文章编号：1672-3031(2021)03-0281-09

洱海水动力特性与入湖污染物迁移扩散规律研究

马 巍[1]，周 云[2]，苏建广[2]，蒋汝成[2]，胡新启[1]
（1. 中国水利水电科学研究院 水生态环境所，北京 100038；2. 云南省水利水电勘测设计研究院 规划分院，云南 昆明 650021）

摘要：洱海是大理白族人民的母亲湖，具有浅水湖泊的水流特点。受风生湖流形态、环流结构及其空间分布差异性影响，洱海入湖污染物呈现水力停留时间长、输移扩散缓慢、北部湖湾藻类易出现富集等特点，并在自北向南、自西向东输移扩散过程中不断向湖底累积并形成内源污染，同时洱海水质受雨季降雨径流携带大量点面源负荷入湖及湖泊拦蓄雨季雨污水影响显著，从而形成目前洱海湖区水质北部高-中间低-南部稍高、西边高-东边略低及雨季水质快速变差的时空分布格局，因此加强流域面源污染治理、减少高浓度初期雨污水入湖，并尽快实施外流域引水以改变目前洱海因水资源短缺形势下的“蓄浑排清”调度运行方式，是近期快速推进洱海整体水质达标并减缓雨季水质快速变差的关键所在。

关键词：水动力特性；污染物；迁移扩散规律；水质；时空分布特征；洱海
中图分类号：TV213.4 **文献标识码**：A **doi**：10.13244/j.cnki.jiwhr.20200043

1 研究背景

洱海是云南九大高原湖泊中的第二大淡水湖，优美的自然环境和良好的水生态质量为大理白族人民的世代繁衍生息提供了重要的安全保障，并孕育了优秀的白族文化，留下了“大理古城”历史文化遗迹和“云南印象”等诸多文化名片，洱海已成为云南蜚声海内外的旅游胜地。但伴随近30年来湖区经济的快速崛起和旅游业的蓬勃发展，流域自然资源的不合理开发利用问题日益突出，从而使得洱海水质逐渐变差[1]、湖泊水生态系统严重退化[2]、水体富营养化进程逐步加快[3-4]。国内外许多学者针对洱海水质及其富营养化演变等都进行了大量的研究[1-4]，同时采用EFDC模型对洱海湖流特性及湖泊水质与水生态模型做了初步探讨[5-6]，但对风场驱动作用下的洱海湖流形态、环流结构、入湖污染物迁移扩散规律及其时空分布特征等方面研究有待进一步深入，尤其是在新时代治水新思路“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的指引下，流域“两违”整治、村镇“两污”整治、面源污染减量、节水治水生态修复、截污治污工程提速、流域执法监管、全民保护洱海(简称“七大行动”)等措施在快速有序推进和落实，洱海水质近期也出现了一些可喜变化。因此，本文结合近年洱海保护治理措施下的水质监测数据及其环境背景条件，基于数学模型仿真技术研究洱海的水动力特性及入湖污染物的迁移扩散规律，分析洱海水质年内时空分布特征，揭示洱海北部湖湾藻类聚集及藻类水华发生风险的驱动机制，以期为洱海流域水环境综合治理和湖泊水生态修复与保护中长期规划提供科学依据。

2 研究区概况

洱海地处云南省大理白族自治州中心地带，隶属澜沧江流域一级支流黑惠江的支流，是大理市和周边城乡居民生产生活用水的供给源地。洱海形似耳状，略呈狭长形，南北长42.5 km，东西宽

收稿日期：2020-04-08；网络首发时间：2021-03-27
网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20210325.1006.004.htm
基金项目：国家重点研发计划(2017YFC0505305)
作者简介：马巍(1976-)，博士，正高级工程师，主要从事水环境模拟、水生态修复与调控研究。E-mail：79658466@qq.com

5.9 km，湖岸线长128 km，呈北北西一南南东向展布(见图1)。洱海最高水位1966.00 m，对应蓄水容量29.59亿m^3，法定最低运行水位1964.30 m，对应蓄水容量25.3亿m^3[7]。洱海最大湖泊水面面积252 km^2，最大水深21.3 m，平均水深10.6 m，流域面积2565 km^2。

