

## 2001—2018 年滇池总磷出入湖通量变化与源汇效应<sup>\*</sup>

吴东少<sup>1</sup>, 曹敏<sup>1</sup>, 段仲昭<sup>2</sup>, 张远<sup>1</sup>, 高伟<sup>1\*\*</sup>

(1: 广东工业大学生态环境与资源学院, 大湾区城市环境安全与绿色发展教育部重点实验室, 广州 510006)

(2: 云南大学生态学与环境学院, 云南省高原山地生态与退化环境修复重点实验室, 昆明 650091)

**摘要:** 磷的外源输入与底泥源汇变化是湖泊富营养化形成的重要原因, 解析磷出入湖关键过程及其平衡变化对湖泊环境治理具有重要意义。本研究针对滇池外海出入湖磷通量变化问题, 融合水文水质观测数据和 HBV 水文模型模拟数据, 使用 LOADEST 负荷统计模型解析了 2001—2018 年滇池外海入湖河流、大气沉降和出湖河流的磷通量变化特征, 评估了湖体总磷的源汇效应及其影响因素。结果表明: ①2001—2018 年滇池外海入湖磷通量年际间波动范围大, 在 118~700 t/a 之间, 多年平均入湖磷通量为 280.61 t/a, 其中河流平均输入 251.97 t/a, 大气沉降平均输入 28.64 t/a, 在研究的气象水文因子中, 入湖磷通量主要影响因素是入湖流量和调水量, 其次是降水; ②滇池外海年均出湖总磷通量 42.25 t/a, 在 8~84 t/a 之间波动, 出湖通量变化主要受入湖流量与调水量的影响, 其次是气温; ③在年和月的时间尺度上, 滇池外海均表现为磷的环境汇, 多年平均磷滞留量为 238.36 t/a, 但在部分年份(2009、2018 年)逐日尺度上存在源效应。针对滇池外海常年表现磷的环境汇问题, 调水工程对降低磷的滞留率有显著作用, 但仍无法有效解决磷在湖泊中富集的问题。滇池外海持续的磷汇效应将增加湖泊未来水生态安全风险。

**关键词:** LOADEST; 随机森林; 磷通量; 时空特征; 源汇效应; 外海; 滇池

## The variation and source-sink effect of total phosphorus flux input and output of Lake Dianchi during 2001–2018<sup>\*</sup>

Wu Dongshao<sup>1</sup>, Cao Min<sup>1</sup>, Duan Zhongzhao<sup>2</sup>, Zhang Yuan<sup>1</sup> & Gao Wei<sup>1\*\*</sup>

(1: Key Laboratory for City Cluster Environmental Safety and Green Development of the Ministry of Education, School of Ecology, Environment and Resources, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, P.R.China)

(2: College of Ecology and Environmental Science, Yunnan Key Laboratory for Plateau Mountain Ecology and Restoration of Degraded Environments, Yunnan University, Kunming 650091, P.R.China)

**Abstract:** The input of exogenous phosphorus and the source-sink variation of sediments are important reasons for the development of lake eutrophication. It is of great importance to analyse the key processes of phosphorus in and out of the lake and its balanced changes for the environmental management of the lake. Aiming at the variation of phosphorus flux input and output of Lake Waihai of Lake Dianchi, we analysed the phosphorus flux in atmospheric deposition and river input and output of Lake Waihai from 2001 to 2018 by the LOADEST model, combined with the hydrological and water quality observation data and HBV hydrological simulation data, evaluated the variation of total phosphorus source and sink in the lake and its influencing factors. The results showed that: ① The phosphorus flux into Lake Waihai has significant inter-annual variation characteristics during 2001–2018, ranging from 118 t/a to 700 t/a. The average phosphorus flux into Lake Waihai from 2001 to 2018 is 280.61 t/a, of which the river input is 251.97 t/a and the atmospheric deposition input is 28.64 t/a. Among the study of meteorological and hydrological factors, the main influencing factors are the river flow into the lake and the amount of water diversion, followed by precipitation. The total annual phosphorus flux from Lake Waihai is 42.25 t/a, ranging from 8 t/a to 84 t/a. The variation of the flux from the lake is mainly influenced by the river flow into the lake and the amount of water diverted, followed by the temperature factor. On the time scale of year and month, Lake Waihai is an environmental sink of phosphorus, and the average annual retention of phosphorus is 238.36 t/a,

\* 2022-10-24 收稿; 2022-12-07 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2021YFC3201004)资助。

\*\* 通信作者; E-mail: gaowei@163.com。

but there is a source effect in some periods (2009 and 2018) on the daily scale. For the annual environmental sink problem of phosphorus flux in Lake Waihai, although the water diversion project to reduce water pollution in Lake Waihai is effective in reducing the phosphorus retention rate, it cannot effectively solve the problem of phosphorus enrichment in the lake. The continuous phosphorus sink effect in Lake Waihai may increase the risk to water ecology in the future.

**Keywords:** LOADEST; random forest; phosphorus flux; spatial-temporal characteristics; source-sink effect; Lake Waihai; Lake Dianchi

湖泊是内陆水生态系统的主要类型之一,具有气候调节、农业灌溉与调蓄洪水等多种功能,是区域生态环境和经济社会持续发展的重要载体<sup>[1]</sup>。近年来,在人为氮磷输入、气候变化和土地利用变化等多因素干扰下,全球范围内湖泊富营养化形势日益严峻<sup>[2]</sup>。河流作为湖泊入湖水量的主要来源,亦是氮磷等物质输入与输出的主要途径<sup>[3]</sup>。在众多干扰因素中,大量随河流快速汇入湖体的陆源氮磷负荷是湖泊富营养化形成的关键影响因素<sup>[4]</sup>。其中,磷是影响藻类生长及水华形成的关键因子。长期以来,富营养化湖泊中磷的治理主要以外源削减为主,内源控制及生态修复为辅<sup>[5]</sup>。然而,由于底泥源汇转换的问题,湖泊磷浓度对外源削减表现出非线性响应特征<sup>[6]</sup>。磷在底泥的富集或释放是营养盐出入湖通量失衡的表现<sup>[7]</sup>,当入湖通量大于出湖通量时,底泥以富集入湖磷污染物为主;反之,当入湖通量小于出湖通量,底泥以释放磷污染物为主。尽管湖泊通常表现磷的富集功能<sup>[8]</sup>,但在特定条件下可转变为释放功能,如受气温暖化的影响,湖泊内源磷释放量加大<sup>[9]</sup>。因此,阐释环境胁迫下湖泊磷负荷通量源汇变化特征及机制,对于深入揭示湖泊富营养化过程的磷防控具有十分重要的意义<sup>[10]</sup>。

目前湖泊磷循环研究主要关注的是:气候变化对磷通量的影响<sup>[11-12]</sup>、长时间序列湖泊磷浓度的时空分布特征<sup>[13-14]</sup>以及湖泊富营养化的磷阈值分析与调控<sup>[15-16]</sup>。针对云贵高原湖泊富营养化防控问题,虽有外源磷通量长时间序列的估算,但其研究主要侧重在污染源解析<sup>[17]</sup>以及水质改善方面<sup>[18]</sup>。而针对滇池磷循环的问题,Yan对滇池流域磷平衡的评估也仅为2000—2017年中的4个年度,当前很少有研究考虑湖泊长时间磷通量收支平衡的问题<sup>[19]</sup>。值得注意的是,已有学者初步探讨环境因子与湖泊磷通量的关系。在出入湖通量研究方面,金赞芳等人提出复杂环境条件下人为调水和极端降雨气候可显著提高湖泊入湖磷通量<sup>[20]</sup>;李卫平等发现湖泊污染物入湖通量与入湖水量呈一定正相关关系,并认为水量是影响入湖磷通量的关键因子<sup>[21]</sup>;也有学者指出土地利用变化显著影响湖泊磷含量,尤其流域农业发展可大幅度提高湖泊磷含量,加速湖泊生态系统结构的变化<sup>[22]</sup>。相关研究指出水量也是影响磷等污染物出湖通量的主要因素,入湖水量与出湖通量具有相对一致的变化特征,丰水期出湖通量大,枯水期出湖通量少<sup>[23]</sup>。出入湖物质通量的相对变化是判断湖泊源汇效应的主要依据。当出湖通量大于入湖通量时,湖泊表现环境源功能,反之,当出湖通量小于入湖通量时,湖泊则表现环境汇功能<sup>[24]</sup>。研究表明,不同磷形态在湖泊环境行为中具有显著差异,且湖泊作为磷汇的特征明显强于源的特征<sup>[25]</sup>。湖泊的环境汇主要发生在底泥沉积物中,但高温环境可提高湖泊溶解态磷通量,促进水华形成,这也是热带与亚热带地区夏季湖泊蓝藻水华频繁暴发的主要原因<sup>[26]</sup>。磷作为淡水湖泊营养状态的关键限制因子,其通量变化影响因素复杂,从多年、多时间尺度角度分析磷出入湖通量变化及其驱动因子,有助于深入揭示湖泊磷通量变化与源汇效应。

