

# 1994~2023年滇池水质变化及差异性分析

姚颖吉

云南省水文水资源局红河分局, 云南 蒙自

收稿日期: 2026年4月7日; 录用日期: 2026年5月2日; 发布日期: 2026年5月9日

## 摘要

为揭示滇池长期水质演变规律与时空差异特征, 基于1994~2023年滇池(草海、外海)水质监测数据, 采用单因子评价法, 从全湖年均、汛期与非汛期、多年月均等多时间尺度开展描述性分析; 另外, 选取总氮、总磷、氨氮和高锰酸盐指数为核心指标, 分析逐年、多年月度变化情况。运用SPSS、GIS软件, 分析各十年段间水质类别差异、汛期与非汛期差异以及空间差异。结果表明: 1) 草海和外海高锰酸盐指数、氨氮、总磷和总氮含量均在2013年以后出现明显改善。2) 从年均水质类别来看, 滇池草海和外海均表现为汛期劣V类占比高于非汛期, 但通过差异性分析, 汛期和非汛期不存在显著差异。3) 滇池氮磷比在1994~2023年内呈上升趋势, 表现为磷限制为主。4) 滇池外海北部的高锰酸盐指数、氨氮、总磷和总氮均与其它位置存在显著差异。

## 关键词

滇池, 水质指标, 时空变化, 差异性

# Analysis of Water Quality Changes and Differences in Dianchi Lake from 1994 to 2023

Yingji Yao

Honghe Branch of Yunnan Provincial Hydrology and Water Resources Bureau, Mengzi Yunnan

Received: April 7, 2026; accepted: May 2, 2026; published: May 9, 2026

## Abstract

To reveal the long-term evolution and spatiotemporal differentiation characteristics of water quality in Dianchi Lake, based on water quality monitoring data from 1994 to 2023, the single-factor evaluation method was used to conduct descriptive analyses on annual mean, flood season vs. non-

flood season, and multi-year monthly water quality across the entire lake. In addition, total nitrogen, total phosphorus, ammonia nitrogen, and permanganate index were selected as core indicators to analyze their annual and multi-year monthly variations. SPSS and GIS software were used to examine the differences in water quality classification among three decadal periods, between flood and non-flood seasons, and across spatial locations. The results show that: 1) The permanganate index, ammonia nitrogen, total phosphorus, and total nitrogen in both Caohai and Waihai have improved significantly since 2013. 2) In terms of annual average water quality classification, both Caohai and Waihai exhibit a higher proportion of inferior Class V water during the flood season than in the non-flood season. However, the difference analysis indicates no significant difference between flood and non-flood seasons. 3) The nitrogen-phosphorus ratio in Dianchi Lake showed an upward trend from 1994 to 2023, indicating a dominance of phosphorus limitation. 4) The permanganate index, ammonia nitrogen, total phosphorus, and total nitrogen in the northern part of Waihai are significantly different from those in other locations.

## Keywords

Dianchi Lake, Water Quality Indicator, Spatiotemporal Variation, Difference

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

滇池作为云贵高原面积最大的天然淡水湖和长江上游生态安全格局的重要组成部分，兼具工农业用水、旅游、气候调节及生物多样性维系等多重生态服务功能，对昆明市的经济社会可持续发展与生态安全保障具有不可替代的作用[1] [2]。然而，随着滇池流域城镇化进程加速、人口集聚与工农业快速发展，人类活动对湖泊生态环境的干预强度不断增强，叠加湖泊补给量少、自身置换周期长、封闭性强、蒸发量大和自净能力较弱的自然限制[3] [4]，滇池曾面临富营养化加剧、蓝藻水华频发[5]、pH 异常升高等问题[6]，成为国家“三河三湖”重点治理对象之一[7]。

国内对滇池的研究大致可划分为三个阶段：20 世纪 80~90 年代为早期研究阶段，重点关注富营养化发生过程。70 年代，富营养化已日渐成为困扰全球湖泊治理的一大问题，各国都开展富营养化形成机制和控制措施研究[7]。80 年代，滇池出现蓝藻水华大规模暴发，总氮、总磷浓度快速上升[7]；2000~2010 年为中期研究阶段，滇池水质长期处于劣V类，研究聚焦于草海与外海的空间差异、北部污染重于南部的分布特征及内源污染释放机制[2]；2016 年至今为近期治理成效研究阶段，随着一系列工程实施，滇池水质由劣V类逐步提升至V类、IV类，研究重点转向治理效果评估、生态修复与蓝藻水华防控。

水质演变是湖泊生态系统对自然变化与人类活动综合响应的直观体现，长时间序列的水质变化特征分析与差异性识别，是揭示湖泊污染成因、评估治理成效及制定精准管控策略的核心基础[6]。滇池的水质治理历经数十年，从早期的污染防控到“十二五”、“十三五”期间的环湖截污、外流域引水、生态修复等系统性工程实施，其水质状况在不同阶段呈现显著的时空异质性[2] [8]。1994~2023 年是滇池流域社会经济发展与水环境治理力度持续加大的关键变化时期，分析该时段内特征水质指标的年际波动、不同月份水质类别变化及差异性，不仅能厘清滇池水质演变的变化状况，更能为识别不同驱动因素的作用机制、优化后续治理方案提供科学支撑[2] [9]。

## 2. 研究区域概况和方法

### 2.1. 研究区域概况

滇池位于云南省昆明市西南部,属金沙江流域[10],为典型高原浅水断陷湖泊[6]。1996年西园隧洞建成后,湖体被海埂大坝分为草海与外海,二者没有水力联系[7],外海占总面积96.4% [11]。流域属亚热带高原季风气候,降雨集中在5~10月[11],流域降水具有年内和年际分布不均的特征[7]。入湖河流多分布于北部、东部与南部[4],出流单一,水体交换能力弱,自净能力有限[8]。

