、MAPE、RMSE的计算公式分别如式(1)一式(3)所示。

$$MRPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - y_i}{x_i} \right) \quad (1)$$

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{x_i - y_i}{x_i} \right| \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}} \quad (3)$$

式中: x_i 、 y_i 分别是第 i 个样本实测和模型估算的总磷浓度; N 为验证样本总数。

对所获取的2005—2018年Landsat TM和OLI影像进行基于云指数(CI)的云掩膜处理^[18]、辐射定标、暗像元大气校正(DSF)^[19]等预处理,并将所构建的总磷估算模型应用于卫星影像,为了后续对总磷浓度的时空规律进行分析,对卫星影像估算的总磷浓度数据进行了TSSIM^[20](Time-Series-based Spatial Interpolation Method)时空插值、中值滤波,以确保数据的时空连续性,并基于NDVI大于-0.1掩膜去除水华区^[21],得到后续进行时空分析的总磷浓度影像。

对2005—2018年卫星影像估算的总磷浓度进行逐像元平均,获取每个栅格单元的总磷浓度均值,分析总磷浓度的空间分布特征。基于各年1—5月和10—12月总磷浓度,计算总磷浓度年均值,分析总磷浓度的年际变化趋势。

2.3.2 滇池湖滨带植被信息的提取

在提取滇池湖滨带各类地物纯像元的基础上,分析地物NDVI及其物候变化特征,确定植被提取的NDVI阈值^[13],进而提取湖滨带植被信息。

(1)各地物NDVI特征的获取

归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI),是近红外波段和红光波段的反射率之差与二者之和的比值,常被用于确定绿色植物覆盖程度的指标值^[22]。NDVI时序数据的预处理过程与滇池总磷浓度时序数据的预处理过程相同,经云掩膜、辐射定标、暗像元法DSF大气校正后计算NDVI,并对NDVI进行TSSIM时空插值。

根据滇池湖滨带土地覆盖的特点,将地物分为草本植物、木本植物、大棚、不透水表面、水体及裸土,其中木本植物又可细分为落叶木本植物和常绿

木本植物。提取2005—2018年湖滨带6类地物纯像元,进而分析各类地物NDVI一年内的变化特征。

(2)湖滨带植被提取流程

基于各类地物NDVI月变化特征差异,提取草本和木本植物,具体提取过程如图2所示。其中, R_{NIR} 、 R_B 、 R_G 、 R_R 、 R_{SWIR1} 、 R_{SWIR2} 分别表示近红外波段、蓝光波段、绿光波段、红光波段、短波红外1和短波红外2的地表反射率; $NDVI_n$ 表示像元第 n 月的NDVI。图2中的阈值是基于2005—2018年影像提取的各类地物纯像元在1、2、4、5、11月NDVI的箱型图而选取的。草本、木本植物提取过程分4步:

① 利用条件 $R_{NIR} > R_B$ 且 $R_{NIR} > R_G$ 且 $R_{NIR} > R_R$ 且 $R_{NIR} > R_{SWIR1}$ 且 $R_{NIR} > R_{SWIR2}$,判断像元光谱是否是植被光谱,若满足条件则进行下一步判断,否则判断为非植被像元。

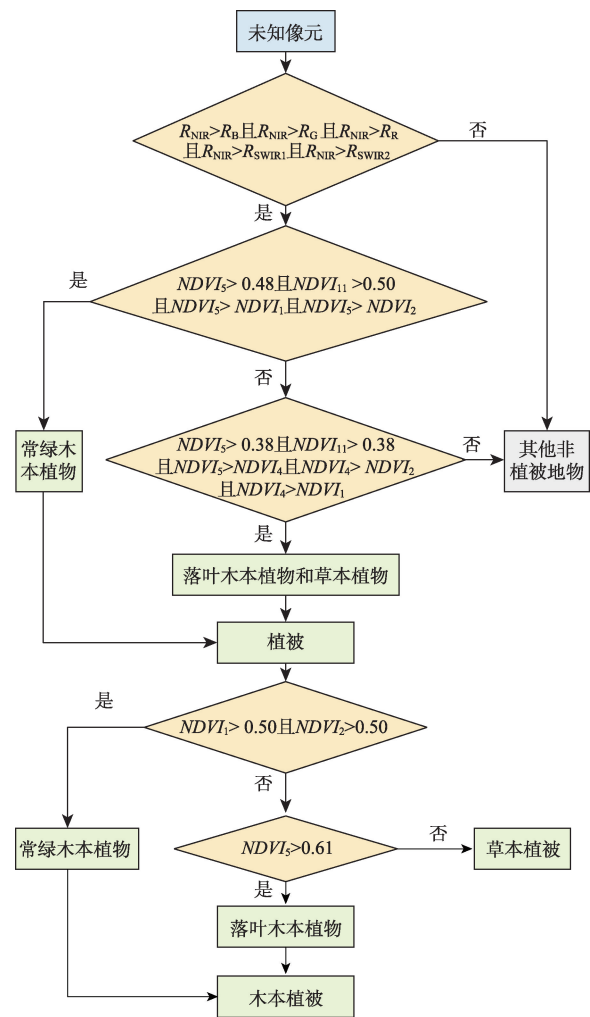


图2 滇池湖滨带植被提取流程

Fig. 2 Flowchart of vegetation extraction in lakeside of Dianchi Lake

② 满足 $NDVI_5 > 0.48$ 且 $NDVI_{11} > 0.50$ 且 $NDVI_5 > NDVI_1$ 且 $NDVI_5 > NDVI_2$ 的像元判断为常绿木本植物,这一步是由于常绿木本植物5、11月NDVI远高于非植被地物,且由于常绿木本植物在5月已表现出NDVI的明显增长,其5月NDVI明显大于1—2月NDVI。

③ 满足 $NDVI_5 > 0.38$ 且 $NDVI_{11} > 0.38$ 且 $NDVI_5 > NDVI_4$ 且 $NDVI_4 > NDVI_2$ 且 $NDVI_4 > NDVI_1$ 的像元为落叶木本植物和草本植物。这是因为落叶木本植物和草本植物5月、11月NDVI水平低于常绿木本植物,但它们在1—5月均有明显的NDVI增加过程。至此,植被区提取完成。

④ 在像元已被判断为植被的前提下,常绿木本植物1月、2月NDVI水平显著高于草本植物,5月落叶木本植物与草本植物差异最大,故可用1、2、5月NDVI进一步区分开草本植物和2类木本植物。