本研究针对湖泊磷负荷出入湖失衡的问题,综合采用水文模型、负荷模拟模型和机器学习等方法,以典型富营养化高原湖泊滇池(外海)为对象,解析2001—2018年出入湖泊磷通量的逐日、逐月和年度等不同时间尺度变化特征,阐明了多时间尺度下湖泊磷素的源汇效应,定量识别了影响滇池外海出入湖磷通量变化的主导因子,以期为我国云贵高原湖泊富营养化防控与治理提供科学依据和方法支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

滇池是我国严重富营养化的“老三湖”之一,位于云南省昆明市,是云贵高原面积最大的湖泊,也是我国第六大淡水湖泊。滇池流域属亚热带季风气候,流域内雨旱季分明,85%的降水发生在雨季(5—10月)<sup>[27]</sup>。流域内多年降水量924.70 mm,但年际间浮动较大(553.60~1234.10 mm);滇池流域面积2920.00 km<sup>2</sup>,水位1887.40 m时水域面积309.50 km<sup>2</sup>,对应湖容15.60亿m<sup>3</sup><sup>[28]</sup>。滇池共有天然入湖河流29条,出湖河流1条

(海口河), 北部有长期泥沙淤积形成的海埂大坝(图1)。海埂大坝将滇池分割为北部的草海和南部的外海两个子湖泊, 其中外海面积占比96.4%, 为滇池的主体。滇池的入湖河流主要发源于流域东部、南部和北部的山地, 并流经人口密集的城镇以及大面积灌溉农田<sup>[29]</sup>。29条入湖河流中, 7条流入草海, 22条流入外海; 其天然出湖口海口河从外海西南部流出。1996年西园隧洞建成后, 草海湖水经西园隧洞出流, 外海和草海成为两个湖区。在自然演化过程中, 滇池湖面不断缩小, 湖盆变浅, 内源污染物堆积, 湖泊已进入老龄化阶段。据调查, 滇池流域东部、南部和西部分布大量寒武纪磷块岩, 大规模磷矿的开采是历史时期滇池湖内高磷负荷的主要原因<sup>[30]</sup>。2018年滇池流域土地利用类型以林地为主, 占比34.7%, 其次是建设用地, 占比21.2%, 耕地、草地和水域占比分别为17.8%、15.1%和11.2%。根据中华人民共和国生态环境部2022年第三季度(7—9月)重点湖库水质状况公报, 滇池为中度污染, 草海和外海均处于中度富营养化状态, 外海未能达到Ⅲ类水功能要求, 总磷是外海超标的主要污染指标之一。

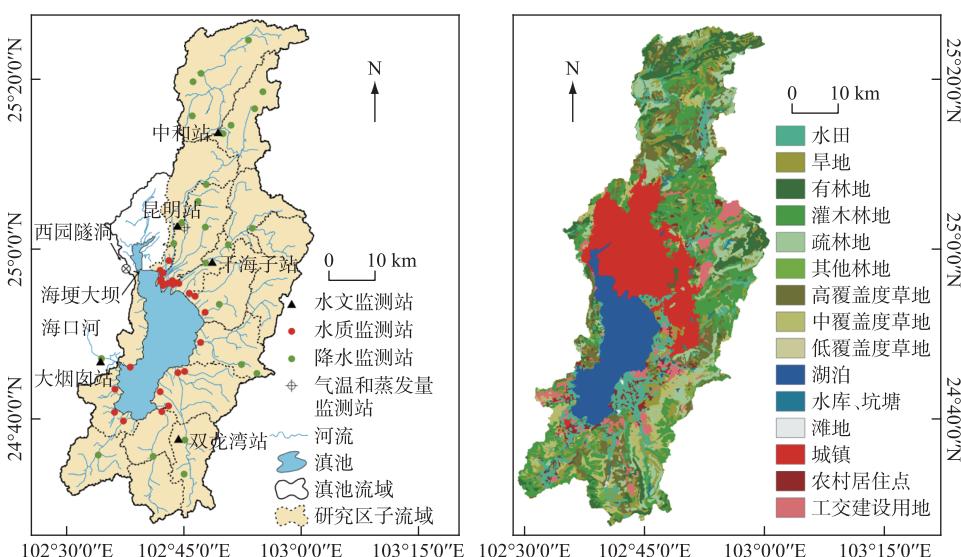


图1 滇池流域气象、水文、水质监测点位示意及2018年土地利用情况

Fig.1 Location of metrological, hydrological and water quality gauging stations in Lake Dianchi basin and its land use in 2018

## 1.2 研究方法

1.2.1 HBV流域水文模型 滇池外海入湖河流众多, 但常规水文监测站点较少, 无法实现河流入湖流量的全面观测。为获取河流入湖流量的全面信息, 本研究采用HBV(Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning)水文模型对无水文观测资料的河流流量进行模拟, 通过融合实测流量和模拟流量以获取滇池外海入湖河流的全序列流量。HBV模型是1976年由瑞典气象水文局开发的半分布式水文模型, 主要由融雪与积雪、土壤含水量、产汇流过程等多个计算模块组成。模型对输入数据要求性不高, 输入数据包括日降水量、日平均气温和潜在蒸发量, 输出数据主要有日径流量(地表和地下)和土壤含水量<sup>[31]</sup>。与其他水文模型相比, 该模型综合考虑了降水、气温、土壤和产汇流等要素, 可对径流进行模拟和预测, 形成了一套完整的模型预测方案<sup>[32]</sup>。HBV模型结构简单、模拟精度高、可操作性强, 能够适应于各种复杂气候条件下的水文模拟<sup>[31]</sup>。此外, 模型参数包括积雪和融雪参数、温度阈值参数以及河道参数等30多个具有明确物理意义的参数, 通过优化调整参数, 可提高模型模拟精度<sup>[33]</sup>。目前HBV模型被广泛应用于洪水水文预报、水资源评估和气候变化等诸多领域中<sup>[34-35]</sup>。其水量平衡基本公式如下:

$$P - E - Q = \frac{d}{dt}(SP + SM + UZ + LZ + LK) \quad (1)$$

式中, $P$ 为降水量; $E$ 为蒸发量; $Q$ 为径流量; $SP$ 为积雪量; $SM$ 为土壤含水量; $UZ$ 为上层地下水区; $LZ$ 为下层地下水区; $LK$ 为湖泊容量。

本研究使用基于ArcGIS平台的水文分析工具ArcSWAT(ArcGIS Soil and Water Assessment Tool),将滇池外海流域划分为17个子流域(图1)。由于滇池外海主要入湖河流盘龙江上游区域的人为干扰较少且水文观测数据完整,选取位于其上的中和水文站作为HBV模型参数率定与验证的点位(图1)。依据HBV模型目标函数优化性能,本研究采用可决系数( $R^2$ )、纳什系数( $NE$ )以及相对误差( $RE$ )3个拟合优度指标的加和最小为目标进行模型参数率定。将1999—2008年设定为率定期,2009—2018年为验证期,率定期和验证期的时间均达到10年,满足率定和验证时长的要求。根据HBV模型率定误差结果,率定期逐日流量的 $R^2$ (0.63)和 $NE$ (0.63)高于0.60,相对误差 $RE$ 仅1.2%,模拟效果良好;验证期模拟效果虽有下降,但 $R^2$ 、 $NE$ 、 $RE$ 仍分别能达到0.54、0.53、7.5%。全期 $R^2$ 、 $NE$ 和 $RE$ 分别为0.62、0.61和2.4%,表明模型整体模拟效果良好(图2),模型具体参数如表1所示。结合2001—2018年逐日尺度降雨量、蒸发量、调水量以及出入湖流量模拟数据,基于湖泊水平衡原理计算逐日尺度净入湖流量,并以85基面将滇池外海净入湖流量换算为逐日

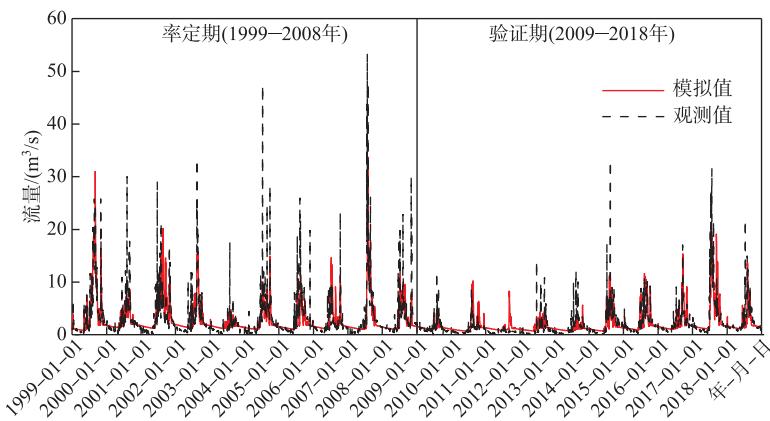


图2 1999—2018年中和站流量模拟值与实测值拟合效果

Fig.2 Comparison of simulated and observed flow in Zhonghe Station from 1999 to 2018

