

滇池流域气候变化特征及与水环境关系研究

段燕楠¹, 王顺金², 周哆多¹, 李晓鹏¹

(1. 昆明市气象局, 云南 昆明 650500; 2. 嵩明县气象局, 云南 嵩明 651700)

摘要: 利用滇池流域及周边昆明、呈贡、晋宁、安宁、太华山、嵩明6个国家级气象观测站点1961—2024年气象资料以及151个自动气象站资料、水环境监测资料, 对滇池流域近64 a气温、降水变化趋势、空间分布特征, 以及气象要素与水环境关系进行分析。结果表明: 近64 a滇池流域年平均气温属于上升趋势, 20世纪90年代后增温趋势明显, 冬季(12月—次年2月)对增温贡献最大, 夏季(6—8月)气温变幅最小; 年降水量呈小幅减少趋势, 雨季(5—10月)降水减少明显, 干季(11月—次年4月)变化较小; 年平均气温总体呈现围绕滇池向南北两侧降低的趋势, 气温大值区位于主城区域; 年降水空间分布呈北多南少的特点。气温与水温呈显著正相关, 水温、气温、降水量与高锰酸盐指数、叶绿素a及综合营养状态指数相关性较好, 影响较大; 气温、降水变化将直接或间接影响滇池水质的变化。

关键词: 滇池流域; 气温; 降水; 水环境; 变化特征

中图分类号: X51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9655 (2026) 03-0001-05

0 引言

当前全球正经历着以气候变暖为显著特征的气候变化, 气候变化导致灾害性气候事件频发, 水资源分布失衡, 生物多样性受到威胁, 对自然、社会、经济以及人类健康等产生重大影响^[1-3]。滇池位于云南省昆明市西南部, 是云南省面积最大的高原淡水湖, 对昆明“四季如春”的气候资源和丰富的水资源有重要贡献, 是昆明城市发展的基础和支撑, 20世纪90年代开始, 滇池水质迅速恶化, 经过大力持续的综合整治, 近年来水质已明显改善^[4-5], 但随着气候变暖和城市发展, 滇池保护治理仍面临巨大压力^[6-7]。

在全球气候变暖的背景下, 各地气候变化特征与当地水环境的关系都各有特点。田永丽等^[8]利用1961—2014年资料对滇池流域气候变化特征进行分析和预估。高志伟等^[9]以洱海为例, 分析了气象要素与湖泊水环境的关系。白倩倩等^[10]利用水温与气温资料, 表明洞庭湖水温与气温相关性最

强。国内外其他专家学者针对当地的气候变化特征以及湖泊水环境做了大量研究^[11-12]。滇池位于低纬高原地区, 其气候特点、环境特征与其他湖泊有着较大差异, 本文围绕滇池, 利用滇池流域及周边昆明、呈贡、晋宁、安宁、太华山、嵩明6个国家级气象站观测资料、自动气象站资料及水环境监测资料, 就近64 a滇池流域气温降水变化特征及与水环境关系进行研究, 为滇池保护治理及周边农、林业发展、城市建设等提供理论依据。

1 研究资料和方法

1.1 研究资料

气候变化趋势研究资料为昆明市气象局提供的昆明、呈贡、安宁、晋宁、太华山、嵩明6个国家级气象观测站点1961—2024年气温、降水资料。滇池流域内有昆明、呈贡、晋宁、太华山4个国家级气象观测站点, 嵩明和安宁两个国家级观测站点位于流域外, 但滇池流域在嵩明县境内占据较大面积, 且嵩明站位于流域北部, 安宁站位于滇池西侧(如图1所示), 因此本文气象代表站点选取参考田永丽^[8]等人的研究, 可较全面地反映滇池流域气候变化特征。

滇池流域气温降水空间分布特征研究资料为昆明市气象局提供的滇池流域范围内151个自动气象观测站2016年1月—2024年12月气温、降水观测资料。近年来自动气象观测站点建设在不断完善中,

收稿日期: 2025-11-25

基金项目: 云南基层台站气象科技创新与能力提升计划项目(STIAP202402); 云南省气象局高原湖泊生态气象服务创新团队(2022CX08); 昆明市气象局创新团队(2025KMCX02)。