(3) 植被提取精度评价

以总体分类精度为评价指标,利用2018年湖滨植被分类结果进行精度评价。首先在滇池湖滨带范围内随机生成50个点,其次基于高精度谷歌地图对各随机点的地物类型进行对比验证。

2.3.3 湖滨带植被对滇池总磷浓度影响分析的研究方法

利用最小二乘趋势法,辅以滇池入湖河流总磷负荷数据,分析滇池总磷浓度与湖滨带植被的空间响应关系^[23-24];依据滇池总磷浓度空间分布规律,确定滇池湖滨带对滇池总磷浓度的强影响区,通过散点图、相关分析,探讨滇池湖滨带植被对强影响区总磷浓度的影响。

(1) 滇池总磷浓度时空变化对湖滨带NDVI的响应研究

首先,基于最小二乘趋势分析法分析湖滨带NDVI或总磷浓度的变化趋势。利用式(4)逐像元计算NDVI或总磷浓度随时间变化的斜率,通过斜率判断其变化趋势,若 $slope > 0$,则说明NDVI或总磷浓度呈现增加趋势,反之则呈现减小趋势。对斜率进行 t 检验,若 $p < 0.05$,则认为趋势变化显著;反之则变化趋势不显著。

$$slope_i = \left(\sum_{t=1}^n x_i t_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{t=1}^n x_i \right) \left(\sum_{t=1}^n t_i \right) \right) / \left(\sum_{t=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{t=1}^n t_i \right)^2 \right) \quad (4)$$

式中:变量 $slope_i$ 为第 i 个像元的斜率;变量 t_i 为像元 i 所处的时间序号;变量 x_i 为第 i 个像元的NDVI

大小或总磷浓度; n 为研究的时间长度。

其次,结合入湖河流总磷负荷数据,分析湖滨带植被变化与总磷浓度的空间关系。入湖河流的总磷负荷利用式(5)计算^[25]:

$$W_i = C_i \times Q_i \quad (5)$$

式中: W_i 为 i 年入湖河流总磷负荷/(t/a); C_i 为 i 年河流入湖河口处总磷浓度年均值/(mg/L); Q_i 为 i 年河流入湖平均径流量/(m³/a)。其中,滇池主要入湖河流的多年平均径流量来自文献[26]、[27],2007年捞鱼河和洛龙河年均入湖总磷浓度来自文献[28]。

(2) 湖滨带植被对其强影响区总磷浓度的影响研究

滇池总磷浓度空间分布规律显示,湖心区域总磷浓度的变化相对平缓,说明湖滨带植被变化对湖缘水域的影响更大,向湖心方向影响逐渐减弱,为了探讨湖滨带植被的影响范围,本节首先确定湖滨带对滇池总磷浓度的强影响区,进而分析湖滨带植被与强影响区总磷浓度的关系。

① 湖滨带对滇池总磷浓度强影响区的确定

为了确定强影响区距离,以30 m为步长从湖岸向湖心做缓冲区,考察随着离岸距离变化总磷浓度的变化情况,如图3(a)所示,总磷浓度从湖岸边缘迅速减小,到一定距离达到拐点,如图3(b)的B点,然后逐渐趋于稳定,设岸边点为O,则定义OB段水域范围为湖滨带对总磷浓度的强影响区。

OB段距离求解方法如下:以30 m为步长做缓冲区,获取每个步长缓冲区内滇池总磷浓度的均值;求取不同步长下总磷浓度曲线的局部斜率;第一个局部斜率近似为零的步长对应的离岸距离即为强影响区的缓冲半径。

② 湖滨带植被对其强影响区总磷浓度影响的分析方法

以4月、5月表示枯水期,8月代表丰水期,11月代表平水期,对湖滨带强影响区总磷浓度均值与草本植物、木本植物NDVI进行相关性分析,探讨不同季节植被NDVI与湖滨带强影响区总磷浓度的响应关系。

3 结果分析与讨论

3.1 滇池总磷浓度时空变化

3.1.1 滇池总磷浓度遥感估算模型的建立与验证

基于TM传感器的总磷浓度估算模型如图4(a)

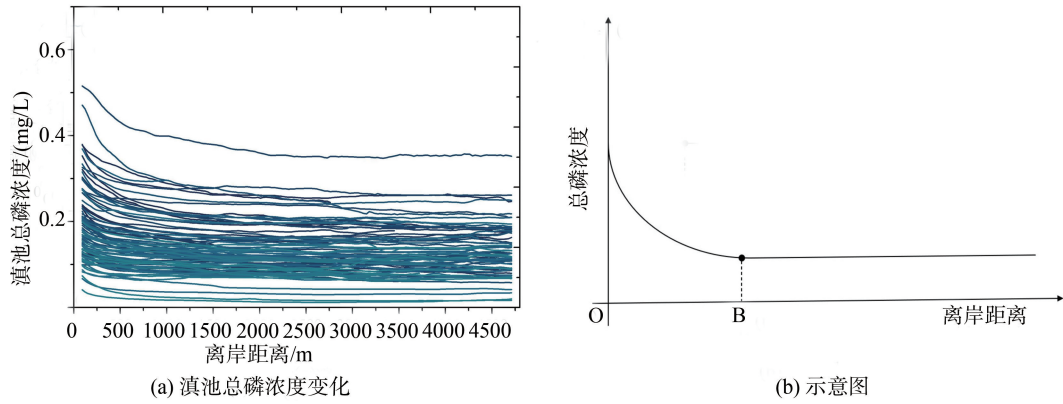


图3 滇池总磷浓度随离岸距离的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of total phosphorus concentration in Dianchi Lake with off shore distance