表1 基于中和站的HBV模型主要参数率定值

Tab.1 The calibration of major parameter based on HBV model in Zhonghe Station

名称	单位	含义	取值范围	率定值
TT	°C	温度阈值	(-inf, inf) *	-1.09
CFMAX	mm (°C · Δt) <sup>-1</sup>	度-步长因子	[0, inf)	2.82
SFCF	—	降雪修正因子	[0, inf)	0.62
CFR	—	回冻系数	[0, inf)	0.05
CWH	—	持水能力	[0, inf)	0.10
FC	mm	土壤最大储水量	[0, inf)	543.31
LP	—	AET 达到 PET 时土壤的储水量	[0, 1]	0.42
BETA	—	决定降雨或融雪对径流相对贡献的参数	[0, inf)	1.51
PERC	mm/Δt	阈值参数	[0, inf)	0.88
UZL	mm	阈值参数	[0, inf)	41.44
K0	1/Δt	储存(或回归)系数	[0, 1)	0.21
K1	1/Δt	储存(或回归)系数	[0, 1)	0.11
K2	1/Δt	储存(或回归)系数	[0, 1)	0.003
MAXBAS	Δt	三角加权函数长度	[1, 100]	1.69

\* -inf 为无下限界限值,inf 为无上限界限值。

水位。通过逐日水位模拟值计算逐月水位平均模拟值，并与逐月实测水位拟合对比(图3)。结果显示，湖泊逐月水位模拟值与实测值具有很好的一致性，平均误差为0.003 m,  $R^2$ 高达0.93，表明基于实测和模拟的滇池外海出入湖流量计算结果较为可靠。

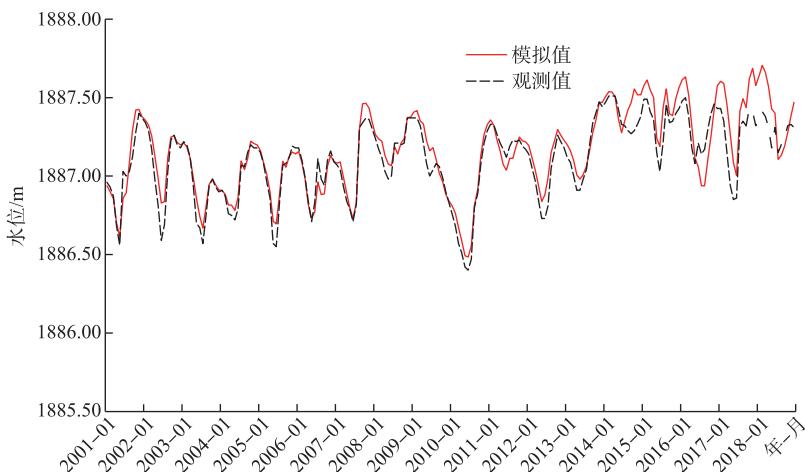


图3 2001—2018年滇池外海逐月水位模拟值与实测值对比

Fig.3 Comparison of simulated and observed water levels in Lake Waihai of Lake Dianchi from 2001 to 2018

**1.2.2 LOADEST 模型** LOADEST (Load estimator) 模型是由美国地质调查局 (USGS) 开发的河流污染物负荷估算回归模型，输入数据为流量和水质数据。模型适用于不同数据分布和删失情况的通量估算，其核心算法包括最大似然估计法 (MLE)、修正的最大似然估计法 (AMLE) 和最小绝对偏差法 (LAD)<sup>[36]</sup>。该模型可利用连续的流量数据与离散的水质浓度数据建立河流组分负荷回归模型，并估算负荷时间序列与负荷通量。

本研究将沿湖水质监测断面划分到所归属子流域，并统计子流域内各监测断面逐日磷浓度数据，以逐日平均值作为子流域总磷观测数据。将2001—2018年HBV模型输出的逐日子流域径流量数据和总磷浓度观测数据输入到LOADEST模型中求出相应片区的逐日磷通量数据值，月尺度和年尺度通量由日尺度通量加和获得。

**1.2.3 滇池外海总磷源汇效应** 基于物料平衡的基本原理，本研究通过统计出入湖物质通量评估湖泊磷负荷通量源汇特征。入湖磷通量由河流和大气沉降两部分构成，出湖通量主要是出湖河流带出，湖泊的净磷通量及其滞留率计算公式如下：

$$\Delta RL = \sum_i RI_i + \sum AI - \sum_j RO_j \quad (2)$$

$$RR = \frac{\Delta RL}{\sum_i RI_i + \sum AI} \quad (3)$$

式中， $\Delta RL$  为河湖界面净磷通量； $RI$  为入湖河流磷通量； $AI$  为湖面大气沉降磷通量； $RO$  为出湖河流磷通量； $i$  和  $j$  分别为入湖河流和出湖河流编号； $RR$  为磷的湖泊滞留率；当  $\Delta RL > 0$  时，湖泊为汇效应；反之，当  $\Delta RL < 0$  时，湖泊为源效应。

**1.2.4 随机森林模型** 湖泊的磷通量变化受到水文、气象、污染源等多种因素的复合影响，常规分析方法难以有效甄别不同因素的相对贡献。本研究使用随机森林 (random forest) 模型的重要性排序功能分析滇池外海出入湖磷通量的影响因素，以降低大规模复杂非线性动态系统演变的不确定风险<sup>[37]</sup>。随机森林是由Breiman提出的一种以决策树为基础的机器集成学习模型，该模型可通过自举法 (Bootstrap) 重采样技术随机获取训练样本及特征变量，并生成新的若干规模相同的训练数据子集，然后根据基尼值从训练数据子集中选择最佳特征进行分割，最后输出结果由所有决策树投票获得，可避免过度拟合的问题<sup>[38]</sup>。此外，随机森林算法可利用袋外数据准确率 (OOB score) 检验模型泛化能力，通过查看 OOB 预测错误率的大小来判定自变量对因变量的重要性，不同自变量的“% IncMSE”或“IncNodePurity”由高到低分别表示该自变量对因变量的

影响由强至弱<sup>[39]</sup>。

本研究以滇池流域特征指标与通量数据为样本,构建随机森林模型初步训练样本数据。自变量指标为影响磷通量的因素,包括气温、降水量、风速、入湖流量、调水量;因变量指标为出入湖磷通量;以上数据均为出入湖河流的总量,滇池入湖河流众多,但不同河流的总磷浓度不具有可加性,因此未选择河流总磷浓度作为影响出入湖磷通量的影响因素。本研究使用基于R语言的Breiman随机森林程序包(<https://www.stat.berkeley.edu/users/breiman/>)进行分析<sup>[40]</sup>。经模型模拟输出自变量方差变化值后,通过比较变量加入对结果方差影响的贡献大小确定出入湖磷通量变化的因子排序。

### 1.3 数据来源

本研究主要使用气象数据、水文数据和水质数据3类数据。气象数据包括逐日降水量、蒸发量和平均气温,主要用于构建HBV模型和随机森林模型;日降水量来自于研究区24个气象站点<sup>[41]</sup>;蒸发量和平均气温来自于昆明站。水文数据为滇池外海出入河流逐日径流量和调水量,其中宝象河、盘龙江和白鱼河3条主要入湖河流数据分别来自于干海子、昆明、双龙湾水文观测站;出湖河流海口河数据来自于大烟囱水文观测站;其余河流径流量则由HBV模型模拟。牛栏江-滇池补水工程等调水量数据来自昆明市水务局。水质数据为滇池外海22条入湖河流及1条出湖河流总磷浓度,监测断面为各河流出入湖口(图1)。

气象数据和水文数据来源于国家气象信息中心(<https://data.cma.cn>)和长江流域水文年鉴等,时间跨度均为1999—2018年,水质数据来源于昆明市生态环境科学研究院,时间跨度为2001—2018年。此外,基于2014年月尺度降雨量与大气沉降磷通量线性拟合关系,通过2001—2018年日尺度降雨量推算2001—2018年大气沉降总磷逐日通量,其中2014年逐月磷大气沉降通量数据由文献获取<sup>[42]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 滇池外海出入湖水量模拟与平衡核算

根据模拟结果(图4a),2001—2018年滇池外海平均入湖水量为10.27亿m<sup>3</sup>/a,2017年入湖水量最高(20.25亿m<sup>3</sup>),2003年最低(5.65亿m<sup>3</sup>),入湖水量年际间波动较大;其中2001—2013年期间入湖水量较少,平均为7.94亿m<sup>3</sup>/a。多年平均出湖水量为10.18亿m<sup>3</sup>/a,2017年出湖水量最高(20.40亿m<sup>3</sup>),2010年最低(6.16亿m<sup>3</sup>),出湖水量年际间浮动较大,2001—2013年期间出湖水量也相对较少,平均为7.82亿m<sup>3</sup>/a。2014年后,出入湖水量显著增加,年均分别为16.30亿、16.33亿m<sup>3</sup>/a。滇池外海多年月均入湖水量为0.86亿m<sup>3</sup>/月,2017年7月入湖水量最高(3.69亿m<sup>3</sup>),2004年3月最低(0.17亿m<sup>3</sup>);多年月均出湖水量0.85亿m<sup>3</sup>/月,2017年8月出湖水量最高(3.54亿m<sup>3</sup>),2001年2月最低(0.30亿m<sup>3</sup>)(图5)。整体来看,滇池外海出入湖水量的年际变化具有同步特征,2001—2013年期间出入湖水量较少,主要与该时期的降水量偏低有关,尤其2011年滇池流域发生严重干旱,造成了流域水资源严重缺乏<sup>[43]</sup>。2013年末开始,随着牛栏江-滇池补水工程的实施,滇池外海的出入湖水量显著上升。对比基于DYRESM模型模拟的2007—2019年滇池外海河流入湖水量结果<sup>[18]</sup>,其2007—2013年模拟结果与本研究计算结果接近,均在(6~10)亿m<sup>3</sup>/a范围内;但2014—2018年年均入湖水量模拟结果比本研究结果偏低4.9亿m<sup>3</sup>/a。由于本研究考虑了牛栏江-滇池补水工程的调水量,总体而言,本研究模拟的滇池流域入湖流量具有一致性和合理性。