### 2.2. 数据来源

数据来源为云南省水文水资源局1994~2023年月水质监测数据,草海监测时间短,仅为2001~2023年。全湖早期开展监测点位、频次较后期少,且部分监测项目早期未开展监测。滇池草海共4个水质监测点位,分别为断桥、外草海中心、西园隧道入口、草海船闸。外海按地理分布分为北部(浮桥、海埂、海埂中、晖湾中)、东部(滇池五水厂、王官、乌龙、海晏、海晏中、沙堤)、南部(河泊所、晋宁、昆阳、大河尾、红泥咀)和西部(中滩、白鱼口中、白鱼口、观音山中、观音山、西华中、富善),共计22个监测点位。滇池采样点位示意图见图1。

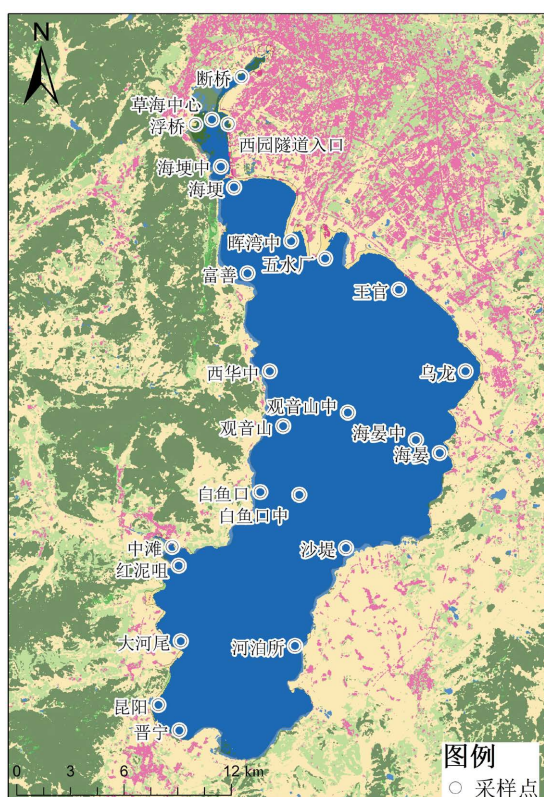


Figure 1. Schematic diagram of sampling sites in Dianchi Lake

图 1. 滇池采样点位示意图

### 2.3. 评价及分析方法

水质评价:采用单因子评价水质类别,评价标准用《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)除总氮和化学需氧量外的基本项目进行水质类别评价。分别对水质时间、空间变化进行评价。草海面积小,不做

空间分析评价。

差异性分析：包括水质类别及特征值变化分析。运用 SPSS 软件，对各站点研究时间段内的水质类别，进行时间段间的差异比较、时间段内全年汛期非汛期间的差异比较，具体为 1994~2003 年、2004~2013 年、2014~2023 年各十年段全年、汛期和枯期水质评价类别的差异比较。对高锰酸盐指数、氨氮、总磷、总氮等项目的监测数据差异性比较，同时开展空间上的差异性比较分析。

### 3. 水质评价及氮磷比变化分析

#### 3.1. 水质评价

##### 1) 草海

2001~2023 年草海年均水质类别处于IV~劣V类，劣V类出现频率最高，三者出现频率分别为 13.0%、30.4%、56.5%，主要超标项目为高锰酸盐指数、五日生化需氧量、总磷等。汛期水质类别为V~劣V类，非汛期水质类别为IV~劣V类，汛期劣V类占比高于非汛期。滇池草海年均水质类别统计见表 1。

滇池草海共监测 723 站次，其中III~劣V类出现次数分别为 31 次、137 次、184 次、371 次，占比分别为 4.3%、18.9%、25.4%、51.3%。按月份统计，草海III~劣V类占比最高月份分别为 2 月、3 月、5/9 月 (两个月占比相同)、8 月，占比分别为 13.79%、28.33%、33.33%、77.05%。汛期月份中，V类、劣V类出现站次比非汛期多。草海各月水质类别统计占比情况见图 2。

Table 1. Statistical table of annual average water quality categories in Caohai of Dianchi Lake

表 1. 滇池草海年均水质类别统计表

		年数	III	IV	V	劣V	主要超标项目
全湖 (2001~2023 年)	监测年均(年)	23		3 (13.0%)	7 (30.4%)	13 (56.5%)	高锰酸盐指数、 五日生化需氧 量、总磷
	汛期(年)	23			8 (34.8%)	15 (65.2%)	
	非汛期(年)	23		5 (21.7%)	6 (26.1%)	12 (52.2%)	
	总氮年均(年)	23			23 (100%)		