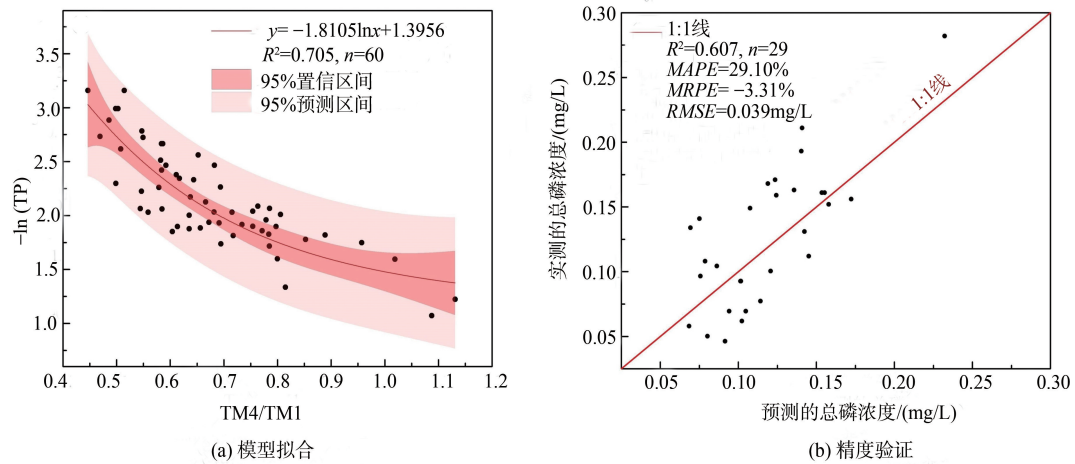


图4 基于TM传感器的总磷浓度估算模型

Fig. 4 Estimation model of total phosphorus concentration based on TM sensor

所示,具体模型如式(6)。验证数据集 MAPE 为 29.10%, MRPE 为 -3.31% 以及 RMSE 为 0.039 mg/L,且大部分样点都位于 1:1 线附近(图 4(b))。

$$\ln(TP) = 1.8105 \times \ln\left(\frac{TM4}{TM1}\right) - 1.3956 \quad (6)$$

基于 OLI 传感器的总磷浓度估算模型如图 5(a) 所示,其具体模型为式(7)。其验证数据集 MAPE 为 27.43%, MRPE 为 -6.98%, RMSE 为 0.033 mg/L。相比于基于 TM 传感器的直接估算模型,基于 OLI 传感器的总磷直接估算模型更稳定,但其具有更明显的高估现象,散点较多分布在 1:1 线下方(图 5(b))。

$$\ln(TP) = 1.5291 \times \ln\left(\frac{OLI5}{OLI2}\right) - 1.1124 \quad (7)$$

利用 2015 年 1 月 4 日滇池 7 个监测站点的地面与影像的同一天数据(站点分布位置如图 1(b)所示)对结果进行验证, R² 达到 0.73。

3.1.2 滇池总磷浓度时空分布

图 6 显示,滇池总磷浓度存在明显的空间差异,总磷浓度由湖缘向湖心降低,此结果与杜成功^[12]对太湖总磷浓度的结论相似;此外,滇池北部和南部总磷浓度偏高,这也与曹晓峰^[8]的研究成果一致。滇池北部靠近昆明主城区,城市污水和工业废水的输入,使得滇池北部总磷浓度长期偏高,局部总磷浓度达到约 0.189 mg/L;滇池南部是农业区和富磷采矿区^[26],农业径流和矿区废水的流入导致滇池南岸总磷浓度也较高,总磷浓度达到 0.170 mg/L 左右。

图 7(a)显示,2005—2018 年,在 2、4、5、11、次年 1 月中,滇池 2 月总磷浓度最低,均值为 0.153 mg/L; 11 月总磷浓度最高,达到 0.215 mg/L; 2—5 月总磷浓度呈现增加趋势, 11 至次年 1 月呈现减少趋势,这是滇池每年 5—7 月、9—11 月出现 2 个蓝藻水华

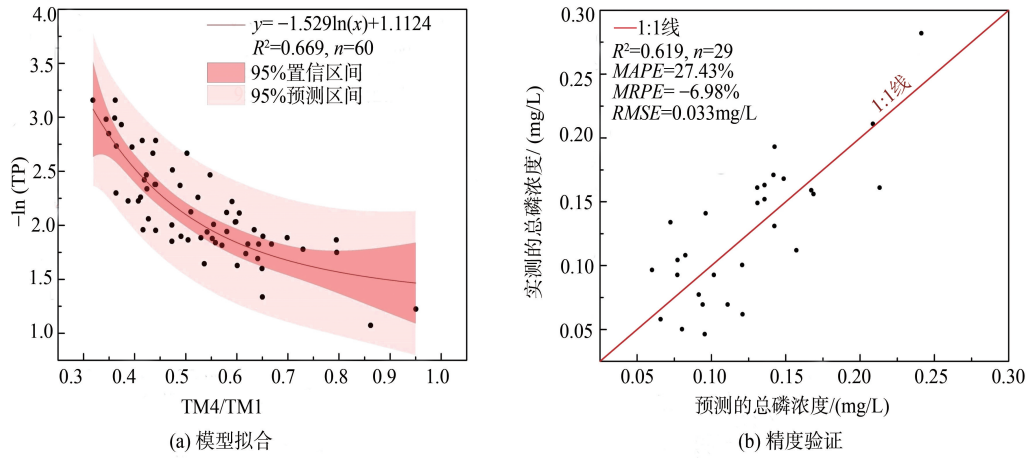


图5 基于OLI传感器数据的总磷浓度估算模型

Fig. 5 Estimation model of total phosphorus concentration based on OLI sensor

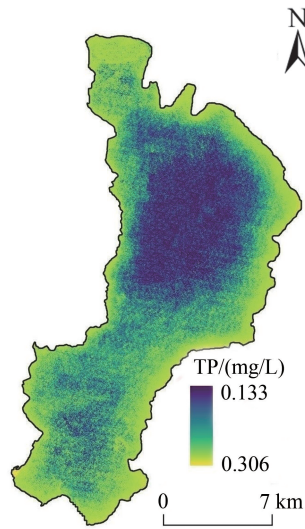


图6 滇池总磷浓度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution map of total phosphorus concentration in Dianchi Lake

爆发的高峰期所致^[29]。图7(b)表明,整体而言,滇池总磷浓度呈现显著下降趋势,2005年滇池总磷浓度最高,其年均值达到0.251 mg/L;2018年总磷浓度最低,最低总磷年均值为0.086 mg/L。2010年和2017年总磷浓度异常升高。根据国家气象科学数据中心^[30]所获取的昆明站气温和降水量数据发现,2009—2010年滇池地区气温异常偏高,且2010年降水量明显高于2009年和2011年,故推测2010年滇池外海总磷浓度较高可能主要受气温和降水的影响。李庚辰等^[31]研究表明,气温升高可以显著促进富营养化湖泊沉积物磷的释放,导致水体中磷含量显著升高;而降水量的增加可导致大量磷随着径流汇入滇池。2017年总磷浓度异常偏高,这主要是由于2017年牛栏江向滇池输送的水量低于往年、且降水量远高于其他年份,导致2017年2、3、5月滇池总磷入湖负荷量偏高^[32]。