为分析滇池外海的水量平衡,本研究计算了年及月尺度下的净入湖水量。年月尺度下,净入湖水量均有正负值。在年尺度下,净入湖水量平均值为0.09亿m<sup>3</sup>/a,2010年最高为1.60亿m<sup>3</sup>/a,2009年最低(-1.70亿m<sup>3</sup>)(图4b)。在月尺度下,净入湖水量平均值为 $7.9 \times 10^{-3}$ 亿m<sup>3</sup>/月,2017年7月最高(1.42亿m<sup>3</sup>/月),2015年5月最低(-1.15亿m<sup>3</sup>/月)(图5)。逐月净入湖流量波动范围主要集中在±0.60亿m<sup>3</sup>内,表明在年内尺度上滇池外海水量的不平衡特征,流量变化的汛期与非汛期差异显著,净流入主要发生在汛期,净流出主要集中在非汛期。

### 2.2 滇池外海出入湖磷通量时空变化

根据LOADEST模型核算了滇池外海入湖磷通量变化,2001—2018年间滇池外海入湖磷通量总体呈下降的变化趋势(图6a)。多年平均入湖磷通量为280.61t/a,其中河流平均输入251.97t/a(89.8%),大气沉降平均输入28.64t/a(10.2%)。入湖磷通量的年际间差异较大,其中2001年入湖通量最高(699.69t),2011

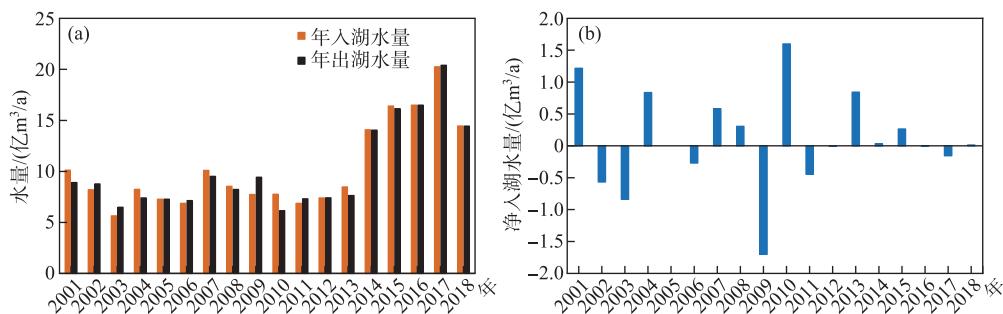


图 4 2001—2018 年滇池外海年出入湖水量(a)和净入湖水量(b)计算结果

Fig.4 Annual water in, out(a) and net input(b) of Lake Waihai of Lake Dianchi from 2001 to 2018

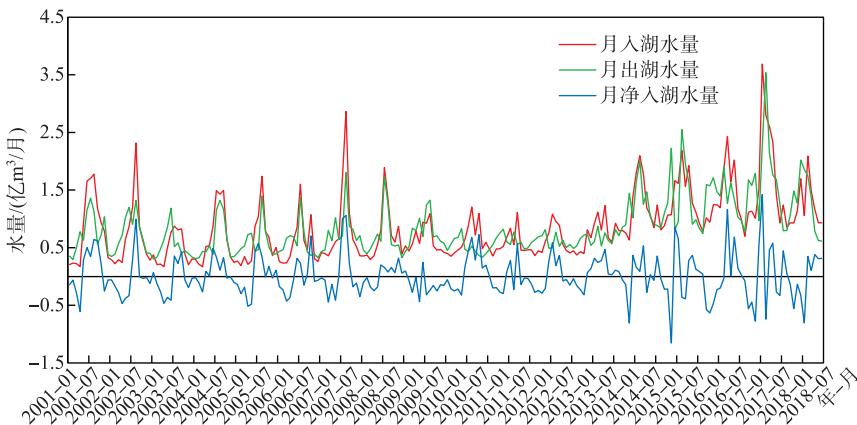


图 5 2001—2018 年滇池外海月出入湖水量和净水量计算结果

Fig.5 Monthly water in-out and net input of Lake Waihai of Lake Dianchi from 2001 to 2018

年最低(118.68 t)。相对入湖磷通量而言,滇池外海出湖磷通量呈先下降后上升变化趋势(图 6b)。多年平均出湖磷通量为 42.25 t/a,其中 2001 年最高(83.70 t),2010 年最低(8.00 t)。入湖磷通量与出湖磷通量变化具有一定的相关性,但并不是严格的对应关系,表明滇池外海出入湖磷通量的驱动因子可能存在差异。基于 Zhang 等对滇池外海河流入湖磷通量的核算,2010—2018 年入湖磷通量范围在 100~300 t 之间,与本研究计算结果一致,表明基于 LOADEST 模型的磷通量输出结果具有较高的可靠性<sup>[18]</sup>。此外,本研究 2003 年出湖磷通量与基于 EFDC 模型模拟结果也表现出一致性<sup>[44]</sup>。

从空间分布上看,滇池外海的外源磷输入主要来自入湖河流,流域内的主要磷贡献区为北部和南部河流区域,且有从南部向北部转移的趋势。柴河片区、盘龙江片区、海河片区是滇池外海入湖磷通量的主要贡献区域,其年平均入湖磷通量分别为 71.24 t/a、60.66 t/a、43.97 t/a,占所有入湖河流磷负荷的 69.8% (图 7a)。2001—2006 年间,入湖磷负荷输入最多的是柴河片区,全流域总量年均占比 40.6%,其次是海河片区,年均占 23.1%。2007—2012 年是盘龙江片区和海河片区,全流域总量年均占比分别为 31.6%、21.0%,2013 年以后主要是盘龙江片区,年均占全流域总量的 32.1% (图 7b)。

### 2.3 滇池外海磷源汇效应的多时间尺度对比

2001—2018 年间,滇池外海在年尺度上表现为磷汇,年平均净磷通量 238.36 t/a (图 8c),2011 年最低(108.54 t),2001 年最高(615.99 t)。在月尺度上也表现为磷汇,平均月净磷通量为 19.86 t/月 (图 8b),最低为 4.34 t/月,最高达 140.63 t/月。在日尺度上绝大部分时间表现为磷汇,但极少数日期(2009 年 7 月、2018 年 6—7 月)表现为磷源;其日平均净磷通量为 0.65 kg/d (图 8a),最低为 -0.27 kg/d,最高达 8.50 kg/d。从

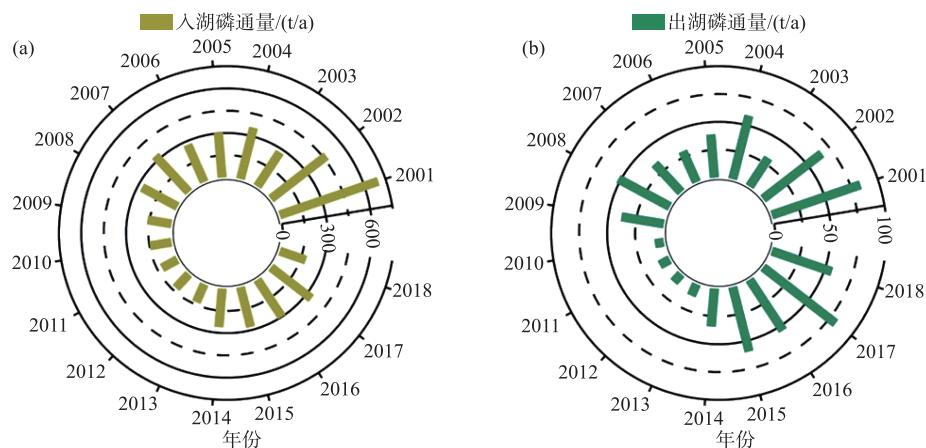


图 6 2001—2018 年滇池外海出入湖磷通量时间变化

Fig.6 Temporal variation of phosphorus flux in and out of Lake Waihai of Lake Dianchi from 2001 to 2018