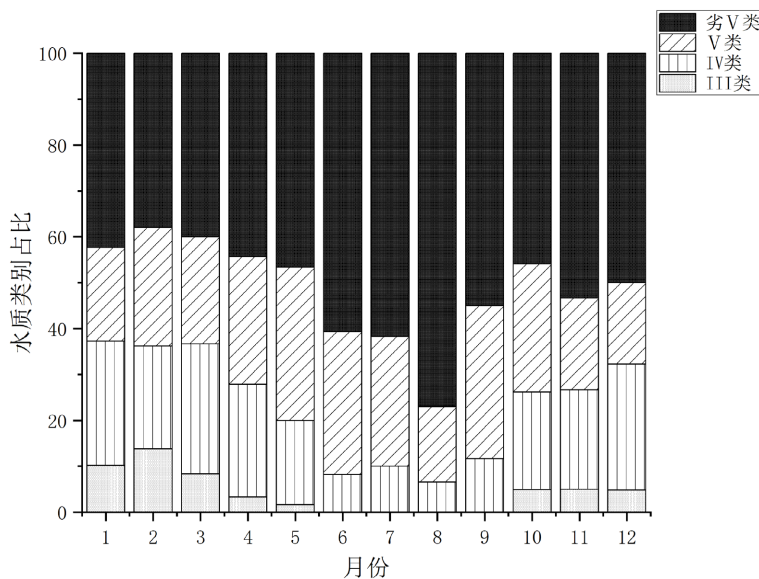
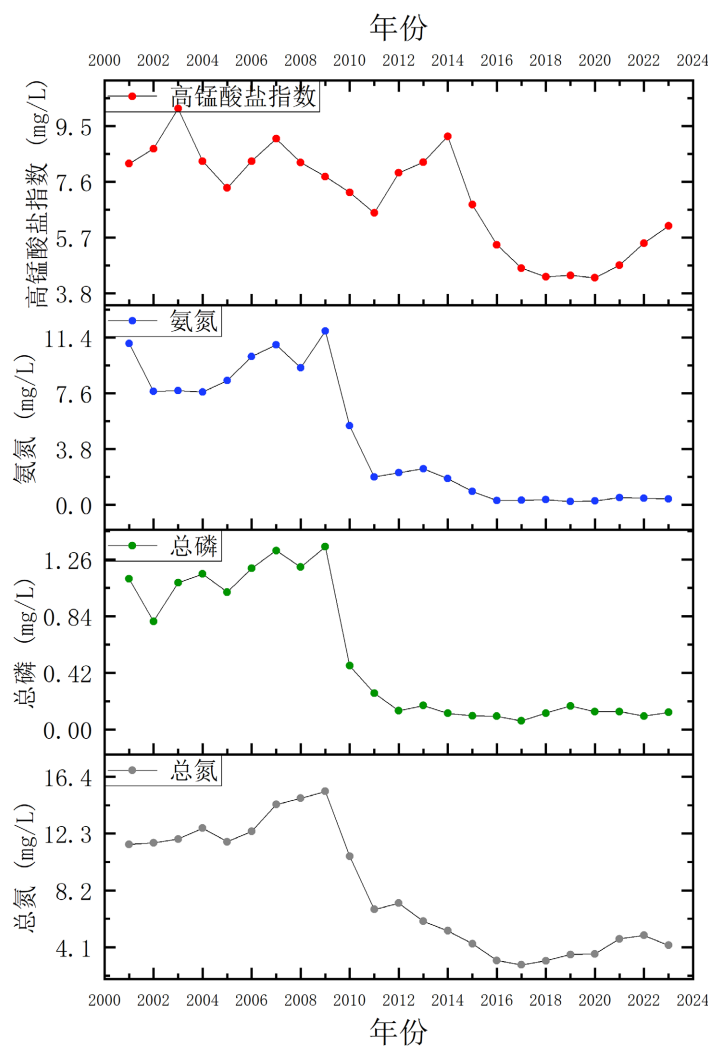


Figure 2. Monthly proportion of water quality categories in Caohai, Dianchi Lake

图 2. 滇池草海月度水质类别占比图

对滇池草海的高锰酸盐指数、氨氮、总磷、总氮四项指标监测值评价。2001~2023 年各项目年际变化及多年月度变化见图 3、图 4。



**Figure 3.** Interannual variation of characteristic value indicators in Caohai, Dianchi Lake  
**图 3.** 滇池草海特征值指标年际值变化图

滇池草海在年际变化方面，氨氮、总磷和总氮均在 2012 年附近出现明显转折，浓度值均大幅下降，并维持在较低且平稳的水平上。氨氮、总磷和总氮的最大值均出现在 2009 年，最大值分别为 11.84 mg/L、1.35 mg/L 和 15.34 mg/L，高锰酸盐指数最大值出现在 2003 年(10.10 mg/L)。多年月度变化方面，总磷、氨氮和高锰酸盐指数趋势大致相似，呈现出汛期浓度较非汛期高。总氮最大值出现在 2 月，为 4.806 mg/L；总磷出现在 8 月，为 0.191 mg/L；氨氮出现在 7 月，为 0.913 mg/L；高锰酸盐指数出现在 8 月，为 7.276 mg/L。

## 2) 外海

1994~2023 滇池外海全湖年均水质类别处于IV~劣V类，劣V类占比最高，为 60.0%；汛期劣V类占比最高，为 73.3%，非汛期V类占比最高，为 40.0%。主要超标项目为高锰酸盐指数、五日生化需氧量、总磷等。从分区来看，东西南北四个区均是 IV 类、劣V类出现频率较其它类高；南部 IV 类出现占比最高，为 35.2%，北部、东部、西部出现占比均为劣V类最高，分别为 55.5%、43.3%、36.5%。水质情况见表 2。