作者简介: 段燕楠(1986-), 学士, 高级工程师, 从事应用气象与气象服务。

通信作者: 王顺金(1988-), 学士, 工程师, 从事应用气象与气象服务。



图1 滇池流域及国家级气象站点分布图

为确保数据的连续性和可比性，故选用2016年以来的滇池流域范围内具备连续监测记录的151个站点，通过插值法分析气温、降水空间分布特征。

水环境资料采用昆明市滇池管理局提供的滇池草海和外海1991—2020水温年均值，以及2016—2021年滇池草海监测数据月均值，监测项目包括水温、氨氮、总氮、总磷、叶绿素、高锰酸盐指数等富营养化评价指标。

1.2 研究方法

气候变化趋势采用倾向率来定量描述滇池流域气象要素变化的幅度。温度和降水的气候趋势计算公式， x_i 表示样本量为 n 的某一气候变量， t_i 表示对应的时间，建立 x_i 和 t_i 之间的一元线性回归^[12]：

$$x_i = a + bt_i \quad (i=1,2,3,\dots,n) \tag{1}$$

式中： a —回归常数； b —回归系数； t —时间， a 、 b 用最小二乘法进行估计。其中 $b \times 10$ 即气候倾向率，如气温倾向率单位为 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，降水倾向率为 $\text{mm}/10\text{a}$ 。 $b > 0$ 时，表明随时间 t 的增加 x 呈上升趋势；反之 $b < 0$ 时， x 呈下降趋势。

时间 t_i 与变量 x_i 之间的相关系数 r 是判断变化趋势显著性的重要指标。已知显著性水平 α ，若 $|r| > r_\alpha$ ，表明 x_i 随时间 t 的变化趋势是显著的，否则是不显著的。相关系数 r 的计算公式如下：

$$r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}} \tag{2}$$

2 滇池流域平均气温分布特征分析

2.1 气温变化倾向率

(1) 年平均气温变化倾向率

采用倾向率来定量表述1961—2024年滇池流域

气温变化幅度。以20年为一个变化周期，计算6个国家级气象观测站（昆明、呈贡、安宁、晋宁、太华山、嵩明）1961—1980年、1981—2000年、2001—2024年3个时段以及1961—2024年的年平均气温变化倾向率，如表1所示在1961—2024年均均为正值，说明近64 a来，滇池流域年平均气温变化总体呈现升温趋势，6个站中昆明增温最为明显为 $0.411^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，安宁次之，太华山为高山站，增温最小。1961—1980年，除嵩明站出现较明显的降温趋势（ $-0.236^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ）外，其余5个站点温度变化趋势不明显，变幅均 $< \pm 0.1^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。1981—2000年昆明增温幅度最大，其次是晋宁，2000年以后，昆明增温幅度明显变小，其他5个站点则出现明显增温，增温幅度最大为安宁，其次为呈贡。

表1 滇池流域及周边代表站1961—2024年年平均气温变化倾向率（ $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ）

站名	1961—2024年	1961—1980年	1981—2000年	2001—2024年
昆明	0.411	-0.025	0.819	0.278
呈贡	0.301	-0.021	0.293	0.479
安宁	0.342	-0.085	0.276	0.491
晋宁	0.264	0.054	0.486	0.467
太华山	0.218	0.011	0.133	0.460
嵩明	0.302	-0.236	0.139	0.418

(2) 月平均气温变化倾向率

从月平均气温变化倾向率来看（表2），近64 a昆明上升幅度最明显，其次是安宁、呈贡，太华山上升幅度最小。从各月变暖趋势看，2月上升幅度最明显，其次是3月和1月，冬季（12月、1—2月）气温变化倾向率最大，气温变幅最大，对气候变暖贡献最大。夏季（6—8月）气温变化倾向率最小，气温变幅最小。

2.2 滇池流域年平均气温空间分布特征

利用滇池流域范围内151个自动气象观测站2016—2024年平均气温资料绘制滇池流域年平均气温空间分布图，如图2所示。滇池流域年平均气温总体呈现围绕滇池向南北两侧降低的趋势，流域北部年平均气温值最小，大值区位于昆明主城区区域，呈现明显的城市热岛效应。