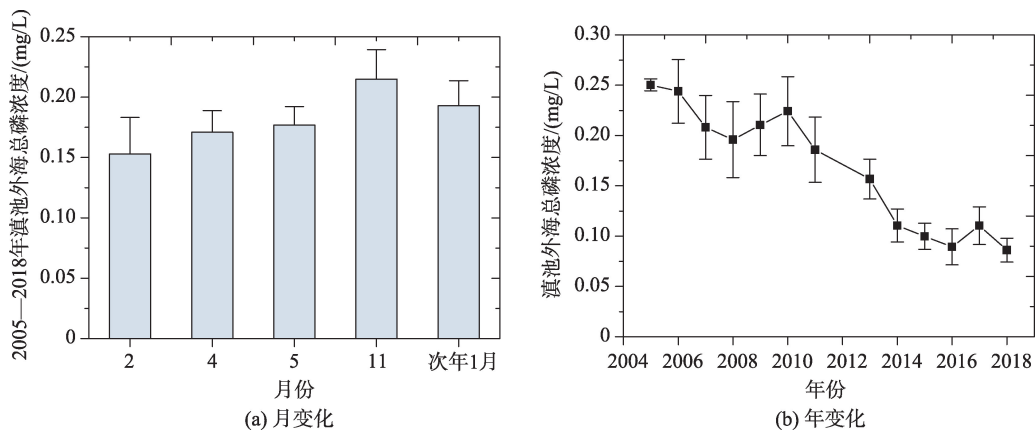


图7 滇池总磷浓度月变化和年际变化

Fig. 7 Monthly and annual changes of total phosphorus concentration in Dianchi Lake

3.2 滇池湖滨带植被的时空变化

植被提取精度评价结果表明,2018年的总体分类精度为85.67%,草本植被与木本植被分类精度分别为83.33%和81.07%。

图8是2005—2018年滇池湖滨带植被覆盖面积和其NDVI年变化曲线。图8(a)表明,滇池湖滨带2005—2018年草本、木本植物覆盖面积均呈现显著增加趋势,且草本面积一直高于木本面积。这与程晋昕等^[3]研究结论一致,随着滇池湖滨大规模建设湿地,环湖带乔木、草本植物等湿地植被在2007—2013年有显著提升,主要植被种类为中山杉和芦苇。图8(a)还表明,草本植物面积和木本植物面积呈阶梯状增加,并且草本植物面积具有明显波动性,这是因为滇池湖滨带大棚被拆除后闲置,形成荒草地,后续进行湿地建设时因需要重新填充基质,故荒草地又转变为裸土,最后种植湿地植被,草地会经历荒草地-裸土-湿地植被这种转换过程。从图8(b)可知,滇池湖滨带草本植物和木本植物年均NDVI变化趋势接近,NDVI在2005—2008年变化不明显,在2009年骤然减少,在2009—2018年显著增加。查看Google Earth历史影像发现2007—2008年滇池湖滨带大规模拆除大棚、还草还林,植被区增加了许多覆盖度低的草本和木本植物,故这一期间植被年均NDVI急剧降低。

3.3 湖滨带植被变化对滇池总磷浓度的影响

3.3.1 湖滨带NDVI对滇池总磷浓度时空变化的影响

图9(a)和图9(b)分别是2005—2018年滇池湖滨带NDVI和滇池总磷浓度随时间变化的显著性分布,图9(c)是2005—2018年滇池总磷浓度随时间变化的斜率分布。从图9(a)可以看到湖滨带NDVI显

著增加的像元都贴近湖岸线;图9(b)和图9(c)表明2005—2018年滇池绝大部分像元的总磷浓度都呈现显著减小趋势,且湖缘区总磷浓度减小的斜率明显高于湖心区,即说明湖缘区总磷浓度减小更剧烈。再结合图10可知,滇池北部以及东北部入湖河流总磷负荷逐年减小,而滇池东部、东南部以及南部河流入湖总磷负荷变化趋势并不是单调减小。但滇池东部、东南部和南部湖缘区总磷浓度显著减小,且呈条带状,这说明滇池湖滨带对滇池总磷有截留作用。从图9(c)还可看出,滇池西北部湖缘总磷浓度并未出现显著的减小趋势,同时滇池湖滨西北部NDVI增加较少,湖滨带窄,故推测滇池西北部人工湿地分布少、植被覆盖面积小,导致其局部滇池总磷浓度未显著减少。

图10还表明,2007—2011年入湖总磷负荷呈现明显减小趋势,但到2011年之后总磷负荷减小趋势不明显。故本文分段探讨2005—2011年以及2011—2018年滇池总磷浓度的变化趋势。图11是滇池总磷浓度分时段变化趋势图,在2005—2011年以及2011—2018年滇池外海大部分像元总磷浓度变化趋势不显著,较小部分像元显著减小,只有极少数像元显著增加,2005—2011年、2011—2018年显著增加像元占比仅为0.08%和1.20%。2005—2011年,滇池总磷浓度减小显著的区域是滇池北部(图11),结合图10可知,这个时间段滇池总磷浓度显著减小主要是北部河流入湖总磷负荷急剧减小所致。图11和图10还表明,在上游总磷负荷减小不明显的情况下,2011—2018年滇池东部和南部沿岸总磷浓度仍显著减小,这也再次说明了滇池湖滨带对滇池总磷有截留作用。