洱海流域属亚热带高原季风气候，年均气温15.1℃，多年平均降水量为1060 mm，湖面多年平均蒸发量为1208 mm。洱海水量补给主要为大气降水和入湖径流，环湖周边主要入湖河流有29条(洱海水系见图1)，其中北部为洱源和邓川盆地，主要入湖河流有弥苴河、永安江、罗时江(简称“北三江”)，入湖水量约占54.0%；西部为藏滇褶皱系，点苍山屏列于洱海西岸，主要入湖河流有苍山十八溪及棕树河，入湖水量约占27.2%；东部有凤尾箐、玉龙河、南村河、下和箐，入湖水量约占0.2%；南部入湖河流有波罗江、白塔河，入湖水量约占3.8%。湖周主要入湖沟渠有125条，大多分布在洱海西部苍山区域，入湖水量约占14.8%。洱海有两个出口，分别是位于南部的西洱河及东南角的引洱入宾出湖隧洞，其中西洱河多年平均出湖水量6.97亿m^3，引洱入宾隧洞自1994年建成以来多年平均引水量0.71亿m^3。

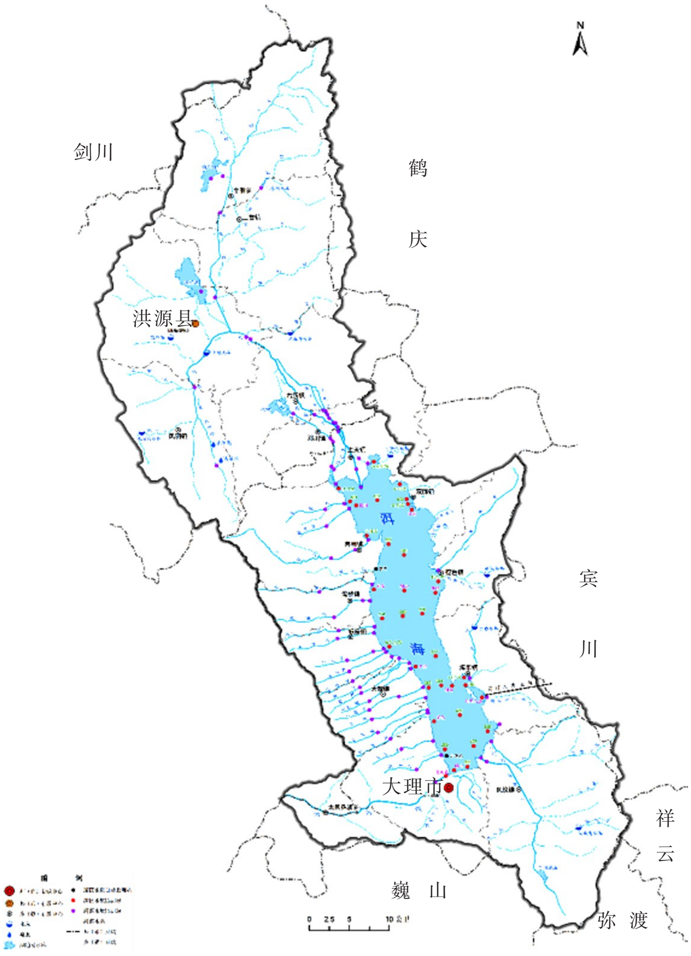


图1　洱海流域水系及水质监测站点示意图

3　数据来源和研究方法

3.1　数据来源　水质数据主要来自大理白族自治州环境监测站、大理市环境监测站2016、2018年湖区17个水质监测站点逐月水质监测资料和2016、2018年洱海主要入湖河流逐月水质监测资料，水质指标主要包括化学需氧量(COD)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH_3-N)、透明度和叶绿素等。水量数据主要来自于大理白族自治州水文水资源局编制《洱海水资源监测评价年

报》，降雨、蒸发及风场资料主要来自于国家气象局网站下载的大理州国控站数据。

3.2 研究方法 流场是湖泊中物质输移运动的主要载体，因而流场研究一直受到湖泊研究者高度重视。由于湖流运动缓慢，风是湖流运动的主驱动力且易受风场变化影响，导致大规模的湖流观测相对困难，因此数学模型近年来被广泛地运用于各类水体动力学与水质迁移扩散的研究。

洱海东临玉案山，西及点苍山，处于北北西一南南东走向的峡谷中，湖面风场受到湖周山势影响气流运动具有明显的方向性，同时峡谷中无凸出山体遮挡，故湖面可采用均匀风场条件。根据国内外大量浅水湖泊的研究成果[8-11]表明，风是洱海湖流运动的主驱动力，其水流运动以风生流为主，入湖污染负荷在风生湖流和吞吐流的共同驱动下完成湖内的输移扩散。洱海属大型中偏浅水型湖泊，其风生湖流及入湖污染物在湖体中的迁移扩散可用平面二维水流运动方程和对流扩散方程进行数学描述[8-9,12]，其中模拟指标重点选择近期影响洱海水质类别变化的COD、COD_{Mn}、TP、TN4项。各类特征污染物指标的生化反应项均可作一级简化处理，其中COD、COD_{Mn}考虑自净衰减并通过自净衰减系数和内源释放速率反映；TP、TN考虑各种物理、化学及生物因素引起的自然净化与内源释放，通过综合自净和释放系数反映。