3 滇池流域降水分布特征

3.1 降水量变化倾向率

(1) 年降水量变化倾向率

采用倾向率来定量表述1961—2024年滇池流域年降水量变化幅度。以20年为一个变化周期，计算6个国家级气象观测站（昆明、呈贡、安宁、晋宁、太华山、嵩明）1961—1980年、1981—2000年、

表2 滇池流域及周边代表站1961—2024年各月月平均气温变化倾向率 (°C/10a)

月份	昆明	呈贡	安宁	晋宁	太华山	嵩明
1	0.473	0.363	0.435	0.341	0.219	0.411
2	0.587	0.408	0.468	0.427	0.288	0.444
3	0.633	0.450	0.461	0.406	0.270	0.507
4	0.457	0.245	0.329	0.222	0.145	0.269
5	0.241	0.124	0.219	0.122	0.131	0.133
6	0.346	0.277	0.300	0.240	0.250	0.271
7	0.259	0.187	0.170	0.127	0.155	0.130
8	0.365	0.290	0.262	0.194	0.194	0.213
9	0.403	0.319	0.277	0.221	0.240	0.219
10	0.333	0.281	0.307	0.209	0.226	0.268
11	0.398	0.356	0.422	0.306	0.320	0.309
12	0.439	0.266	0.477	0.329	0.180	0.319

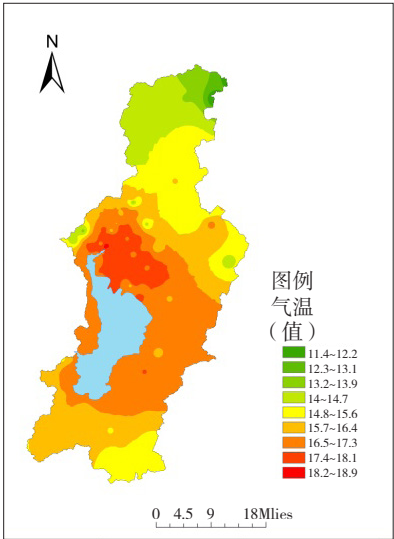


图2 滇池流域年平均气温分布

2001—2024年3个时段以及1961—2024年的年降水量变化倾向率，如表3所示。在1961—2024年均均为负值，说明滇池流域近64 a来年降水量为减少趋势，变化趋势总体较小。1961—1980年，6个站点降水量均为减少趋势，其中呈贡、安宁变化趋势最大，晋宁、太华山变化趋势较小；1981—2000年，6个站均为明显增多的趋势；2001—2024年，昆明为增多的趋势，其余5站为减少的趋势，其中，嵩明、太华山、晋宁减少幅度较大。

(2) 月降水量变化倾向率

月平均降水量变化倾向率如表4所示，滇池流域及周边站点1月平均降水量呈明显上升趋势，5月、11月平均降水量呈明显下降趋势，8月除昆明为上升趋势，呈贡为弱下降趋势外，其余3个站呈明显下降趋势，4月、12月变化最小。总体来说，滇池流域及周边各站点干季（11月一次

表3 滇池流域及周边代表站1961—2024年年降水量变化倾向率 (mm/10a)

站名	1961—2024年	1961—1980年	1981—2000年	2001—2024年
昆明	-10.357	-50.092	93.502	38.723
呈贡	-13.839	-108.550	111.850	-12.879
安宁	-13.571	-104.880	50.668	-38.467
晋宁	-21.750	-8.676	51.391	-61.302
太华山	-35.293	-10.035	80.985	-70.301
嵩明	-15.070	-73.313	59.477	-80.454

年4月）降水量变化不大，但雨季（5—10月）降水量明显减少。

表4 滇池流域及周边代表站1961—2024年各月月平均降水量变化倾向率 (mm/10a)