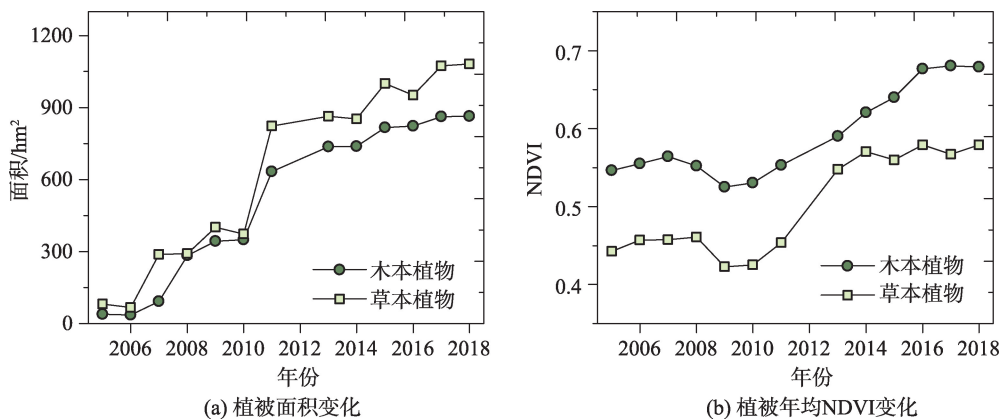


图8 滇池湖滨带植被覆盖面积及其NDVI年变化曲线

Fig. 8 Annual variation of vegetation coverage area and its NDVI in lakeside of Dianchi Lake

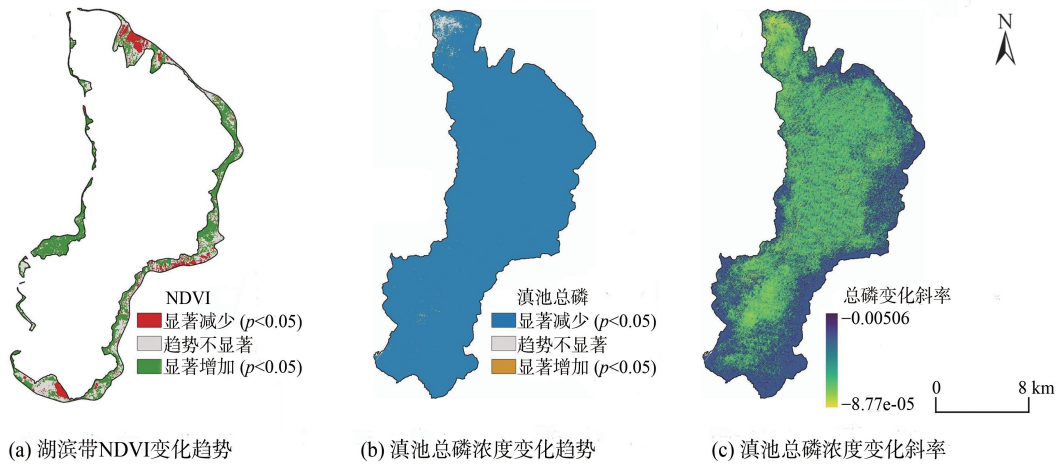


图9 2005—2018年湖滨带NDVI与滇池总磷浓度的变化趋势

Fig. 9 Change trends of NDVI in lakeside zone and total phosphorus concentration in Dianchi Lake from 2005 to 2018