采用矩形网格(250 m×250 m)对洱海湖体进行计算单元划分(合计3969个)，采用变量交错布置的方式在计算网格上对上述方程进行离散，其中对流项采用迎风格式，扩散项采用中心差分，用迭代法求解离散方程组。洱海出入湖河道按照流域水系分布(见图1)和取用水情况概化为30条入湖河道、2条出湖河道和8个取水口，同时利用洱海2016年和2018年湖内17个常规水质监测点(见图1)每月一次的水质监测数据和同期的水位、流量、水质及气象数据资料，对洱海水动力与水质模型进行了参数率定与模型校验，其中2016年数据用于模型参数率定，2018年数据用于模型验证。结果(见图2、图3)表明，洱海水动力与水质模型能够较好地反映洱海的环流形态与入湖污染物的时空变化特征，模拟结果具有较高的精度，水动力与水质模型可为水情变化条件下的洱海湖流、湖泊水质时空分布模拟提供科学的技术手段。

图2 洱海流场图(东南偏东风)

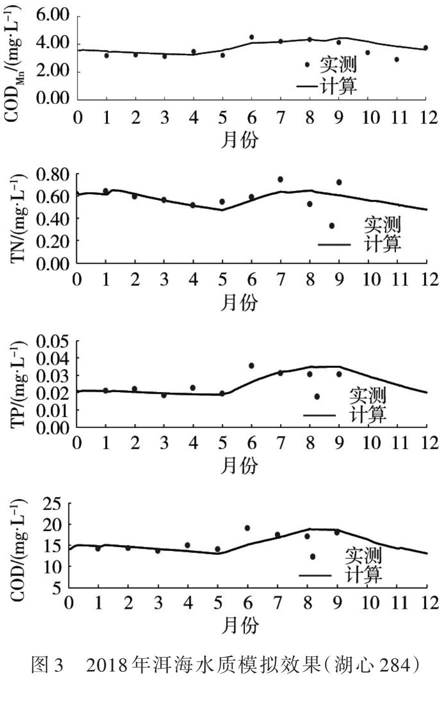


图3 2018年洱海水质模拟效果(湖心284)

4 洱海水动力特性

4.1 洱海水流特点 洱海湖泊运动的主要驱动因素包括风、科氏力、垂向水温差异等，其中风场是洱海水流运动的主驱动力。作为大型中偏浅水型湖泊，具有浅水湖泊的水流特点，如风生流、风涌

水、大范围环流、入湖河流水流、湖滨沿岸带植物中的水流和小范围涡流等，其中风生流与科氏力共同作用下形成的大范围环流在洱海湖流中占绝对主导地位；当洱海湖面持续的单向风场发生时会将洱海表层水推向下风端，则在下风端形成下沉，在上风端形成上涌，从而出现风涌水。尽管洱海湖滨沉水植被分布面积由1980年代的约40%下降至目前的约10%[2]，但这些湿生植物仍将影响湖泊的流体动力，特别是临近湖岸的水流，即减少湍流和湖岸与开放水域的横向交流，并导致沉水植物区和开放水域之间存在密度差，进而造成局部区域水流[8]。

4.2 洱海水动力特性 洱海主要入湖河流29条，呈向心状注入湖泊，西洱河是洱海唯一的天然出口，引洱入宾隧洞是洱海向宾川供水的出湖通道。洱海常年蓄水量介于25.34～29.59亿m^3之间，年均蓄水湖容超过27亿m^3，而洱海年入湖水量仅约5.6亿m^3，入湖水量在湖泊内的停留时间将长达5年之久，故洱海湖水置换周期长，湖流十分缓慢，并受西洱河节制闸调控影响已逐步演变成半封闭的人工调节湖泊。同时结合洱海流域水污染防治与洱海水质保护需要，环湖截污工程实施将进一步减少洱海入湖水量，湖泊的水动力条件将被进一步削弱。