月份	昆明	呈贡	安宁	晋宁	太华山	嵩明
1	2.779	3.281	3.049	3.005	2.542	2.357
2	-0.752	-1.622	0.473	-0.542	-1.871	-0.376
3	0.245	-0.523	0.257	-0.023	-2.132	0.371
4	0.222	0.294	1.087	-0.033	0.155	0.874
5	-4.332	-3.337	-2.562	-3.219	-10.060	1.153
6	-0.187	2.266	0.770	-3.064	-5.870	-3.392
7	-3.549	4.138	-2.047	-1.201	-7.519	1.616
8	1.318	-0.327	-5.348	-8.050	-7.832	-6.829
9	3.125	-0.089	-0.347	-2.432	-3.340	-5.555
10	-5.680	1.187	-4.837	-2.138	-1.344	-1.860
11	-3.662	-5.488	-3.265	-3.839	-8.988	-3.506
12	0.058	1.205	0.234	-0.192	-0.290	0.238

3.2 滇池流域年降水量空间分布特征

利用滇池流域范围内151个自动气象观测站2016—2024年平均年降水量资料绘制滇池流域降水量空间分布图，如图3所示。滇池流域降水量总体出现北多南少的特点。年降水量较大区域位于滇池北岸主城区一带，年降水量在950~1000 mm，以及流域东北角嵩明境内，年降水量在1000~1200 mm。滇池东岸及南岸呈贡区、晋宁区范围内降水相对较少。

4 气象要素与滇池水环境的关系

4.1 滇池水温变化趋势分析

研究表明，湖泊的水温状况将直接或间接影响湖泊水环境中的各种物理、化学和生物过程^[10]。世界气象组织（WMO）发布的《气候平均值计算指南》（WMO-No.1203）中规定使用30年作为反映气候变化规律的参考期，也建议每10年更新一次30年标准参考期。结合现有的滇池水温观测资料，本文选取1991—2020年30年标准参考期的滇池草海、外海水温年平均值及昆明站年平均气温进行分析，如图4所示。滇池草海、外海水温变化趋势基本一致，与年平均气温变化趋势相同，总体呈现上

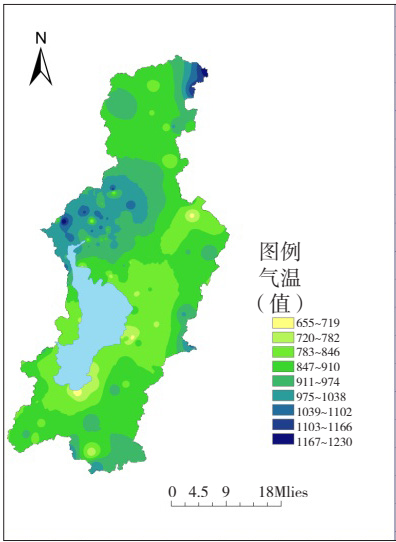


图3 滇池流域年降水量空间分布图

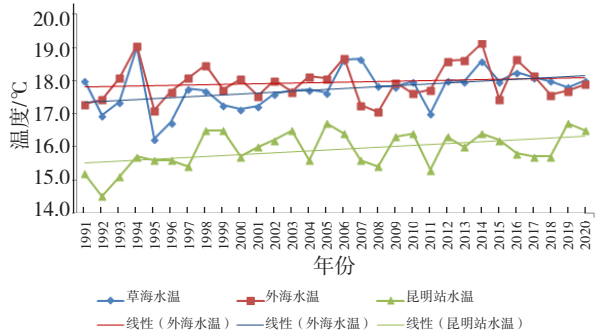


图4 滇池草海、外海水温及昆明站年平均气温变化趋势图

升趋势。从变化倾向率看气温高于水温。

4.2 气象要素与水环境关系分析

水环境影响因素众多，滇池流域及周边6个国家级气象站距离滇池水体距离不同。考虑只有昆明站紧邻滇池草海，能较好地反应该区域气象要素的变化，因此选用昆明站气象数据和滇池草海水质监测数据进行相关性研究。滇池经过治理和保护，2016年水质由劣V类改善为全湖V类，草海从2016年开始水质综合营养状态指数及各项富营养化指标也趋于稳定，因此数据时间范围选取2016年1月—2021年12月气象数据和水环境监测数据进行研究。