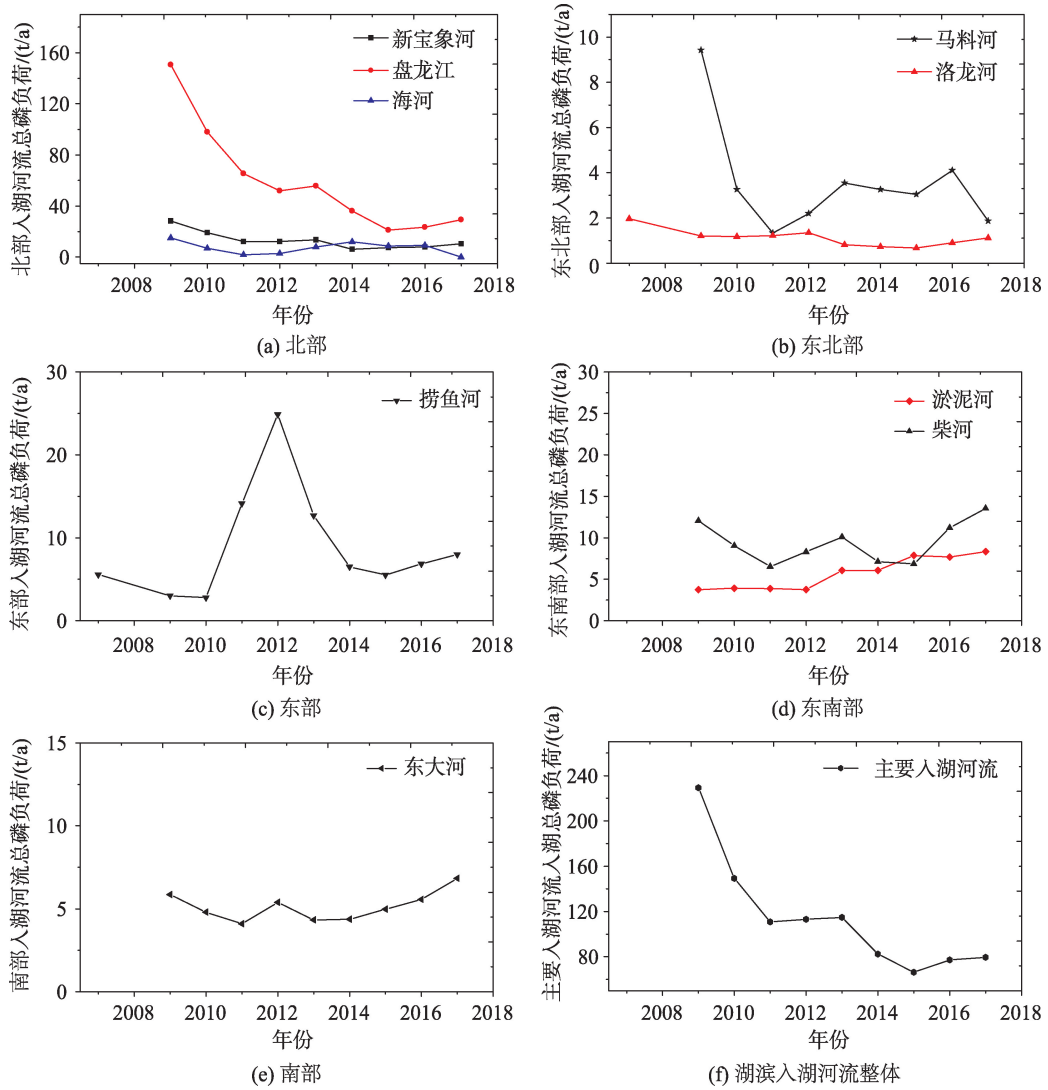


图10 滇池入湖河流入湖总磷负荷年变化曲线

Fig. 10 Annual variation of total phosphorus load entering Dianchi Lake

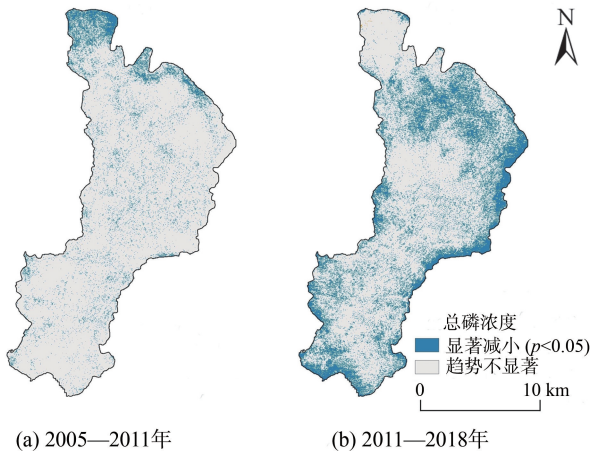


图11 滇池总磷浓度分时段变化趋势
 Fig. 11 Variation trend of total phosphorus concentration in Dianchi Lake in different time periods

3.3.2 湖滨带植被对其强影响区总磷浓度影响的季节差异分析

图12(a)显示,在整个生长期的时间尺度上,湖滨带强影响区总磷浓度与草本植物、木本植物NDVI之间相关性很弱,随着草本和木本植物NDVI增加到一定水平时,湖滨带强影响区总磷浓度才与草本植物和木本植物NDVI呈现强负相关。查看数据发现,在2005—2008年,强影响区总磷浓度与草本、木

本植物NDVI之间不存在明显规律;在2009—2018年,强影响区总磷浓度与草本、木本植物NDVI之间呈现强负相关。这是由于2005—2008年,滇池湖滨带草本和木本植物面积小,所以该时期湖滨带强影响区总磷浓度与两种植被NDVI之间的响应很微弱;到2009—2018年,草本和木本植物面积越来越大,其长势越来越好,NDVI水平越来越高,导致湖滨带强影响区总磷浓度与两种植被NDVI之间的负相关关系越强。图12(b)说明,枯水期草本和木本植物NDVI与总磷浓度呈负相关趋势,且相比于草本植物,木本植物NDVI与滇池总磷浓度相关性更强, R^2 达到0.68($p < 0.0001$)。由图12(c)可知,丰水期湖滨带强影响区总磷浓度与植被NDVI之间几乎不相关。这是由于在丰水期,为了泄洪,入湖河流的河水直接流入滇池,不经过湖滨湿地。图12(d)说明,平水期时在NDVI水平较低时,强影响区总磷浓度与草本和木本植物NDVI呈现负相关,在NDVI达到高水平时,随着草本和木本植物NDVI的增加,强影响区总磷浓度变化不明显。这是由于平水期入湖水流经湖滨湿地,其在湿地停留时间相比于枯水期要短,早期湿地草本和木本植物因自身长势越来越好而吸收越来越多的磷,故强影响区总磷浓度与植被NDVI呈现负相关关系;后期由于上游河水

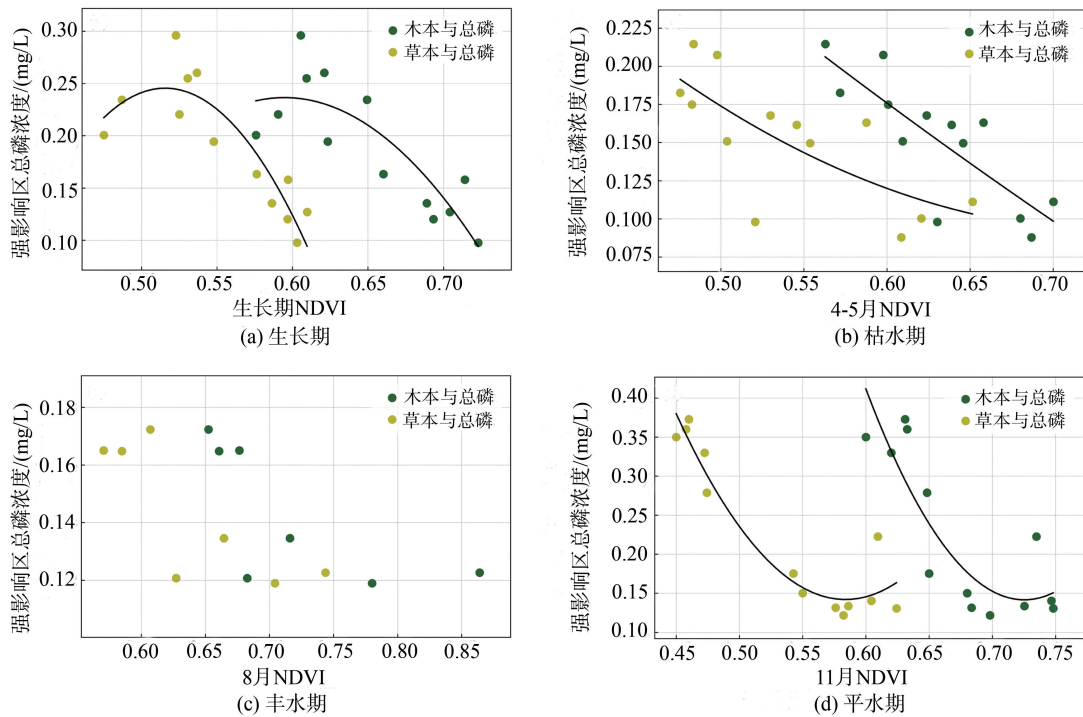


图12 不同时期植被NDVI与湖滨带强影响区总磷浓度的相关性分析
 Fig. 12 Scattering trend graph of vegetation NDVI and total phosphorus concentration in different periods

在湿地的停留时间有限,导致植被所吸收磷的量受限,故后期总磷浓度随植被NDVI的增加不再发生明显变化。高天霞等^[33]在捞渔河附近设计地面试验研究人工湿地草本植被对滇池入湖总磷的去除时得到结论,在表流人工湿地和潜流人工湿地中,芦苇等草本植物对总磷的去除率7—12月强于5—6月,这也与表1中草本植物NDVI与湖滨带强影响区总磷浓度相关性平水期强于枯水期结果吻合。大多数学者认为湿地对磷的影响机理主要是基质的吸附、植物吸收、微生物作用等^[4-6,33]。短期内与人工湿地基质吸附磷相比,植被的吸收及同化作用对水体磷的影响较低,但在人工湿地长期运作时,尤其是在种植有中山杉等常绿木本植物的湿地中,植被生长在对磷的影响逐渐显著。