受洱海流域北北西—南南东走向的峡谷地势特征影响，洱海湖面风场相对较为稳定(风向玫瑰图见图4)，夏秋季(6—11月)以东风(含东南偏东风、东南风)为主，季节内主导风向均在较小的范围(≤45°区间)内变化；冬春季(12月—次年4月)以西南偏西风为主，因此受风驱动影响的洱海湖流形态和环流结构呈现明显的季节性变化特征，同时年内不同风场条件下的月均风速变化不大(2.55～2.76 m/s)。

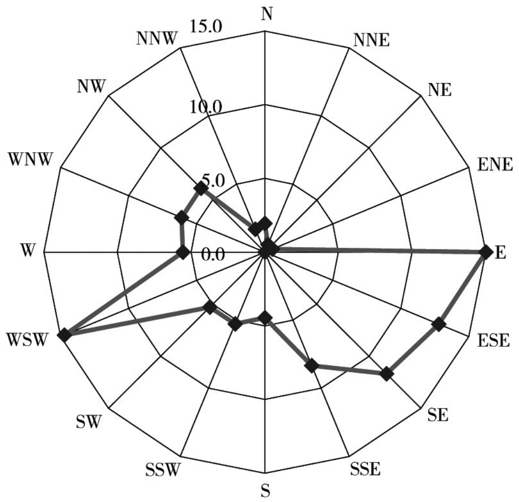


图4 2018年洱海风向玫瑰图

在常年主导风场(东风，月均风速为2.55～2.68 m/s)作用下，洱海湖区自北向南依次形成了逆-顺-逆-顺-顺-逆时针等6个环流(见图5)，其中挖色湾所在的逆时针环流最为发育，影响范围广泛，并影响了北部两个顺-逆时针环流和中南部向阳湾北部顺时针环流的发育；受海东镇凸出地形和风场共同作用影响，在向阳湾附近的洱海东西岸最窄处出现了明显的弱流区，不利于洱海中部与南部湖区水量与污染负荷的交换，东风风场条件下洱海全湖平均流速为1.50 cm/s，自北向南8个分区的湖流流速介于1.10～1.90 cm/s，其中喜洲湾湖流流速相对最大，而向阳湾北侧的弱流区流速相对最小。

在常年次主导风场(西南偏西风，月均风速为2.59～2.76 m/s)作用下，洱海湖面风场较西南风继续向东偏移，与湖泊地理走向间的夹角进一步加大，洱海湖区自北向南依次形成了顺-逆-顺-逆-顺时针等5个环流(见图6)，其中洱海北部(含沙坪湾、海潮湾)湖区以顺时针环流为主导；洱海中部的挖色湾以大型的逆时针环流为主导，在中部与北部湖区连接带区(喜洲湾)形成了2个顺-逆时针补偿小环流；洱海南部湖区湖流仍以顺时针环流为主导；受海东镇凸出地形和风场共同作用影响，在向阳湾附近的洱海东西岸最窄处仍存在一个弱流区，不利于洱海中部与南部湖区水量与污染负荷的交换。西南偏西风场条件下洱海全湖平均流速为1.50 cm/s，自北向南8个分区的湖流流速介于1.20～

2.00 cm/s，其中喜洲湾湖流流速相对最大(2.00 cm/s)，而向阳湾北侧的弱流区和北部湖区南侧流速仍相对最小(1.20 cm/s)。

图5　洱海流场图(东风)

图6　洱海流场图(西南偏西风)

综上，洱海的常年主导风向(东风和西南偏西风)均与洱海湖泊自然走向存在较大的夹角，在以风场为主驱动力的湖流结构中，洱海湖流形成相对独立的北、中、南3个湖区(见图5、图6)，尤其是中部和南部湖区在向阳湾附近的洱海东西岸最窄处常形成一个弱流区，从而对入湖污染物的自北向南输移扩散十分不利，易出现洱海北部湖区水质相对最差、南部次之和中部偏南湖区水质相对最好的局面。同时多雨的夏秋季(6—11月)和少雨的冬春季(12月至次年5月)其出入湖河道径流对洱海湖流形态和环流结构均无明显影响，但出入湖河道径流年内变化对出入湖河口区流态有较为明显影响，如西洱河出湖口。

5　洱海入湖污染物迁移扩散规律

洱海属于大型中偏浅水湖泊，风是湖流运动的主驱动力，入湖污染物在风生湖流驱动及携带下参与全湖物质循环与交换。入湖污染物在洱海湖泊内的迁移扩散特征及其时空分布特性，不仅受湖泊环流形态影响与控制，而且与入湖污染物的时空分布特征密切相关，同时亦受湖泊调度运行方式影响。