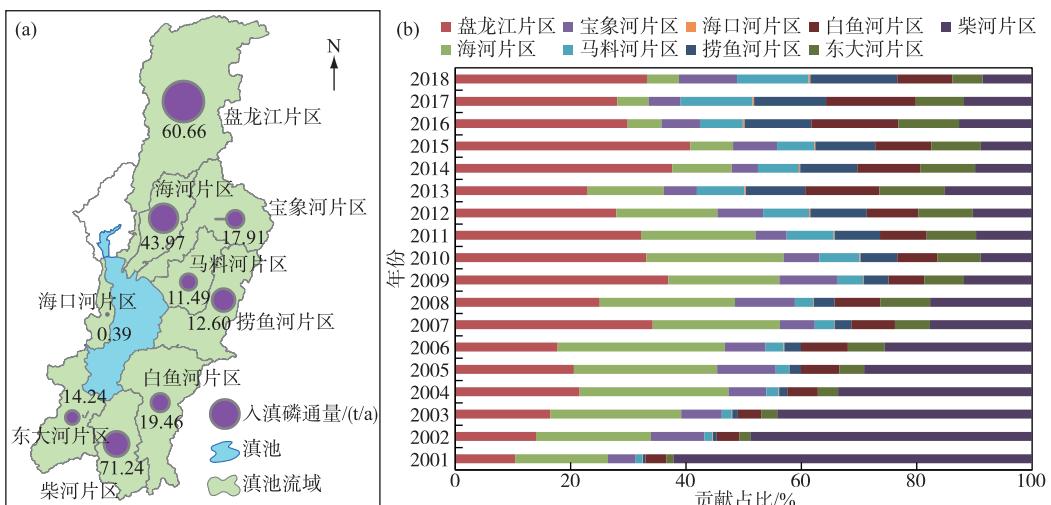


图 7 2001—2018 年入湖河流磷通量空间贡献变化与时间贡献变化

Fig.7 Spatial-temporal variation of river's phosphorus flux into Lake Waihai of Lake Dianchi from 2001 to 2018

逐月和逐年尺度变化看,逐月、逐年净磷通量均为正值,表明滇池外海在此时间尺度下均表现磷汇功能,这与滇池沉积物的环境汇功能研究结果一致<sup>[9]</sup>。

从逐年滞留率变化看,滇池外海磷滞留率多年平均为 85.1%,2010 年滞留率最高 94.6%,2018 年最低 69.5% (图 8d)。湖泊在 2013 年后磷滞留率呈现下降趋势,每年平均下降 4.4%,而 2013 年是牛栏江-滇池补水工程实施的事件,说明调水工程对滇池外海磷累积具有抑制作用,但总体来看湖泊滞留率仍高居 65.0% 以上,而滇池外海的常年磷滞留将增加湖泊的磷释放风险,提高了湖泊富营养化控制的不确定性。

### 3 讨论

#### 3.1 滇池外海源汇效应驱动力分析

通过上述分析可知,滇池外海年、月尺度下表观磷通量均为环境汇,但在逐日尺度上也存在环境源。滇池外海常年以磷汇为主,主要原因是湖泊沉积物可大量吸附上覆水溶解磷,形成比较稳定的有机磷酸钙、残渣态磷及可还原态磷<sup>[45]</sup>。与太湖、洱海等湖泊相比,滇池沉积物磷的本底吸附态磷和最大吸附量均处于较高

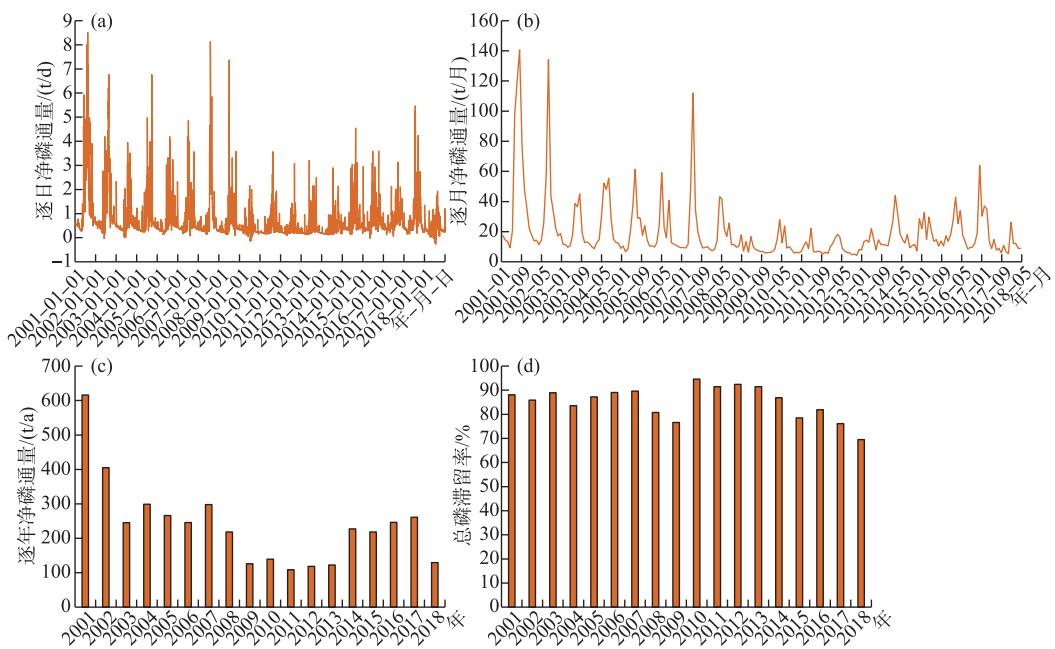


图 8 入湖净磷通量与总磷滞留率时间变化

Fig.8 Temporal variation of phosphorus flux net input and total phosphorus retention in Lake Waihai

水平,磷负荷吞吐量相对较大<sup>[46]</sup>。然而当外源磷负荷输入降低时,气候急剧变化会加大沉积物的释放风险,也会引起湖泊表现磷源功能<sup>[47]</sup>。2001—2018 年日净磷负荷呈单峰波动变化,具有显著的汛期集中特征,整体上与入湖磷负荷具有显著正相关关系,  $R^2$ 高达 0.99,平均相对误差为 16.1%。为分析滇池外海源汇转换的主要驱动力,将逐日净磷通量分别与降水量、气温进行拟合分析。结果显示,日净磷通量与降水量具有相关性,但不严格同步,判定系数仅为 0.47;虽然日净磷通量与气温没有相关关系,但在磷环境源时期,气温总体居高,表明升温可能促进磷的释放,这与洱海的研究结果一致<sup>[48]</sup>。总而言之,降水量对滇池外海汇效应以及气温对滇池外海源效应具有一定驱动作用,但并不显著,这可能受其他主导因素影响,未来有必要进一步研究多重胁迫因子与底泥源汇转换的作用机制。

现有研究表明,湖泊沉积物与上覆水的磷负荷交换是影响湖泊磷通量的一个重要因素,在特定环境下,湖水中的磷可沉降至沉积物或从其中释放,从而显著改变湖泊水体磷浓度<sup>[49]</sup>。当湖泊磷浓度降低时,沉积物可释放磷,直至沉积物与上覆水之间达到一个新的动态界面平衡<sup>[30]</sup>。由于水温和溶解氧是控制内源磷负荷释放速率的主导因子,并且释放速率与温度呈正比,与溶解氧浓度呈反比<sup>[50]</sup>。滇池作为一个典型浅水富营养湖泊,湖泊中磷的沉积和再释放十分普遍。因此在这些环境条件下,滇池磷负荷会表现出源效应。此外,湖泊净出境水量也是影响污染物源汇效应的关键因子,如朱昕阳等分析 2013 年太湖流域浙江片区出入境水量与水质污染通量时,发现出入境水量与水质呈显著相关关系,当出境水量高于入境水量时,其携带的物质通量自然大于入境水量,从而使湖泊表现出物质的源效应<sup>[51]</sup>。

### 3.2 滇池外海出入湖通量变化影响因素

结合出入湖磷通量计算结果可知,滇池外海磷负荷主要来源于北部昆明主城区,东部种植区和南部磷矿富磷区<sup>[52]</sup>。城镇生活源、农业源和水土流失等非点源成为滇池流域的主要磷来源,研究表明城市生活污水引发入湖河流高流量事件是滇池磷负荷大量积聚的一大重要因素<sup>[53]</sup>。受降水冲刷作用,高强度磷输入的农田区域土地流失亦是滇池磷负荷重要来源<sup>[54]</sup>。此外,大量磷矿通过风化的形式进入湖体的磷负荷也相当可观<sup>[52]</sup>。除污染源外,相关研究发现调水与气温指标可显著改变出入湖河流的磷含量,进一步影响湖泊磷内循环过程<sup>[55-56]</sup>。