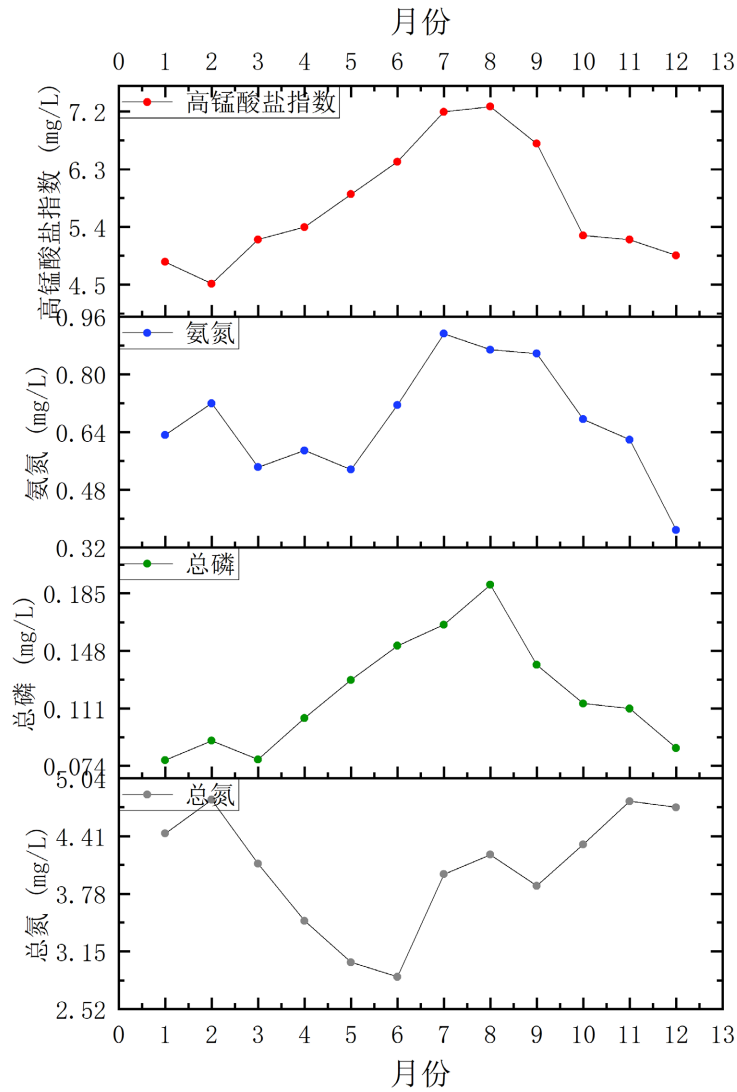


Figure 4. Monthly variation of characteristic value indicators in Caohai, Dianchi Lake  
 图 4. 滇池草海特征值指标月度变化图

Table 2. Statistical table of annual average water quality categories in Waihai, Dianchi Lake  
 表 2. 滇池外海年均水质类别统计表

		年数	I	II	III	IV	V	劣V	主要超标项目
全湖 (1994~ 2023 年)	监测年均(年)	30				6 (20.0%)	6 (20.0%)	18 (60.0%)	高锰酸盐指 数、五日生化 需氧量、总磷
	汛期(年)	30				4 (13.3%)	4 (13.3%)	22 (73.3%)	
	非汛期(年)	30				7 (23.3%)	12 (40.0%)	11 (36.6%)	
	总氮年均(年)	26				3 (11.5%)	4 (15.4%)	19 (73.1%)	
分区 (1994~ 2023 年)	北部	30		2 (0.3%)	42 (7.1%)	117 (20.0%)	99 (16.9%)	325 (55.5%)	高锰酸盐指 数、五日生化 需氧量、总磷
	东部	29	1 (0.1%)	6 (0.6%)	59 (6.7%)	255 (29.0%)	177 (20.1%)	381 (43.3%)	
	南部	15		1 (0.1%)	52 (8.6%)	211 (35.2%)	140 (23.4%)	194 (32.4%)	
	西部	30		2 (0.1%)	100 (8.6%)	360 (30.9%)	275 (23.6%)	425 (36.5%)	

滇池外海共监测 3224 站次，各水质类别均有出现，其中劣V类占比最高，为 1325 次(41.1%)，IV 类次之，为 943 次(29.25%)。按月份分析，劣V类出现占比最高的月份为 9 月(66.17%)，汛期占比高于非汛期，III类占比最高为 2 月(22.8%)。统计情况见图 5。

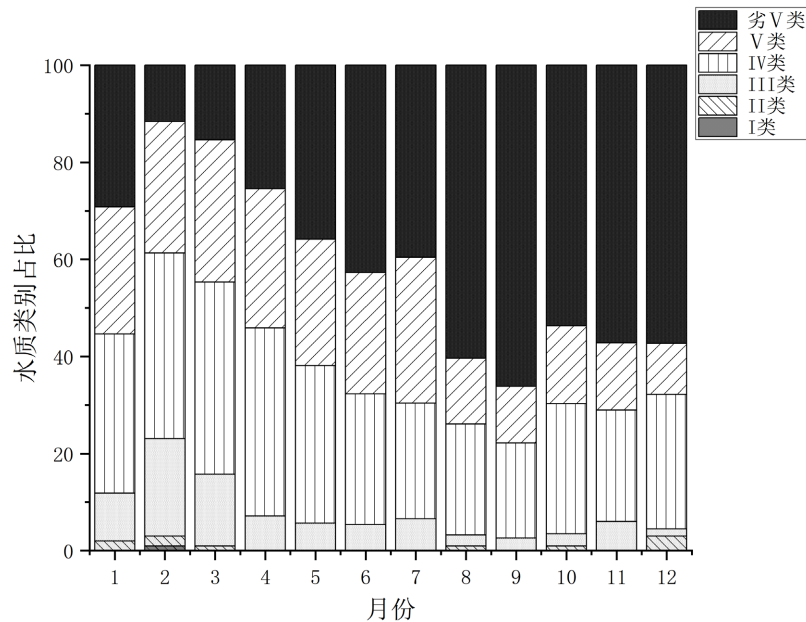
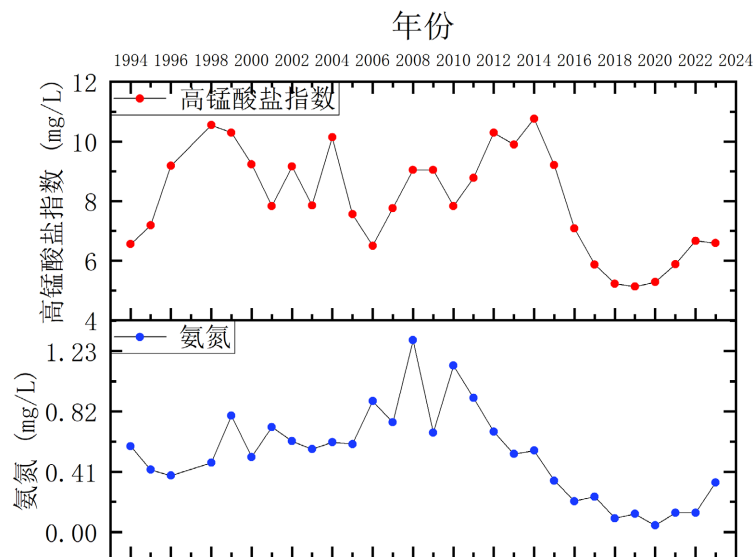
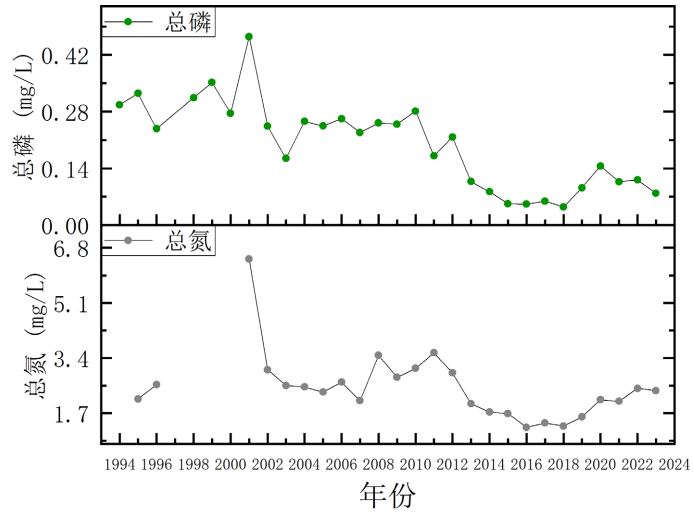