5.1　入湖污染负荷时空分布特征　洱海流域氮磷及有机污染物以城镇生活与农业农村面源污染为主，主要通过入湖河流和农灌排水沟渠入湖，年内主要集中在雨季(6—10月)入湖。据估算，2018年(水文频率 P=45%，属平水年)洱海全年入湖的COD、TP、TN负荷量分别为10919 t、131 t、1541 t(其年内分布见图7)。从年内分布特征看，雨季入湖负荷约占79.0%～84.8%，非雨季节仅占15.2%～21.0%；从空间分布特征看，北三江入湖负荷约占38.7%～49.3%，西岸苍山十八溪入湖负荷约占45.3%～54.7%，南部和东岸入湖负荷合计约占5.4%～11.6%；从污染物来源组成看，农业农村面源负荷约占49.4%～62.0%，环湖截污后入湖的点源负荷约占15.0%～26.4%，湖面干湿沉降负荷约占23.0%～24.1%。因此来源于北三江和苍山十八溪片区的大量点面源随降雨径流集中入湖是近年来洱海水质超标的关键环境因素，同时也是影响洱海水质年内分布过程的决定性因素。

入湖污染物总量及其年内分布过程是影响洱海水质是否达标的关键因素，同时洱海入湖污染物的空间分布特征也将对湖区水质空间分布产生重要影响。对比分析2018年洱海北部北三江、洱海西

部苍山18溪和南部2河年内入湖水质(见图8)表明，北三江和南部2河的COD和TP浓度明显高于苍山18溪，但苍山18溪来水的TN浓度较北部和南部河流差，这与18溪河流流程相对很短且入湖前多经过大面积的农业耕作区关系密切。洱海分区河流年内水质差异性比较结果说明，调整农业种植结构以减少化肥施用及水土流失中的肥效损失，以及在农业耕作区与湖滨带衔接区建设生态调蓄带等水污染防治措施是非常必要的，对控制农田面源产生及氮磷流失、减少高浓度初期雨污水入湖均具有十分重要的作用。