本研究使用随机森林模型构建2001—2018年日尺度下滇池外海气象水文因子与出、入湖磷通量的响应关系。模拟结果显示,湖泊出、入湖磷通量的主要驱动指标存在差异;气象水文因子对出、入湖磷通量的影响显著( $P<0.05$ ),出、入湖磷通量方差解释率分别为46.5%和61.8%;模型拟合优度总体较好,输出结果可靠。2001—2018年滇池外海出湖磷通量影响最大的是入湖流量及调水量,其次分别是气温、风速、降水量(图9a)。对入湖磷通量影响最大的也是入湖流量及调水量,其次分别是降水量、风速、气温(图9b)。综上,在气象水文因子中,入湖流量和调水量是影响滇池外海出入湖磷通量变化的最主要因素,这与在太湖开展的研究结果一致<sup>[57]</sup>。在入湖磷通量中,降水引起的面源污染仅次于调水量,而在出湖磷通量中,气温因子仅次于调水量,因此降水主要影响磷的入湖过程<sup>[58]</sup>,而出湖通量受到温度驱动的湖泊过程影响更大<sup>[56,59]</sup>。

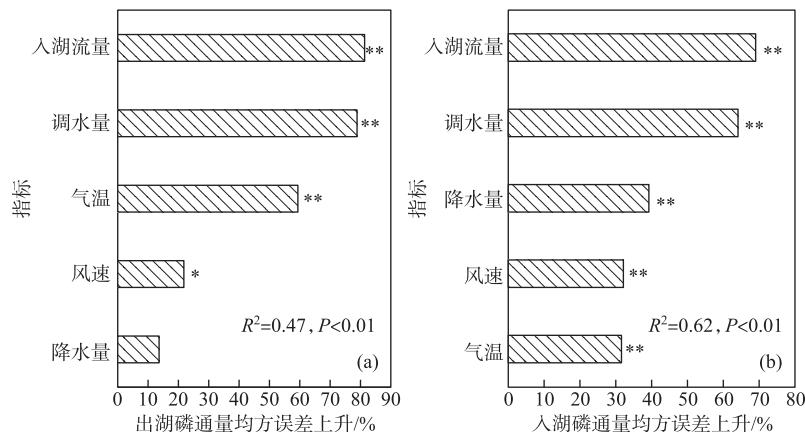


图9 影响滇池外海出入湖磷通量的指标重要性(\* \* 表示显著性  $P<0.01$ , \* 表示显著性  $P<0.05$ )

Fig.9 Importance rank of indicators influencing the phosphorus input and output of Lake Waihai

### 3.3 研究的局限与不确定性

出入湖磷通量核算涉及的计算项目多,数据量大,数据来源复杂,尤其是入湖河流水量和水质数据可靠性是本研究的关键。滇池流域入湖河流水系复杂,加之流域内水利开发历史长、水文观测站点少,获取可靠的入湖水量数据十分困难。本研究为解决这一难题,采用实测数据与模拟数据融合的方法构建滇池外海入湖水量全序列,该方法以当前可获取的数据为基础最大限度推算实际入湖水量,然而由于缺乏真实入湖河流观测值,本研究的计算结果仍然具有不确定性。未来有必要开展全湖层面的系统水量观测,为水量平衡核算和模型模拟提供验证数据,提高水量尤其是逐日尺度入湖流量计算的准确性。此外,长期以来我国水质国控等控制观测断面的采样频率为每月1次,与逐日水文观测相比,频率偏低,在整合水量和水质数据时不可避免采用平均或统计估计,造成通量估算的不确定性。为完善云贵高原湖泊营养盐通量源汇效应的研究,需进一步通过优化模型参数提高模型模拟性能<sup>[60]</sup>。鉴于短期内难以在水文和水质观测上实现全面突破,采用数学模拟手段估算流域营养盐通量具有十分重要的意义。随着卫星遥感、雷达、在线检测等新型数据观测手段的普及应用,未来可依托更多数据源降低通量核算和模型拟合的不确定性。最后,由于数据有限,根据研究区特点,本研究只核算了河湖界面的营养盐通量,其他途径如鱼类捕获、水生植物收割、藻类收获等未计算在内<sup>[61]</sup>,这些项目对滇池外海的出湖通量具有一定贡献。

## 4 结论

1) 2001—2018年滇池外海入湖磷负荷呈现显著时空变化特征。多年平均入湖磷通量为280.61 t/a,以河流为主要途径,占比89.8%,其次是大气沉降28.64 t/a,占比10.2%;滇池外海的磷负荷来源主要分布在北部昆明主城区、东部农田种植区、南部山地磷矿区,近年来表现出从南向北转移的趋势。

2) 滇池外海出湖通量与入湖通量具有相关性,但不严格时间同步。滇池外海出湖磷通量多年平均为42.25 t/a,具有显著的年际波动特征。在气象水文因子中,入湖流量和调水量均为影响滇池外海出入湖磷通

量最主要的因素,降水和气温对入湖磷通量和出湖通量的重要排序不同,主要原因是磷入、出湖通量受流域过程和湖泊过程主导的差异。

3) 在日、月和年多种时间尺度上,滇池外海均表现为磷的环境汇功能,具有显著的磷汇效应。2001—2018 年入湖净磷通量平均为 238.36 t/a, 磷的平均滞留率达到 85.1%, 但在日尺度下存在短暂源效应现象。滇池外海长期磷滞留是湖泊水环境难以有效改善的重要原因,未来会转化为富营养化的风险源。

## 5 参考文献

- [1] Zhao SQ, Dai YR, Wang FH et al. Progress on comprehensive assessment methods of lake ecosystem health. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(12): 98-104. [赵思琪, 代嫣然, 王飞华等. 湖泊生态系统健康综合评价研究进展. 环境科学与技术, 2018, 41(12): 98-104.]
- [2] Ma YQ, Cao W, Zhao YM et al. Eutrophication characteristics, cause analysis and control strategies in a typical plain river network region. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(2): 174-183. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2021.0172. [马迎群, 曹伟, 赵艳民等. 典型平原河网区水体富营养化特征、成因分析及控制对策研究. 环境科学学报, 2022, 42(2): 174-183.]
- [3] Huang MY. Water quality characteristics and pollution load estimation of main rivers around Erhai Lake. *Yangtze River*, 2022, 53(1): 61-66. [黄明雨. 环洱海主要入湖河流水质特征及入湖污染负荷估算. 人民长江, 2022, 53(1): 61-66.]
- [4] Hu XY, Zhu YR, Sun FH et al. Mechanism research of the effects of water quality (nitrogen and phosphorus concentrations) and water volume on eutrophication of Lake Taihu. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(6): 1407-1418. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2021.12.28. [胡晓燕, 朱元荣, 孙福红等. 河流氮磷和水量输入对太湖富营养化的影响机理研究. 环境科学研究, 2022, 35(6): 1407-1418.]
- [5] Gao KW, Zhu YR, Sun FH et al. A study on the collaborative control of water quality of nitrogen and phosphorus between typical lakes and their inflow rivers in China. *J Lake Sci*, 2021, 33(5): 1400-1414. DOI: 10.18307/2021.0509. [高可伟, 朱元荣, 孙福红等. 我国典型湖泊及其入湖河流氮磷水质协同控制探讨. 湖泊科学, 2021, 33(5): 1400-1414.]
- [6] Rong N, Zhou DK, Guo CB et al. Estimation of nitrogen and phosphorus release fluxes from sediments of the Wanghu Lake under different release modes. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(5): 345-354. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2021.0553. [荣楠, 周道坤, 郭灿斌等. 不同释放模式下网湖沉积物氮磷释放通量估算. 环境科学学报, 2022, 42(5): 345-354.]
- [7] Zhang XL, Liu Y, Guo HC. Phosphorus transportation mechanisms and retention effects in lake riparian wetland. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(2): 373-386. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0109. [张晓玲, 刘永, 郭怀成. 湖滨河口湿地中磷的输移转化机制及截留效应研究进展. 环境科学学报, 2016, 36(2): 373-386.]
- [8] Wang H, Chen HX, Xu ZA et al. Variation trend of total phosphorus and its controlling factors in Lake Taihu, 2010–2017. *J Lake Sci*, 2019, 31(4): 919-929. DOI: 10.18307/2019.0421. [王华, 陈华鑫, 徐兆安等. 2010—2017 年太湖总磷浓度变化趋势分析及成因探讨. 湖泊科学, 2019, 31(4): 919-929.]
- [9] Guo L, Yang H, Zhou JM et al. Sediments from Dianchi Lake: A phosphorus sink or source? *Pedosphere*, 2004, (4): 483-490.
- [10] Maranger R, Jones SE, Cotner JB. Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus through the freshwater pipe. *Limnology and Oceanography Letters*, 2018, 3(3): 89-101. DOI: 10.1002/lol2.10080.
- [11] Cheng GW, Du ZP, Yan CA et al. Impacts of water quality monitoring frequency and extreme climate on the estimation of nitrogen and phosphorus fluxes in river of plateau lake basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(11): 3982-3989. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2020.0155. [程国微, 杜展鹏, 严长安等. 水质监测频率与极端气候对高原湖泊入湖河流氮磷通量估算的影响. 环境科学学报, 2020, 40(11): 3982-3989.]
- [12] Xu PZ, Qin BQ. Water quantity and pollutant fluxes of the surrounding rivers of Lake Taihu during the hydrological year of 2001–2002. *J Lake Sci*, 2005, (3): 213-218. DOI: 10.18307/20050304. [许朋柱, 秦伯强. 2001—2002 水文年环太湖河道的水量及污染物通量. 湖泊科学, 2005, (3): 213-218.]
- [13] Yu LY, Yang H, Huang CC et al. Characteristic of nitrogen and phosphorus pollution in Lake Dianchi and its inflow rivers in summer. *J Lake Sci*, 2016, 28(5): 961-971. DOI: 10.18307/2016.0505. [余丽燕, 杨浩, 黄昌春等. 夏季滇池和入滇河流氮、磷污染特征. 湖泊科学, 2016, 28(5): 961-971.]
- [14] Gui JY, Guo R, Song XW et al. Spatio-temporal variations of total nitrogen and total phosphorus in lake and inflow/outflow rivers of Lake Hongze, 2010–2019. *J Lake Sci*, 2021, 33(6): 1727-1741. DOI: 10.18307/2021.0610. [崔嘉宇, 郭蓉, 宋兴伟等. 洪泽湖出入河流及湖体氮、磷浓度时空变化(2010—2019 年). 湖泊科学, 2021, 33(6): 1727-1741.]
- [15] Cao J, Tian ZB, Chu ZS et al. Nitrogen and phosphorus control thresholds of cyanobacterial blooms in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2022, 34(4): 1075-1089. DOI: 10.18307/2022.0403. [曹晶, 田泽斌, 储昭升等. 太湖蓝藻水华暴发的氮磷控制阈值分析. 湖泊科学, 2022, 34(4): 1075-1089.]