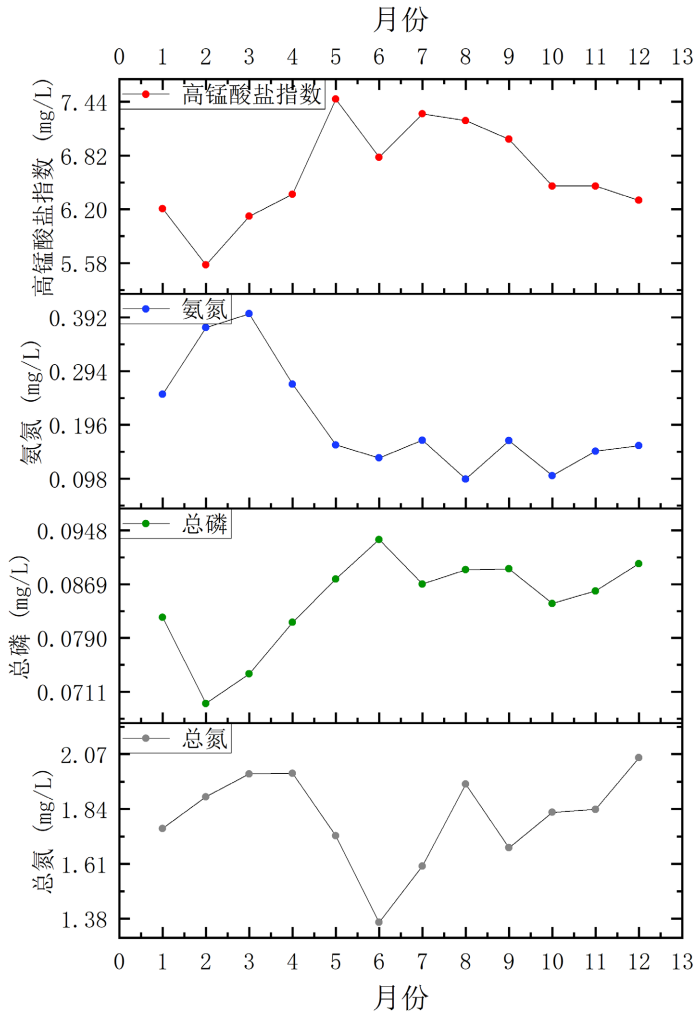
Figure 5. Monthly proportion of water quality categories in Waihai, Dianchi Lake  
图 5. 滇池外海月度水质类别占比图

滇池外海在年际变化方面，高锰酸盐指数波动较大，无明显稳定趋势，最大值出现在 2013 年的 10.76 mg/L。总氮和总磷趋势类似，最大值均出现在 2000 年，分别为 6.45 mg/L 和 0.465 mg/L。在多年月度变化方面，总氮和氨氮趋势大致相似，总磷和高锰酸盐指数相似。总氮最大值出现在 12 月的 2.054 mg/L，总磷出现在 6 月的 0.093 mg/L，氨氮出现在 3 月的 0.399 mg/L，高锰酸盐指数出现在 5 月的 7.47 mg/L。滇池外海特征值年均、月均变化见图 6、图 7。





**Figure 6.** Interannual variation of characteristic value indicators in Waihai, Dianchi Lake  
**图 6.** 滇池外海特征值指标年均变化图



**Figure 7.** Monthly variation of characteristic value indicators in Waihai, Dianchi Lake  
**图 7.** 滇池外海特征值指标月度变化图

### 3.2. 滇池全湖水水质时空分布

在三个十年段内分别选取较典型年份进行 GIS 空间插值，考虑技术限制和点位数量情况，选取 2001 年、2013 年和 2023 年就四项特征项目进行作图。滇池整体水质草海劣于外海，北部劣于南部，人口越聚集的地方对水质影响越大。2023 年氨氮、总磷和总氮浓度较早期均有大幅降低。早期总磷、总氮空间规律较一致，高值区位置相近，至 2023 年，总磷原高值区点位较总氮对应点位下降明显。典型年份四项特征项目浓度空间分布特征详见图 8。