表1 草本和木本植物NDVI与湖滨带强影响区总磷浓度相关性的季节差异

Tab. 1 Seasonal differences in the correlation between vegetation NDVI and total phosphorus concentration

R^2	全年	枯水期	平水期
草本 NDVI	0.66**	0.54**	0.60**
木本 NDVI	0.64**	0.68**	0.62**

注:**表示 $p < 0.01$,具有统计学极显著性。

4 结论

以滇池和滇池湖滨带为研究区,研究2005—2018年滇池湖滨植被变化对滇池总磷浓度的影响,主要结论如下:

(1)空间尺度上,滇池总磷浓度由湖缘向湖心逐渐降低,并且北部和南部偏高,北部和南部局部总磷浓度分别达到0.189 mg/L、0.170 mg/L左右。月尺度上,2005—2018年,2—5月总磷浓度呈现增加趋势,11月至次年1月呈现减少趋势。年尺度上,2005—2018年滇池外海总磷浓度呈现显著下降趋势,2005年滇池外海总磷浓度最高,其年均值达到0.251 mg/L;2018年总磷浓度最低,最低总磷年均值为0.086 mg/L。

(2)滇池湖滨带2005—2018年滇池湖滨带草本和木本植物面积都显著增加,增加最剧烈的年份是2010—2011年,且草本面积一直高于木本面积;滇池湖滨带草本植物和木本植物年均NDVI变化趋势接近,NDVI在2005—2008年变化不明显,在2009年骤然减少,在2009—2018年显著增加。

(3)2007—2011年入湖总磷负荷呈现明显减小趋势,且在2005—2011年滇池总磷浓度减小显著的区域是滇池北部,故推测这个时间段滇池总磷浓度显著减小主要是北部河流入湖总磷负荷急剧减小所致;2011年以后入湖总磷负荷减小趋势不明显,但2011—2018年滇池东部和南部沿岸总磷浓度仍显著减小,这说明湖滨带植被生长对磷输入起到了一定的拦截作用。

(4)枯水期草本和木本植物NDVI与总磷浓度呈负相关趋势,且相比于草本植物,木本植物NDVI与滇池总磷浓度相关性更强。丰水期湖滨带强影响区总磷浓度与植被NDVI之间几乎不相关。平水期时在NDVI水平较低时,强影响区总磷浓度与草本和木本植物NDVI呈现负相关;在NDVI达到高水平时,随着草本和木本植物NDVI的增加,强影响区总磷浓度变化不明显。相比于平水期和丰水期,枯水期NDVI与强影响区总磷浓度负相关关系最强。

参考文献(References):

- [1] 陈静,孔德平,范亦农,等.滇池受损湖滨带堤岸处置及基底修复工程技术研究[J].环境科学与技术,2012,35(6):157-160. [Chen J, Kong D P, Fan Y N, et al. A study on the treatment of damaged lakeside levee and its base restoration engineering in Dianchi[J]. Environmental Science and Technology, 2012,35(6):157-160.]
- [2] 中国新闻网,春城昆明将环绕滇池兴建“一湖四片”现代化城市, <http://www.chinanews.com/n/2003-06-01/26/309194.html>. [China News Network, Spring city Kunming will build a "One Lake and Four Areas" modern city around Dianchi Lake, <http://www.chinanews.com/n/2003-06-01/26/309194.html>.]
- [3] 程晋昕,余凌翔,鲁韦坤,等.基于高分辨率遥感影像的滇池湖滨湿地植被类型监测[J].云南地理环境研究,2013,25(6):1-7. [Cheng J X, Yu L X, Lu W K, et al. Vegetation type monitoring of lake shore wetland in Dianchi based on high-resolution remote sensing image[J]. Yunnan Geographical Environment Research, 2013,25(6):1-7.]
- [4] 熊飞,李文朝,潘继征,等.人工湿地脱氮除磷的效果与机理研究进展[J].湿地科学,2005,3(3):228-234. [Xiong F, Li W Z, Pan J Z, et al. Research progress on the effect and mechanism of nitrogen and phosphorus removal in constructed wetlands[J]. Wetland Science, 2005,3(3):228-234.]
- [5] 李晓东,孙铁珩,李海波,等.人工湿地除磷研究进展[J].生