- [16] Wang X, Lu XG, Yan BR et al. On the water environmental capacity of Lake Songhua based on eutrophication threshold. *J Lake Sci*, 2006, **18**(5) : 503-508. DOI: 10.18307/2006.0511. [王霞, 吕宪国, 袁伯茹等. 基于富营养化阈值的松花湖水环境容量分析. 湖泊科学, 2006, **18**(5) : 503-508.]
- [17] Xu XM, Wu X, He J et al. Research on the pollution characteristics of Dianchi watershed (1988–2014) and identification of countermeasures. *J Lake Sci*, 2016, **28**(3) : 476-484. DOI: 10.18307/2016.0302. [徐晓梅, 吴雪, 何佳等. 滇池流域水污染特征(1988—2014年)及防治对策. 湖泊科学, 2016, **28**(3) : 476-484.]
- [18] Zhang RF, Luo LC, Pan M et al. Estimations of water volume and external loading based on DYRESM hydrodynamic model at Lake Dianchi. *Water*, 2022, **14**(18) : 2832. DOI: 10.3390/w14182832.
- [19] Yan K, Xu JC, Gao W et al. Human perturbation on phosphorus cycles in one of China's most eutrophicated lakes. *Resources, Environment and Sustainability*, 2021, **4** : 100026. DOI: 10.1016/j.resenv.2021.100026.
- [20] Jin ZF, Chen LX, Li FL et al. Effects of water transfer on water quality and estimation of the pollutant fluxes from different sources into West Lake, Hangzhou City, China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(3) : 1091-1101. DOI: 10.1007/s12665-014-3456-6.
- [21] Li WP, Chen AH, Yu LH et al. Pollutant influx from the main river (Kherlen River) of Lake Hulun in wet seasons, 2010–2014. *J Lake Sci*, 2016, **28**(2) : 281-286. DOI: 10.18307/2016.0206. [李卫平, 陈阿辉, 于玲红等. 呼伦湖主要入湖河流克鲁伦河丰水期污染物通量(2010—2014). 湖泊科学, 2016, **28**(2) : 281-286.]
- [22] Shousha S, Maranger R, Lapierre JF. Different forms of carbon, nitrogen, and phosphorus influence ecosystem stoichiometry in a north temperate river across seasons and land uses. *Limnology and Oceanography*, 2021, **66**(12) : 4285-4298. DOI: 10.1002/lno.11960.
- [23] Liu FG, Wang SG, Guo YY et al. Spatial-temporal variations of pollutant fluxes of inflow and outflow of Lake Poyang (2008–2012). *J Lake Sci*, 2014, **26**(5) : 641-650. DOI: 10.18307/2014.0501. [刘发根, 王仕刚, 郭玉银等. 鄱阳湖入湖、出湖污染物通量时空变化及影响因素(2008—2012年). 湖泊科学, 2014, **26**(5) : 641-650.]
- [24] He XJ, Sun YJ, Wang B et al. Variation of water quantity, quality and pollutant flux of inflow and outflow rivers to Lake Taihu in Zhejiang Province, 2007–2019. *J Lake Sci*, 2021, **33**(5) : 1425-1435. DOI: 10.18307/2021.0527. [何锡君, 孙英军, 王贝等. 浙江省出入太湖河道水量水质及污染物通量变化(2007—2019年). 湖泊科学, 2021, **33**(5) : 1425-1435.]
- [25] Cai M, Qian X, Wang YY et al. Phosphorus cycle and its influencing factors in different areas of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2022, **34**(5) : 1493-1504. DOI: 10.18307/2022.0507. [蔡梅, 钱旭, 王元元等. 太湖入、出湖湖区磷的特征及其影响因素分析. 湖泊科学, 2022, **34**(5) : 1493-1504.]
- [26] Kalinin A, Covino T, McGlynn B. The influence of an in-network lake on the timing, form, and magnitude of downstream dissolved organic carbon and nutrient flux. *Water Resources Research*, 2016, **52**(11) : 8668-8684. DOI: 10.1002/2016WR019378.
- [27] Zhou J, He D, Xie YF et al. Integrated SWAT model and statistical downscaling for estimating streamflow response to climate change in the Lake Dianchi watershed, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015, **29**(4) : 1193-1210. DOI: 10.1007/s00477-015-1037-1.
- [28] Duan ZZ, Wang MJ, Gao W et al. Extreme precipitation and the responds of water quality in Lake Dianchi Basin between 1951–2017. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(2) : 615-622. [段仲昭, 王明净, 高伟等. 1951—2017年滇池流域极端降水变化及湖体水质响应. 环境科学学报, 2020, **40**(2) : 615-622.]
- [29] Sun JH, Cao XF, Huang Y. Relationships between spatial-temporal trends of water quality and the human activities in Lake Dianchi. *J Lake Sci*, 2012, **24**(3) : 347-354. DOI: 10.18307/2012.0304. [孙金华, 曹晓峰, 黄艺. 滇池水质时空特征及与流域人类活动的关系. 湖泊科学, 2012, **24**(3) : 347-354.]
- [30] He J, Chen CY, Deng WM et al. Distribution and release characteristics of phosphorus in water-sediment interface of Lake Dianchi. *J Lake Sci*, 2015, **27**(5) : 799-810. DOI: 10.18307/2015.0506. [何佳, 陈春瑜, 邓伟明等. 滇池水-沉积物界面磷形态分布及潜在释放特征. 湖泊科学, 2015, **27**(5) : 799-810.]
- [31] Wu C, Hao ZC, Wang GQ et al. Applying HBV model to simulate hydrological process simulation of the Mudan River Basin. *China Rural Water and Hydropower*, 2017, (5) : 105-109. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2017.05.024. [吴辰, 郝振纯, 王国庆等. 基于HBV模型的牡丹江流域的水文过程模拟研究. 中国农村水利水电, 2017, (5) : 105-109.]
- [32] Lu YY, Tian H. Mechanism-oriented approach for estimating critical rainfall of flood disaster: A case study based on HBV model. *Meteorological Monthly*, 2015, **41**(6) : 755-760. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.05.010. [卢燕宇, 田红. 基于HBV模型的淮河流域洪水致灾临界雨量研究. 气象, 2015, **41**(6) : 755-760.]
- [33] Jin HY, Ju Q, Xie JY. The application of HBV model in the Nyang River Basin. *China Rural Water and Hydropower*, 2019, (6) : 23-28. [金浩宇, 鞠琴, 谢季遥. HBV模型在尼洋河流域的应用研究. 中国农村水利水电, 2019, (6) : 23-28.]
- [34] Wang MJ, Du ZP, Duan ZZ et al. Estimating the eco-environmental water demand of a river and lake coupled ecosystem: A case study of Lake Dianchi Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(4) : 1341-1348. DOI: 10.5846/stxb201908121685. [王明净, 杜展鹏, 段仲昭等. 河湖生态系统生态用水优化研究——以滇池流域为例. 生态学报, 2021, **41**(4) : 1341-1348.]
- [35] Zhao HY, Zhang YL, Wang ZW et al. Threshold of precipitation for Qinhe River Basin flood based on HBV model. *Research of Soil and*