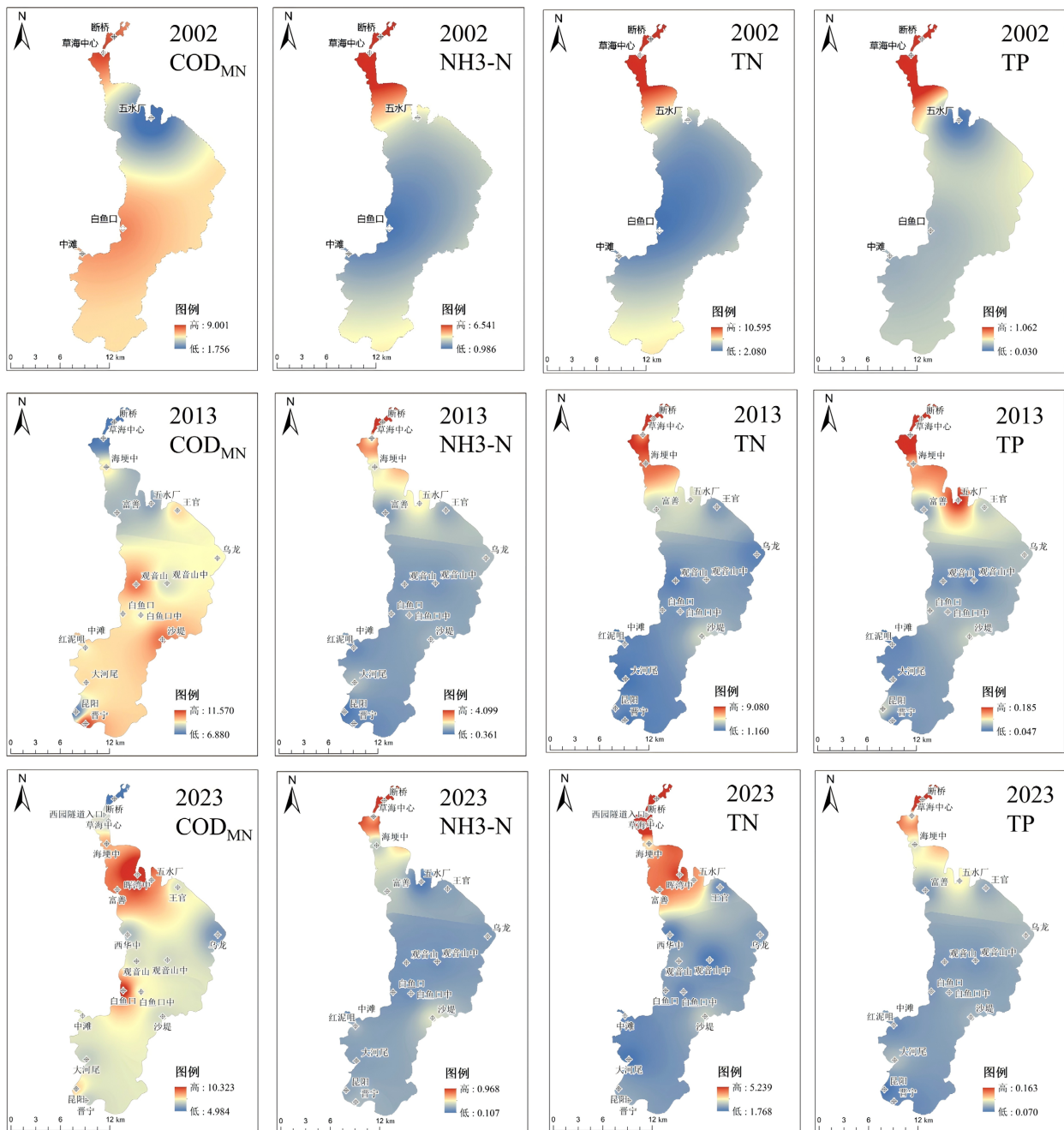


Figure 8. Spatial distribution characteristics of four monitoring index concentrations in typical years  
图 8. 典型年份四项特征项目浓度空间分布特征图

### 3.3. 氮磷比变化分析

氮磷比(N/P)是湖泊生态化学计量学的核心指标,直接决定了营养盐限制类型与藻类群落结构。基于总氮、总磷监测年份数据,对滇池草海与外海氮磷比进行计算分析,结果显示草海和外海在时间和空间尺度上均表现出较明显的变化趋势,详见表3。

从时间变化来看,草海与外海氮磷比整体均呈上升态势,早期阶段氮磷比多处于13~15.5之间,随治理工程推进与水质改善,氮磷比逐步升高至26~45之间,反映出滇池水体营养结构随时间发生明显改变。空间方面,外海不同区域氮磷比也存在一定区别,就2014~2023年段而言,北部与西部氮磷比相对偏高,南部氮磷比相对偏低,呈现出一定的空间分异特征,增幅为北部增幅最大。总体来看,滇池氮磷比随时间逐步升高,磷限制特征不断增强,并且草海的上升幅度大于外海。这一变化与流域污染治理过程中总磷浓度下降更为明显、总氮削减相对滞后的特征相吻合,也在一定程度上影响着藻类生长环境与湖泊生态系统结构。

**Table 3.** Statistical table of nitrogen-phosphorus ratios in different periods and zones (Caohai and Waihai)

**表 3.** 草海、外海氮磷比时段分区统计表

湖体	位置	1994~2003	2001~2003	2004~2013	2014~2023
草海	全域		15.291	27.537	44.606
	北部	13.898		20.996	35.522
外海	东部	15.691		18.300	29.909
	南部			23.403	26.759
	西部	14.207		20.705	31.630

## 4. 差异性分析结果

### 1) 草海

对草海四项监测值进行差异性分析:结果显示高锰酸盐指数、氨氮、总磷、总氮在时间段分组上均存在显著差异。从监测值中位数看,2014~2023年监测值中位数均比2004~2013年中位数大幅减小,2014~2023年四个特征项目监测值优于2004~2013年。

对汛期和非汛期高锰酸盐指数、氨氮、总磷、总氮监测值进行差异性比较,均不具有统计学差异,说明汛期和非汛期各项目监测值无显著差异,草海特征指标值受汛期降雨来水影响不显著。四项监测值的时间段、水期差异性比较见表4、表5。

**Table 4.** Comparison of temporal differences in characteristic items in Caohai, Dianchi Lake

**表 4.** 滇池草海特征项目时段差异性比较表

特征项目	时段分组	中位数(25%, 75%)	P 值
高锰酸盐指数	2004~2013 年	7.90 (6.71, 8.95)	<0.001
	2014~2023 年	5.16 (4.16, 6.61)	
氨氮	2004~2013 年	6.72 (2.61, 10.64)	<0.001
	2014~2023 年	0.330 (0.162, 0.788)	
总磷	2004~2013 年	0.873 (0.191, 1.260)	<0.001
	2014~2023 年	0.104 (0.076, 0.154)	

续表

总氮	2004~2013 年	11.45 (7.35, 14.41)	<0.001
	2014~2023 年	3.68 (2.94, 4.94)	