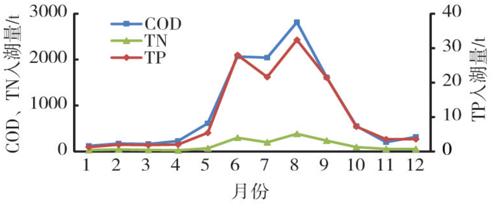


图7　2018年洱海入湖污染负荷年内分布过程

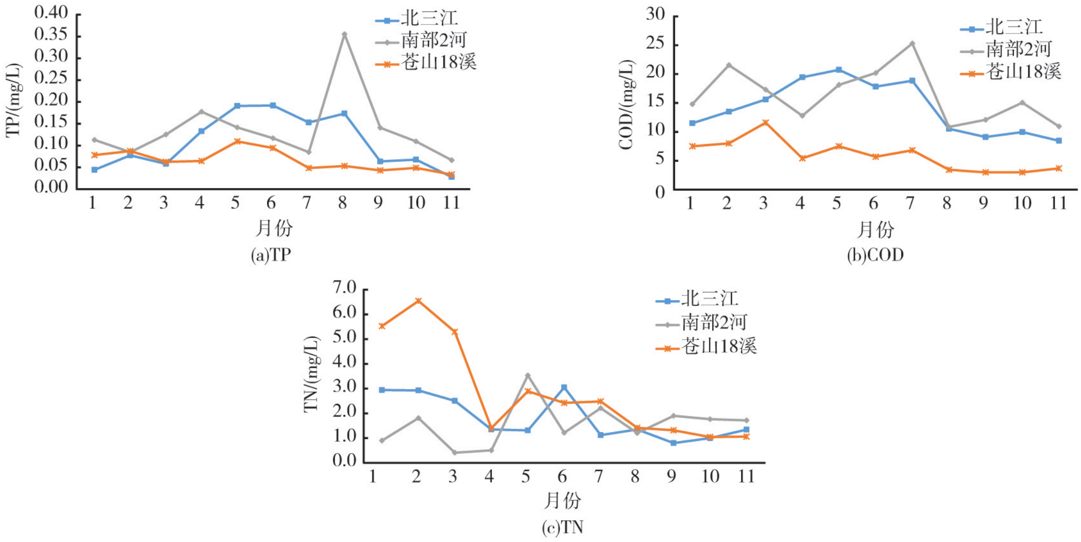


图8　2018年洱海分区河流入湖水质年内变化过程

5.2　洱海入湖污染物迁移扩散特征　受地理位置、流域面积大小、湖泊容积及社会经济活动等多方面因素影响，洱海流域入湖污染物在湖泊内的迁移扩散过程有以下几个特点：

(1)洱海湖容大、湖泊换水周期长，不利于入湖污染物外排。2016—2018年洱海出入湖水量均约为6亿m^3左右，同时期洱海蓄水库容超过27亿m^3，在不考虑湖面蒸发损失条件下，洱海湖泊水体的换水周期长达5年之久，主要从洱海北部(北三江)和西岸(苍山十八溪)入湖的大量污染负荷在诸多环流的水力驱动和携带作用下自北向南输移扩散过程中，大量的氮、磷负荷沉积到湖底，并逐步累积成为内源，洱海流域的自然环境条件十分不利于入湖污染物的顺利外排。如2018年全年入湖的COD、TN、TP负荷量分别为10919 t、1541 t、131 t，经西洱河、引洱入宾隧洞出湖的COD、TN、TP负荷量分别为9372 t、360 t、18 t，3指标的滞湖比分别为14.2%、76.6%和86.2%，即有超过76%的总氮和86%的总磷负荷沉积于湖底或被水生生物、陆生植物吸收。

(2)湖泊水质受流域降雨量影响显著，且无明显的滞后效应。根据洱海流域降雨量、逐月入湖水质资料和洱海年内水质变化过程(见图9)可知，在降雨量相对稀少的11月—次年5月，洱海各项水质指标(主要包括COD、COD_{Mn}、TP、TN等)浓度较低且变化均较为平缓，基本均满足湖泊Ⅱ类水质标准(其中TN不参评)；5月中下旬逐步进入雨季，大量的农田面源污染和农灌沟渠中累积的点源负荷跟随降雨径流入湖，从而导致5—6月份洱海水质出现明显的跳跃，随后的7、8、9月洱海水质均保持在一个相对较高的水平，与流域的降雨量水平呈现较好的一致性(见图10)，并随着雨季的结束，10月份以后洱海水质又快速好转。

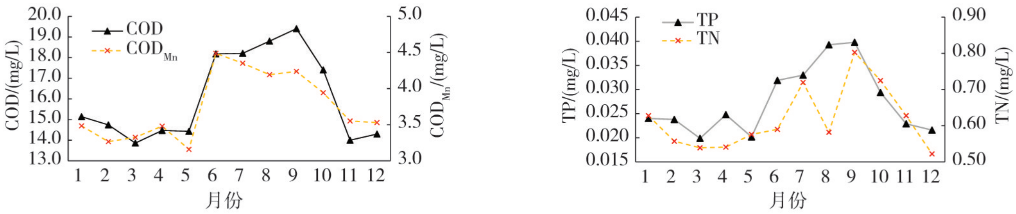
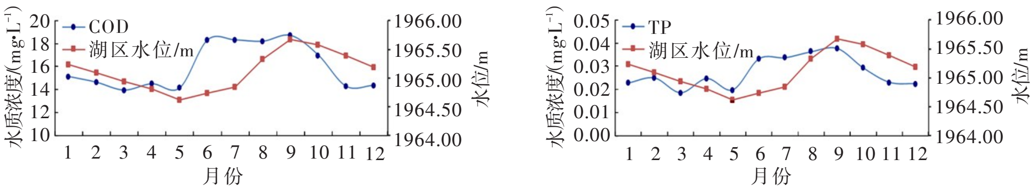


图9　2018年洱海湖区整体水质年内变化过程图

(a)洱海降雨量与COD相关关系　　(b)洱海降雨量与TP相关关系

图10　洱海湖泊水质与流域降雨量相关关系图

(3)洱海年内水质变化受湖泊雨季蓄水调度运行关系密切。基于2018年洱海湖区整体水质(以COD、TP为例)与月均水位间的变化关系(见图11)可知，洱海年内水位最高值出现在9月，同期湖区水质浓度最高；洱海水位在10月—次年5月份逐步下降，而该期间的水质浓度也呈逐月降低趋势；同时随着雨季来临，大量的农田面源及排水沟渠积存的点源负荷随降雨径流入湖，导致入汛后洱海水质快速升高，并在6—10月维持较高的浓度水平。在当前流域水资源仅能维持湖泊水量基本平衡的条件下，雨季将大量的面源负荷拦蓄在湖内是洱海雨季水质浓度大幅度升高的关键所在。因此，要改变洱海目前因资源型缺水下的“蓄浑排清”调度运行方式，必须依托外流域调水工程，在“三先三后(即先节水后调水，先治污后通水，先环保后用水)”原则指引下，充分利用洱海的4.25亿m^3的调蓄库容，在面源大量输入的季节尽可能少蓄水，汛后蓄水期来水量不足时由外流域引水补充以实现洱海年内水量的基本平衡，从而实现洱海水资源调度的“蓄清排浑”效果，将促进洱海湖区整体水质达标的实现。