- Water Conservation*, 2015, **22**(5): 74-78. [赵海燕, 张亚琳, 王志伟等. 基于 HBV 模型确定沁河流域洪涝致灾临界雨量. 水土保持研究, 2015, **22**(5): 74-78.]
- [36] Gao W, Chen Y, Yan CA et al. Source identification of phosphorus in various disturbed rivers based on LAM model. *Environmental Engineering*, 2022, **40**(6): 55-62. DOI: 10.13205/j.hjgc.202206007. [高伟, 陈岩, 严长安等. 基于 LAM 模型的多干扰特征河流磷污染源解析. 环境工程, 2022, **40**(6): 55-62.]
- [37] Svetnik V, Liaw A, Tong C et al. Random forest: A classification and regression tool for compound classification and QSAR modeling. *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, 2003, **43**(6): 1947-1958. DOI: 10.1021/ci034160g.
- [38] Li HH, Huang YM, Guo W et al. Influence of land use and land cover patterns on water quality at different spatio-temporal scales in he-huang valley. *Environmental Science*, 2022, **43**(8): 4042-4053. [李好好, 黄懿梅, 郭威等. 河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响. 环境科学, 2022, **43**(8): 4042-4053.]
- [39] Breiman L. Random forests. *Machine Learning*, 2001, **45**(1): 5-32. DOI: 10.1023/A:1010933404324.
- [40] Wang YX, Wang FE, Yu J. Self-organizing map random forest coupling model based spatial heterogeneity evaluation of water quality in the watershed. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(6): 2278-2285. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2019.0471. [王一旭, 王飞儿, 俞洁. 基于自组织映射与随机森林耦合模型的流域水质空间差异性评估. 环境科学学报, 2020, **40**(6): 2278-2285.]
- [41] Gao W, Cheng GW, Yan CA et al. Identifying spatiotemporal alteration of nitrogen to phosphorus ratio of Lake Dianchi and its driving forces during 1988–2018. *J Lake Sci*, 2021, **33**(1): 64-73. DOI: 10.18307/2021.0105. [高伟, 程国微, 严长安等. 1988—2018 年滇池氮磷比的时空演变特征与原因解析. 湖泊科学, 2021, **33**(1): 64-73.]
- [42] Ren JG, Jia HB, Jiao LX et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus formation in atmospheric deposition in Dianchi Lake and their contributions to lake loading. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 582-589. DOI: 10.13227/j.hjkx.201805002. [任加国, 贾海斌, 焦立新等. 滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献. 环境科学, 2019, **40**(2): 582-589.]
- [43] Liu JX, Li LJ, Li JY et al. An analysis on the spatio-temporal variability of precipitation in Dianchi Basin. *Journal of Geo-information science*, 2015, **17**(4): 451-461. DOI: 10.3724/SP.J.1047.2015.00451. [刘佳旭, 李丽娟, 李九一等. 滇池流域降水时空变异特征分析. 地球信息科学学报, 2015, **17**(4): 451-461.]
- [44] Zou R, Wu Z, Zhao L et al. Nutrient cycling flux of Lake Dianchi: A three-dimensional water quality modelling approach. *J Lake Sci*, 2017, **29**(4): 819-826. DOI: 10.18307/2017.0405. [邹锐, 吴桢, 赵磊等. 湖泊营养盐通量平衡的三维数值模拟. 湖泊科学, 2017, **29**(4): 819-826.]
- [45] Ding S, Liu Y, Dan SF et al. Historical changes of sedimentary P-binding forms and their ecological driving mechanism in a typical “grass-algae” eutrophic lake. *Water Research*, 2021, **204**: 117604. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117604.
- [46] Chen CY, Xu XM, Deng WM et al. Characteristics of phosphorus adsorption on surface sediments of Dianchi Lake. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(12): 3065-3075. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0709. [陈春瑜, 徐晓梅, 邓伟明等. 滇池表层沉积物对磷的吸附特征. 环境科学学报, 2014, **34**(12): 3065-3075.]
- [47] Chen QY, Ni ZK, Wang SR et al. Climate change and human activities reduced the burial efficiency of nitrogen and phosphorus in sediment from Dianchi Lake, China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **274**: 122839. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122839.
- [48] An GY, Guo ZC, Ye P. Climatic changes and impacts on water quality of Erhai Lake in Dali area, Yunnan Province over the period from 1989 to 2019. *Geoscience*, 2022, **36**(2): 406-417. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2021.102. [安国英, 郭兆成, 叶佩. 云南大理地区 1989—2019 年期间气候变化及对洱海水质的影响. 现代地质, 2022, **36**(2): 406-417.]
- [49] Liu XT, Liu J, Wang YB et al. Phosphorus cycling in the sediment-water system controlled by different dissolved oxygen level of overlying water. *Environmental Science*, 2022, **43**(12): 5571-5584. DOI: 10.13227/j.hjkx.202201245. [刘笑天, 刘军, 王以斌等. 不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环. 环境科学, 2022, **43**(12): 5571-5584.]
- [50] Pei JY, Feng MQ. Effects of environmental factors on the release of nitrogen and phosphorus from the sediment of the Yanming Lake, China. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, **14**(12): 3447-3459. DOI: 10.12030/j.cjee.201912021. [裴佳瑶, 冯民权. 环境因子对雁鸣湖沉积物氮磷释放的影响. 环境工程学报, 2020, **14**(12): 3447-3459.]
- [51] Zhu XY, Jiang CP, Ma XY et al. Water quantity, quality and pollutant flux of inbound and outbound water in Zhejiang area of Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2020, **32**(3): 629-640. DOI: 10.18307/2020.0304. [朱昕阳, 蒋彩萍, 马晓雁等. 太湖流域浙江片区出入境水量、水质及污染物通量. 湖泊科学, 2020, **32**(3): 629-640.]
- [52] Xia XH, Dongye MX, Zhou JM et al. Geochemistry and influence to environment of phosphorus in modern sediment in Dianchi Lake. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, (3): 416-420. [夏学惠, 东野脉兴, 周建民等. 滇池现代沉积物中磷的地球化学及其对环境影响. 沉积学报, 2002, (3): 416-420.]
- [53] Chen QF, Chen AQ, Ye YX et al. Effects of land use change on shallow groundwater quality in the Dianchi Lake Basin in recent 20 years. *China Environmental Science*, 2022, **38**(6): 183-191. [陈清飞, 陈安强, 叶远行等. 滇池流域近 20 年土地利用变化对浅层地下水水质的影响. 中国环境科学, 2022, **38**(6): 183-191.]
- [54] Zeng XL, Wang TT, Luo WS et al. Characteristics and simulation of rainfall runoff and nitrogen & phosphorus outputs in facility agricultural

- area: a case study of flower greenhouse region in the east coast of Lake Dianchi. *J Lake Sci*, 2017, **29**(5): 1061-1069. DOI: 10.18307/2017.0504. [曾晓岚, 王涛涛, 罗万申等. 设施农业生产区降雨径流和氮磷输出特征及模拟——以滇池东岸花卉大棚种植区为例. 湖泊科学, 2017, **29**(5): 1061-1069.]
- [55] Li ZL, Zhang QQ, Gao K et al. Hydrological simulation and nitrogen and phosphorus load estimation of inflow rivers to Yuqiao Reservoir based on GWLF model. *Environmental Monitoring in China*, 2021, **37**(6): 127-135. DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2021.06.14. [李泽利, 张庆强, 高楷等. 基于GWLF模型的于桥水库入库河流水文模拟及氮磷负荷估算. 中国环境监测, 2021, **37**(6): 127-135.]
- [56] Kenneth JG, Thomas BB. Effect of temperature on phosphorus flux from anoxic western Lake Erie sediments. *Water Research*, 2020, **182**: 116022. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116022.
- [57] Li QF, Xu SH, Chen QH et al. Analysis on the variation of total phosphorus concentrations and loads of inflow and out-flow rivers from different water resources zones around Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2022, **34**(1): 74-89. DOI: 10.18307/2022.0108. [李琼芳, 许树洪, 陈启慧等. 环太湖各水资源分区入出湖河流总磷浓度与负荷变化分析. 湖泊科学, 2022, **34**(1): 74-89.]
- [58] Lian XQ, Zhu GW, Yang WB et al. Effect of heavy rainfall on nitrogen and phosphorus concentrations in rivers at river-net plain. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4970-4980. DOI: 10.13227/j.hjkx.202003183. [连心桥, 朱广伟, 杨文斌等. 强降雨对平原河网区入湖河道氮、磷影响. 环境科学, 2020, **41**(11): 4970-4980.]
- [59] Wu YH, Wen YJ, Zhou JX et al. Phosphorus release from lake sediments: Effects of pH, temperature and dissolved oxygen. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2014, **18**(1): 323-329. DOI: 10.1007/s12205-014-0192-0.
- [60] Sun MX, Chen YF, Wang AQ. Sensitivity analysis of HBV model parameters based on Morris method. *Water Resources and Power*, 2020, **38**(2): 40-43. [孙梦醒, 陈元芳, 王安琪. 基于Morris法的HBV模型参数敏感性分析. 水电能源科学, 2020, **38**(2): 40-43.]
- [61] Zhai SH, Zhou Y, Cheng YH et al. Calculation of total phosphorus loads from rivers around Lake Taihu and analysis of total phosphorus fluctuation in the lake in 2015–2016. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 48-57. DOI: 10.18307/2020.0105. [翟淑华, 周娅, 程媛华等. 2015—2016年环太湖河道进出湖总磷负荷量计算及太湖总磷波动分析. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 48-57.]