**Table 5.** Comparison of differences in characteristic items in different water periods of Caohai, Dianchi Lake**表 5.** 滇池草海特征项目各水期差异性比较表

特征值指标	分组	中位数(25%, 75%)	P 值
高锰酸盐指数	汛期	7.15 (5.54, 7.84)	0.351
	非汛期	6.73 (4.19, 8.37)	
氨氮	汛期	1.96 (0.502, 7.68)	0.705
	非汛期	1.73 (0.272, 8.89)	
总磷	汛期	0.200 (0.136, 1.08)	0.137
	非汛期	0.112 (0.090, 1.099)	
总氮	汛期	5.23 (3.48, 10.66)	0.245
	非汛期	6.06 (4.08, 13.93)	

## 2) 外海

对外海四项特征项目监测值分析：结果显示滇池外海高锰酸盐指数、氨氮、总磷、总氮均存在显著差异，均表现为 2014~2023 年优于之前时间段。具体变化趋势为高锰酸盐指数和氨氮均为 2004~2013 > 1994~2003 > 2014~2023，总磷和总氮为逐渐减小趋势。

汛期和非汛期高锰酸盐指数、氨氮、总磷、总氮均不具有统计学差异。

南部开展监测时间较短，数据量较其它区域少一半以上，故不与其它三区开展不同湖区间的比较。北部氨氮、总磷和总氮与西部、东部均有显著差异，整体呈现北部劣于其它区域。四项监测值的时间段、水期、空间差异性比较见表 6~8。

**Table 6.** Comparison of temporal differences in characteristic items in Waihai, Dianchi Lake**表 6.** 滇池外海特征项目时段差异性比较表

特征值指标	分组	成对比较		中位数(25%, 75%)	P 值
		Sample 1~Sample 2	Adj.显著性 a		
高锰酸盐指数	1994~2003 年(1)	(1)~(2)	1.000	8.30 (6.87, 10.46)	<0.001
	2004~2013 年(2)	(1)~(3)	<0.001	8.713 (7.219, 9.833)	
	2014~2023 年(3)	(2)~(3)	<0.001	6.033 (5.231, 7.399)	
氨氮	1994~2003 年(1)	(1)~(2)	0.001	0.470 (0.350, 0.691)	<0.001
	2004~2013 年(2)	(1)~(3)	<0.001	0.702 (0.511, 0.916)	
	2014~2023 年(3)	(2)~(3)	<0.001	0.093 (0.037, 0.305)	
总磷	1994~2003 年(1)	(1)~(2)	0.001	0.255 (0.189, 0.337)	<0.001
	2004~2013 年(2)	(1)~(3)	<0.001	0.193 (0.118, 0.274)	
	2014~2023 年(3)	(2)~(3)	<0.001	0.073 (0.053, 0.115)	

续表

总氮	2004~2013 年	2.589 (1.943, 3.255)	<0.001
	2014~2023 年	1.827 (1.395, 2.289)	

**Table 7.** Comparison of differences in characteristic items in different water periods of Waihai, Dianchi Lake**表 7.** 滇池外海特征项目各水期差异性比较表

特征值指标	分组	中位数(25%, 75%)	P 值
高锰酸盐指数	汛期	8.281 (6.754, 9.943)	0.076
	非汛期	7.093 (6.177, 8.739)	
氨氮	汛期	0.500 (0.102, 0.717)	0.487
	非汛期	0.513 (0.305, 0.696)	
总磷	汛期	0.179 (0.091, 0.280)	0.092
	非汛期	0.155 (0.085, 0.230)	
总氮	汛期	2.130 (1.638, 2.680)	0.194
	非汛期	2.375 (2.026, 2.983)	

**Table 8.** Comparison of spatial differences in characteristic items in Waihai, Dianchi Lake**表 8.** 滇池外海特征项目空间差异性比较表

特征值指标	分组	成对比较		中位数(25%, 75%)	多参数秩和检验 P 值
		Sample 1~Sample 2	Adj.显著性 a		
高锰酸盐指数	北部	西 - 东	0.422	8.85 (6.53, 10.8)	0.004
	东部	西 - 北	0.183		
	西部	东 - 北	0.003		
氨氮	北部	西 - 东	1.000	0.663 (0.218, 1.39)	0.001
	东部	西 - 北	0.012		
	西部	东 - 北	0.002		
总磷	北部	西 - 东	1.000	0.259 (0.111, 0.460)	0.001
	东部	西 - 北	0.005		
	西部	东 - 北	0.002		
总氮	北部	西 - 东	1.000	3.52 (2.68, 5.08)	<0.001
	东部	西 - 北	<0.001		
	西部	东 - 北	<0.001		

## 5. 结果与讨论

### 5.1. 讨论

滇池的水质演变是经济社会发展因素和气候环境变化自然因素共同作用的结果，其中人类活动为主导因素。早期围湖造田、城市生活污水排放以及城市和农业面源污染等，均对滇池水质造成了严重影响。滇池流域围湖造田古已有之，最早始于元朝，尤其是 20 世纪 70 年代初期的“围海造田”运动，填去草

海 70%的面积[11]。而后随着经济社会进一步发展,粗放型工业、农业发展迅速,流域人口密度不断升高,污染速度远超水体自净速度,滇池水质迅速恶化。1994~2009年,滇池水质整体处于劣V类,各污染物浓度都处于较大值,尤其草海,2009年氨氮、总磷及总氮出现最大值,经查阅资料,时逢云南出现特大旱灾,2009年10月至2010年2月云南省环境监测中心站的监测数据表明,由于地表水体稀释自净能力降低,水体中主要污染物浓度呈升高趋势[12],草海面积小,受影响更为明显。