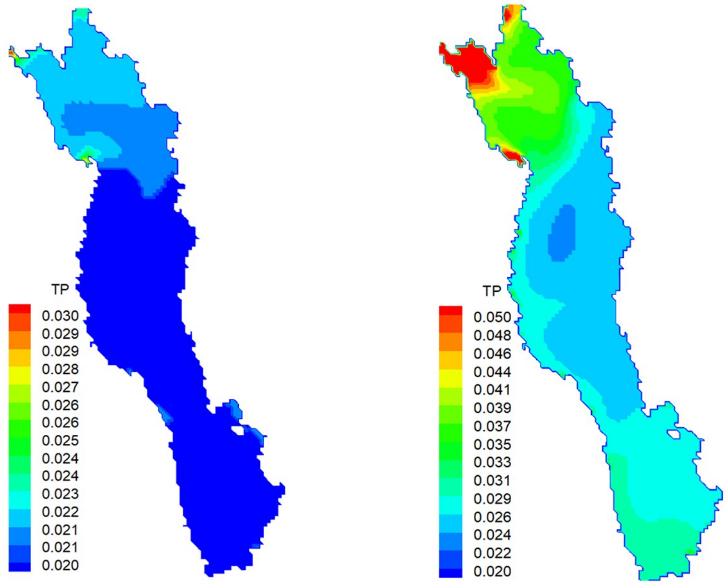


(a)洱海年内水位变化与COD关系　　(b)洱海年内水位变化与TP关系

图11　2018年洱海水质与湖区水位变化关系图

(4)洱海水质呈北部高–中间低–南部稍高、西边高–东边低的空间分布格局。受湖泊地形地貌条件、入湖污染物时空分布状况、流域来水条件及湖面风场驱动等因素的综合影响，洱海主要污染物浓度在空间上形成了北部湖区高–中心湖区低–南部湖区稍高、湖西区高–湖东区略低的空间分布格局，在时间上形成了旱季(11月—次年5月)洱海水质整体较好(见图12(a))、雨季来临后洱海水质快速变差并在整个雨季(6—10月)维持在较高的浓度水平(见图12(b))，雨季结束后(11月)洱海湖区整体水质呈现快速好转趋势。

(5)位于洱海北部的沙坪湾、海潮湾、双廊湾、红山湾均是洱海营养盐输入相对较多、水质相对较差或湖流条件相对静止的湖湾，湖湾丰富的营养盐条件和相对静止的水动力环境为藻类的本地生长提供物质基础和动力环境，同时受风生湖流驱动影响湖湾外的表层浮藻带入湖湾进而逐步形成累积，因此大量的营养盐输入和相对不利的静止水流环境是洱海北湖湖湾易出现藻类富集的重要驱动因素。



(a)干旱　　　　(b)雨季

图12　2018年洱海旱季和雨季湖区水质空间分布图(以TP为例)

6　结论

(1)洱海属大型中偏浅水湖泊，具有浅水湖泊的水流特点，风是湖流运动的主驱动力。在常年主导风场(东风、西南偏西风)作用下，湖区平均流速为1.1~2.5 cm/s，洱海湖流形态以风生环流为主，自北向南依次为逆-顺-逆-顺-顺-逆时针等5~6个大小不等的环流，湖区环流结构复杂，北部、中部和南部水流运动界限较为清晰，中部与南部湖区湖流运动及水量交换存在一定的弱流带，不利于北部、中部污染物向南部迁移扩散并经西洱河出湖。

(2)洱海年均蓄水湖容超过27亿 m^3，年入湖水量仅约6亿 m^3，湖泊水力停留时间将超过5年，北部湖湾水体的停留时间更长。主要来自洱海北三江和苍山18溪的入湖污染物在湖流驱动和携带作用下自北向南输移扩散过程中，接近或超过80%的氮、磷负荷滞留在湖泊内，不利于入湖污染物顺利外排，同时会逐步加重洱海的内源污染。洱海主要污染物浓度受雨季降雨径流携带大量面源入湖及因流域水资源短缺拦蓄全部雨季雨污水影响显著，并在雨季大量污染物自北部及西部农业耕作区及南部城镇建成区入湖后，从而形成洱海水质北部高-中间低-南部稍高、西边高-东边略低及雨季(6~10月)水质明显变差的时空分布格局。