计算昆明站月气温与滇池草海月水温的相关系数，如表5所示，气温与水温呈显著正相关，且通过0.01显著性检验。水温与月平均气温和月平均最低气温相关系数>0.8，为极强相关，与月最高气温为强相关，说明气温是影响滇池水温变化的主要因素之一。

通过计算水温、昆明站气温和降水量的月平均值与滇池草海水质监测数据的相关系数，

表5 昆明站气温与滇池草海水温数据相关系数

参数	月平均气温	月平均最高气温	月平均最低气温
水温	0.871**	0.784**	0.919**

注：**在0.01水平（双侧）上显著相关。

表6 昆明站气象要素与滇池草海月水质监测数据相关系数

参数	高锰酸盐指数	氨氮	总磷	总氮	叶绿素a	综合营养状态指数
水温	0.603**	0.132	0.314**	-0.010	0.538**	0.686**
月平均气温	0.574**	0.066	0.289*	-0.237*	0.542**	0.609**
月平均最高气温	0.505**	0.007	0.263*	-0.384**	0.493**	0.517**
月平均最低气温	0.627**	0.130	0.321**	-0.065	0.576**	0.689**
月降水量	0.538**	0.243*	0.340**	0.119	0.397**	0.588**

注：**在0.01水平（双侧）上显著相关。*在0.05水平（双侧）上显著相关。

如表6所示。滇池草海月综合营养状态指数与气象要素相关系数在0.5~0.7，均通过0.01显著性检验，其中与水温、月平均气温、月平均最低气温为强相关，与月平均最高气温、月降水量为中等强度相关。高锰酸盐指数与气象要素相关系数在0.5~0.7，均通过0.01显著性检验，其中与水温、月平均最低气温为强相关，与月平均气温、月平均最高气温、月降水量为中等强度相关；叶绿素a与气象要素相关系数在0.39~0.58，且均通过0.01显著性检验，其中与水温、气温为中等程度相关，与月降水量为弱相关；氨氮、总磷与气象要素相关系数在0.0~0.35，相关性弱。总氮与月降水量为极弱的正相关，与水温、气温为负相关，相关系数在-0.39~-0.1，为弱的负相关。

综上所述，水温、气温、降水量与高锰酸盐指数、叶绿素a及综合营养状态指数相关性较好，且均通过0.01显著性检验；与氨氮、总磷、总氮相关性则较弱。气温和降水对高锰酸盐指数、叶绿素a、综合营养状态指数影响较大。

5 结论

（1）1961—2024年滇池流域年平均气温及各月平均气温均呈上升趋势。从各月变暖趋势看，夏季（6—8月）气温变幅最小，冬季（12月—次年2月）增温最明显，对气候变暖贡献最大。从年平均气温空间分布特征看，滇池周边年平均气温总体呈现围绕滇池向南北降低的趋势，气温大值区位于昆明主城区区域。

（2）1961—2024年滇池周边年降水量总体呈现小幅减少趋势。从月平均降水量变化趋势看，滇池周边各站点干季（11月—次年4月）降水量变化不大，雨季（5—10月）降水量明显减少。从年降水量空间分布特征看，滇池流域年降水空间分

布不均,呈现北多南少特点。

(3) 滇池水温与年平均气温变化趋势基本一致,总体呈上升趋势,气温与水温呈显著正相关。滇池水温、气温、降水量与综合营养状态指数以及高锰酸盐指数、叶绿素a相关性较好,影响较大,与氨氮、总磷、总氮相关性较弱,影响较小。

近64 a来,滇池流域整体呈现气温升高、降水减少的趋势,昆明主城区区域呈现明显的“热岛”和“雨岛”效应。滇池流域降水减少,不利于滇池水的自然补给,此外滇池流域降水区域大值区主要在昆明主城,主城区人口密集,生活污水排放量大,易导致入滇河道污染突出,从而加大滇池治理难度。气温与滇池水温均呈上升趋势,且存在很强的正相关,许多研究表明水温升高是蓝藻暴发的一大诱因,气候变暖、气温升高也大大增加蓝藻发生的概率,同时易导致湖泊水位下降,进而削弱水环境容量和湖泊自净能力。本研究也表明气温、降水量与滇池综合营养状态指数相关性较好,气温、降水变化将直接或间接影响滇池水质的变化。本次研究气象要素与水环境仅采用滇池草海与昆明站数据,下一步我们还将扩大研究范围,深入开展研究,从而为滇池流域生态保护提供参考依据。