对滇池的治理也从意识到方法不断摸索和深入,1988年颁布《滇池保护条例》标志依法治湖的崭新起点,从“九五”到“十四五”,从投资到多方位措施协同发力,开展“四退三还”[13]、“六大工程”[14](环湖截污、外流域引水、入湖河道整治、面源治理、生态修复和底泥疏浚)等措施,滇池水质得到有效改善。“十二五”末滇池水质持续恶化趋势已得到有效控制,“十三五”期间湖泊整体水质得到改善,但年际间因受水情、气候等自然因素影响存在明显波动[15]。

通过对比草海和外海各十年段间年均水质类别,发现各时间段间存在差异,均为2014~2023年段优于之前时间段,这说明随着“六大工程”等一系列措施治理的深入,滇池整体水质呈现向好趋势。具体而言,选择高锰酸盐指数、氨氮、总磷和总氮四项特征项目监测值进行分析。草海和外海的特征值均在2013年后有所改善,这与牛栏江滇池引水工程的通水有关,2013年工程正式向滇池补水后,滇池水位达到高值,流域河湖流量趋于满足生态流量的需求[13],水体流动性增强,稀释和自净能力也随之提升[2],引入牛栏江江水后,总氮、总磷含量明显降低[8]。至2023年12月,牛栏江工程累计向滇池生态补水44.63亿立方米,相当于滇池水体置换约3次[16]。2011~2015年环湖截污工程持续推进,有效削减外源污染负荷,氨氮、总磷和总氮浓度也有较稳定的降低之势。

氮磷比变化方面,滇池水体总氮、总磷的浓度在整个分析时段内经历了上升到下降的变化,但氮磷比呈现上升趋势。这说明在治理过程中,总磷的下降速度快于总氮,这与高伟等人[17]的研究结论一致。氮磷比由早期的15左右,升至30以上,表明滇池已由早期的氮磷共限制转变为以磷限制为主的湖泊,其中草海和外海北部的限制程度更严重。

外海空间四项特征值差异分析显示北部劣于东部、西部,这主要是由于北部入湖水量居多,北部区域中15条入湖河流占总入湖水量的84.9% [5],同时昆明主城区也主要集中在滇池北部,人类生产生活影响较其它区域更为明显。

## 5.2. 结论

1) 滇池草海和外海的水质受人为因素和自然因素共同影响。高锰酸盐指数、氨氮、总磷和总氮含量均在2013年以后出现明显改善,这与滇池一系列治理措施投入时间相符。

2) 从年均水质类别来看,滇池草海和外海均表现为汛期劣V类占比高于非汛期,但通过差异性分析,汛期和非汛期不存在显著差异。

3) 总氮、总磷浓度值经历上升至下降的变化,但滇池氮磷比在1994~2023年内呈上升趋势,表现为磷限制为主。

4) 滇池外海北部的高锰酸盐指数、氨氮、总磷、总氮均与其它位置存在显著差异,劣于东部和西部(南部数据量少不参与分析)。

## 参考文献

- [1] 祝艳, 韩林沛, 刘丽君, 等. 2018年滇池水环境质量评价研究[J]. 环境科学导刊, 2020, 39(2): 75-85.
- [2] 张卓亚, 刘晨阳, 朱昱泽, 等. 1990-2020年滇池水质时空变化特征及评价[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2023, 43(4): 141-151.
- [3] 王艺颐. 牛栏江-滇池补水工程运行后滇池环境改善的效果研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.

- [4] 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[J]. 环境科学学报, 2020, 40(2): 615-622.
- [5] 李加龙, 罗纯良, 吕恒, 等. 2002-2018 年滇池外海蓝藻水华暴发时空变化特征及其驱动因子[J]. 生态学报, 2023, 43(2): 878-891.
- [6] 杨凡, 马巍, 陈欣, 等. 滇池 pH 值异常升高的主要影响因素识别及其驱动机理[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(1): 75-82.
- [7] Phillips, G., Bramwell, A., Pitt, J., Stansfield, J. and Perrow, M. (1999) Practical Application of 25 Years' Research into the Management of Shallow Lakes. *Hydrobiologia*, **395**, 61-76. <https://doi.org/10.1023/a:1017059031741>
- [8] 黄杰, 王英才, 邓晓庆, 等. 滇池水质及营养状态时空变化特征[J]. 人民长江, 2022, 53(6): 61-67.
- [9] 王杰, 毛建忠, 谢永红, 等. 2008-2014 年滇池水质时空变化特征分析[J]. 人民长江, 2018, 49(5): 11-15.
- [10] 贺克雕, 高伟, 段昌群, 等. 滇池、抚仙湖、阳宗海长期水位变化(1988-2015 年)及驱动因子[J]. 湖泊科学, 2019, 31(5): 1379-1390.
- [11] 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.
- [12] 中国环境报. 云南组织专家把脉旱灾危害 生态系统面临严重威胁 环保协调相关部门加强监测严防污染事故发生 [N/OL]. 2010-04-02. [https://sthjt.yn.gov.cn/ywdt/xxywrdjj/201004/t20100402\\_7631.html](https://sthjt.yn.gov.cn/ywdt/xxywrdjj/201004/t20100402_7631.html), 2026-04-06.
- [13] 杨枫, 许秋瑾, 宋永会, 等. 滇池流域水生态环境演变趋势、治理历程及成效[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(3): 633-643.
- [14] Li, X., Janssen, A.B.G., de Klein, J.J.M., Kroeze, C., Strokal, M., Ma, L., *et al.* (2019) Modeling Nutrients in Lake Dianchi (China) and Its Watershed. *Agricultural Water Management*, **212**, 48-59. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.023>
- [15] 朱天源, 赵海霞, 范金鼎, 等. 滇池流域河湖水环境时空分异及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(6): 1305-1316.
- [16] 云南省水利厅. 十年守护高原明珠 绿美春城建设有我——牛栏江-滇池补水工程通水 10 年引水济昆效益显现 [EB/OL]. 2023-12-28. [https://wcb.yn.gov.cn/html/2023/yewuzhuanlan\\_1228/57957.html](https://wcb.yn.gov.cn/html/2023/yewuzhuanlan_1228/57957.html), 2026-04-19.
- [17] 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[J]. 湖泊科学, 2021, 33(1): 64-73.