(3)解决洱海水质污染问题的关键依然在于流域点、面源污染的综合治理，控制雨季初期雨污水入湖，并逐步减少雨季点面源污染物入湖。同时流域水资源调配与湖泊内水量调度作为一种辅助手段，在保障流域防洪安全的前提下，通过外流域引水改变目前洱海因水资源短缺将大量点面源负荷拦蓄在湖内的调度运行方式，在面源大量输入的季节尽可能少蓄水，汛后蓄水期来水量不足时由外流域引水补充以实现洱海年内水量的基本平衡，从而实现洱海水资源调度的“蓄清排浑”效果，是解决洱海水质污染问题并减缓雨季水质快速变差的关键所在。

参　考　文　献：

[1]　郭宏龙.洱海水环境历史变化规律探讨[J].环境科学导刊，2018，37(4)：22-25.

[2]　符辉，袁桂香，曹特，等.洱海近50a来沉水植被演替及其主要驱动要素[J].湖泊科学，2013，25(6)：854-861.

[3]　韩涛，彭文启，李怀恩，等.洱海水体富营养化的演变及其研究进展[J].中国水利水电科学研究院，

2005，3(1)：71-73，78．
[4] 陈小华，钱晓雍，李小平，等．洱海富营养化时间演变特征(1988-2013年)及社会经济驱动分析[J]．湖泊科学，2018，30(1)：70-78．
[5] 卫志宏，杨振祥，唐雄飞，等．洱海湖泊及湖湾三维水动力模型构建及特征分析[J]．昆明理工大学学报(自然科学版)，2013，38(1)：85-95．
[6] 卫志宏，杨振祥，唐雄飞，等．洱海湖泊及湖湾水质水生态模型及特征分析[J]．昆明理工大学学报(自然科学版)，2013，38(2)：93-101．
[7] 大理白族自治州人民政府．洱海保护条例[R]．2019．
[8] 马巍，浦承松，罗佳翠，等．池水动力特性及其对北岸蓝藻堆积驱动影响[J]．水利学报，2013，44(S1)：22-27．
[9] 马巍，廖文根，匡尚富，等．大型浅水湖泊纳污能力核算的风场设计条件分析[J]．水利学报，2009，40(11)：1313-1318．
[10] 姜恒志，崔雷，石峰，等．风场、地形和吞吐流对太湖流场影响的研究[J]．水力发电学报，2013，32(6)：165-171．
[11] 姚云辉，马巍，崔松云，等．滇池草海水污染治理工程措施及其防治效果评估[J]．中国水利水电科学研究院学报，2019，17(3)：161-168．
[12] 骆辉煌，李翀，蒋艳，等．南四湖风生流数值模拟研究[J]．南水北调与水利科技，2011，9(3)：15-20．

Study on the hydrodynamic characteristics and transporation and diffusion of pollutants in Erhai Lake

MA Wei[1], ZHOU Yun[2], SU Jianguang[2], JIANG Rucheng[2], HU Xinqi[1]

(1. *Department of Water Environment*, *CIWHR*, *Beijing* 100038, *China*;

2. *Yunnan Water Conservancy and Hydroelectric Survey Design and Research Institute*, *Kunming* 650021, *China*)

Abstract: The Erhai Lake, the second largest freshwater lake on the Yunnan Platea, is a shallow-water Lake. Wind is the major driver of water flow while impact of its inflow and outflow is relatively weak. The water flow is complicated anddriven by wind and the inflow and outflow, varying between 1.1cm/s and 2.0cm/s. As a result, the pollutant of the lake is characterized by a long residence time, slow transportation and diffusion, and algae is easily accumulated in the northern bay of the Erhai Lake. When the inflow pollutants move from north to south and from west to east, they accumulate in the bottom of the lake and form the internal pollutions. Meanwhile, a large amount of the non-point pollutant load flows into the lake during the rainy season. As a result, the pollutant concentration is highest in the north and west, less in the south and east, and lowest in the middle, and the water quality is quickly degraded from June to October. Therefore, measures, such as controlling the non-point source, decreasing the water flowing the lake during the wet season, supplying water from other basin, and changing the present operation scheme, are the key ways to solve the water quality problem and to prevent the water quality from rapid degradation during the rainy season in the Erhai Lake.

Keywords: hydrodynamic characteristics; pollutants; transportation and diffusion of pollutants; water quality; spatio-temporal distribution characteristics; Erhai Lake

（责任编辑：祁 伟）