参考文献:

- [1] 《云南未来10~30年气候变化预估及其影响评估报告》编写委员会.云南未来10~30年气候变化预估及其影响评估报告[M].北京:气象出版社,2014:235.
- [2] 《西南区域气候变化评估报告:2020》编写委员会.西南区域气候变化评估报告[M].北京:气象出版社,2021:33.
- [3] Z.W.昆兹威克斯,梁静静,柯学莎,等.多因素影响下的气候变化与河流水质[J].水利水电快报,2011,32(11):1-5.
- [4] 王红梅,陈燕.滇池近20a富营养化变化趋势及原因分析[J].环境科学导刊,2009,28(3):57-60.
- [5] 梁中耀,刘永,盛虎,等.滇池水质时间序列变化趋势识别及特征分析[J].环境科学学报,2014,34(3):754-762.
- [6] 刘雪梅,章光新.气候变化对湖泊蓝藻水华的影响研究综述[J].水科学进展,2022,33(2):316-326.
- [7] 潘珉,高路.滇池流域社会经济发展对滇池水质变化的影响[J].中国工程科学,2010,12(6):117-122.
- [8] 田永丽,彭艳秋.滇池流域的气候变化特征、预估及其影响[J].环境科学导刊,2017,36(2):70-76.
- [9] 高志伟.气象与湖泊水环境——以洱海为例[M].北京:气象出版社,2020.
- [10] 白倩倩,梁恩航,王婷,等.洞庭湖表层水温变化特征及其对气候变化的响应[J].北京大学学报(自然科学版),2022,58(2):345-353.
- [11] 张晨,来世玉,高学平,等.气候变化对湖库水环境的潜在影响研究进展[J].湖泊科学,2016,28(4):691-700.
- [12] 张万诚,郑建萌,万云霞,等.气候变化背景下低纬高原地区水资源的分布及其变化[M].北京:气象出版社,2014.

Characteristics of Climate Change in the Dianchi Lake Basin and Its Relationship with the Water Environment

DUAN Yan-nan¹, WANG Shun-jin², ZHOU Duo-duo¹, LI Xiao-peng¹
(1. Kunming Meteorological Bureau, Kunming Yunnan 650500, China)

Abstract: Based on meteorological data from six national meteorological observation stations (Kunming, Chenggong, Jinning, Anning, Taihua Mountain, and Songming) in and around the Dianchi Lake Basin from 1961 to 2024, alongside data from 151 automatic weather stations and water environment monitoring records, this study analyzes the variation trends and spatial distribution characteristics of temperature and precipitation in the Dianchi Lake Basin over the past 64 years, as well as the relationship between meteorological elements and the water environment. The results indicate that the annual average temperature in the Dianchi Lake Basin has exhibited an upward trend over the past 64 years, with a significant warming trend observed since the 1990s. Winter (December to February of the following year) contributed the most to this warming, while summer (June to August) experienced the smallest temperature fluctuations. Annual precipitation shows a slight decreasing trend, characterized by a significant reduction during the rainy season (May to October) and minor changes during the dry season (November to April of the following year). Spatially, the annual average temperature generally decreases from the Dianchi Lake area towards the northern and southern regions, with the highest temperature zone located in the main urban area; meanwhile, the spatial distribution of annual precipitation is characterized by higher amounts in the north and lower amounts in the south. Air temperature is significantly and positively correlated with water temperature. Furthermore, water temperature, air temperature, and precipitation are strongly correlated with the permanganate index, chlorophyll-a, and the comprehensive trophic state index, exerting a substantial impact. Changes in air temperature and precipitation will directly or indirectly affect the water quality of Dianchi Lake.

Key words: Dianchi Lake basin; temperature; precipitation; water environment; variation characteristics