- 态学报,2006,27(3):1226-1232. [Li X D, Sun T H, Li H B, et al. Research progress on phosphorus removal in constructed wetlands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006,27(3): 1226-1232.]
- [6] Reddy K R, Kadlec R H, Flaig E, et al. Phosphorus retention in streams and wetlands: A review[J]. *C R C Critical Reviews in Environmental Control*, 1999,29(1):83-146.
- [7] Kutser T, Arst H, Miller T, et al. Telespectrometrical estimation of water transparency, chlorophyll- a and total phosphorus concentration of Lake Peipsi[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995,16(16):3069-3085.
- [8] 曹晓峰.基于HJ-1A/1B影像的滇池水质遥感监测研究[D].西安:西安科技大学,2012. [Cao X F. Remote sensing monitoring of water quality in Dianchi lake based on HJ-1A/1B images[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.]
- [9] 杜成功,李云梅,王桥,等.面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究[J].*环境科学*,2016,37(3):862-872. [Du C G, Li Y M, Wang Q, Inversion model and daily variation of total phosphorus concentrations in Taihu Lake based on GOCI data[J]. *Environmental science*, 2016,37(3):862-872.]
- [10] Sun D, Qiu Z, Li Y, et al. Detection of total phosphorus concentrations of turbid inland waters using a remote sensing method[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2014,225(5):1953.
- [11] Jiaming L, Yanjun Z, Di Y, et al. Empirical estimation of total nitrogen and total phosphorus concentration of urban water bodies in China using high resolution IKONOS multispectral imagery[J]. *Water*, 2015,7(11):6551-6573.
- [12] 杜成功.太湖总磷浓度时空变化及其影响因素研究[D].南京:南京师范大学,2018. [Du C G. Temporal and spatial variation of total phosphorus concentration in Lake Taihu and its influencing factors[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2018.]
- [13] Hou X, Chen X, Liu W, et al. Changes in the wetland vegetation growth patterns in large lakes on the Yangtze Plain [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2019:1-12.]
- [14] 张军.丹江流域植被格局演变及其与水质响应关系研究[D].西安:西安理工大学,2017. [Zhang J. The evolution of vegetation pattern in Danjiang River Basin and its relationship with water quality response[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.]
- [15] 陈永林,孙永光,谢炳庚,等.红树林湿地景观格局与近海海域水质的相关分析——以广西北海地区为例[J].*海洋环境科学*,2016,35(1):7-12. [Chen Y L, Sun Y G, Xie B G, et al. Correlation analysis of mangrove wetland landscape pattern and offshore water quality: Taking the Beihai area of Guangxi as an example[J]. *Marine Environmental Science*, 2016,35(1):7-12.]
- [16] 郭玉静,王妍,刘云根,等.普者黑岩溶湖泊湿地湖滨带景观格局演变对水质的影响[J].*生态学报*,2018,38(5): 1711-1721. [Guo Y J, Wang Y, Liu Y G, et al. The effects of landscape pattern evolution in Puzhehei karst lake wetland littoral zone on water quality. *Acta Ecologica Sinica*, 2018,38(5):1711-1721.]
- [17] 肖茜.近30年滇池流域地表覆盖关键要素变化对滇池水质的影响研究[D].昆明:云南师范大学,2018. [Xiao Q. The impact of changes in key elements of the surface cover of the Dianchi Lake Basin on the water quality of the Dianchi Lake in the past 30 years[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2018.]
- [18] Zhai H, Zhang H, Zhang L, et al. Cloud/shadow detection based on spectral indices for multi/hyperspectral optical remote sensing imagery[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018,144(10):235-253.
- [19] Vanhellemont Q. Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019,225:175-192.
- [20] bishun945, Time-Series-based Spatial Interpolation Method, 2019-12-17, <https://github.com/bishun945/TSSIM>.
- [21] 谢国清,李蒙,鲁韦坤,等.滇池蓝藻水华光谱特征、遥感识别及暴发气象条件[J].*湖泊科学*,2010(3):327-336. [Xie G Q, Li M, Lu W K, et al. Spectral characteristics, remote sensing identification and outbreak meteorological conditions of cyanobacteria bloom in Dianchi[J]. *Lake science*, 2010(3):327-336.]
- [22] 何云玲,熊巧利,罗贤,等.基于NDVI滇池水华特征的时空变化研究[J].*生态环境学报*,2019,28(3):131-139. [He Y L, Xiong Q L, Luo X, et al. Research on the temporal and spatial variation of bloom in Dianchi Lake based on NDVI[J]. *Journal of Eco-environment*, 2019,28(3):131-139.]
- [23] Zhang Q, Xu C Y, Becker S, et al. Sediment and runoff changes in the Yangtze River basin during past 50 years [J]. *Journal of Hydrology*, 2006,331(3-4):511-523.
- [24] 汤旭光,李恒鹏,聂小飞.应用MODIS数据监测千岛湖流域植被覆盖动态(2001-2013年)[J].*湖泊科学*,2015(3):511-518. [Tang X G, Li H P, Nie X F. Monitoring the dynamics of vegetation cover in Lake Qiandao basin with MODIS data (2001-2013)[J]. *Lake Science*, 2015(3):511-518.]

- [25] 李乐,王圣瑞,王海芳,等.滇池入湖河流磷负荷时空变化及形态组成贡献[J].湖泊科学,2016(5):951-960. [Li L, Wang S X, Wang H F, et al. Temporal and spatial variation and morphological composition of phosphorus load in lake-entering rivers of Dianchi[J]. Lake Science, 2016 (5):951-960.]
- [26] 李发荣,邱学礼,周璟.滇池东南岸农业和富磷区入湖河流地表径流及污染特征[J].中国环境监测,2014,30(6):93-101. [Li F R, Qiu X L, Zhou J. Surface runoff and pollution characteristics of the lake inflow rivers in the southeast bank of Dianchi in agricultural and phosphorus-rich areas[J]. Environmental Monitoring in China, 2014, 30(6):93-101.]
- [27] 李亚.滇池环境治理与保护规划研究[D].重庆:重庆大学,2008. [Li Y. Study on environmental management and protection planning in Dianchi[D]. Chongqing: Chongqing university, 2008.]
- [28] 高路,潘珉.昆明呈贡新区入滇池主要河流水质分析[J].云南民族大学学报(自然科学版),2011,20(3):225-228. [Gao L, Pan M. Water quality analysis of main rivers entering Dianchi in Chenggong, Kunming[J]. Journal of Yunnan Nationalities University (Natural Sciences Edition), 2011,20(3):225-228.]
- [29] 郭怀成,王心宇,伊璇.基于滇池水生态系统演替的富营养化控制策略[J].地理研究,2013,32(6):998-1006. [Guo H C, Wang X Y, Yi X. Eutrophication control strategy based on Dianchi water ecosystem succession[J]. Geographical research, 2013,32(6):998-1006.]
- [30] 国家气象科学数据中心, <http://data.cma.cn/site/index.html>. [National Meteorological Science Data Center, <http://data.cma.cn/site/index.html>.]
- [31] 李庚辰,刘足根,张敏,等.升温对超富营养型浅水湖泊沉积物营养盐动态迁移的影响[J].生态学报,2015,35(12):4016-4025. [Li G C, Liu Z G, Zhang M, et al. A preliminary study of effects of warming on the nutrients dynamic in sediment of hypereutrophic shallow lake[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(12):4016-4025.]
- [32] 郑丙辉,彭嘉玉,胡小贞.2017年滇池外海水质异常下降原因及对策[J].环境工程技术学报,2018(5):465-472. [Zheng B H, Peng J Y, Hu X Z. Causes and countermeasures of abnormal water quality decline off Dianchi in 2017[J]. Journal of environmental engineering technology, 2018(5):465-472.]
- [33] 高天霞,李毅,郭婷,等.人工湿地系统改善滇池入湖水水质[J].净水技术,2011,30(2):28-32. [Gao T X, Li Y, Guo T, et al. Constructed wetland system improves the water quality of Dianchi Lake into the lake[J]. Water Purification Technology, 2011,30(2):28-32.]