

基于自然邻点插值法的洱海湖面降水特征分析

高志伟^{1,2} 杨坤琳¹ 潘坤³ 陈彩霞¹

(1 云南省大理白族自治州气象局, 大理 671000; 2 中国气象局横断山区灾害性天气研究中心, 昆明 650034;
3 华南理工大学计算机科学与工程学院, 广州 510006)

摘要 湖面降水是影响湖泊水量和水质的一个重要因素之一,对湖面降水的研究有利于湖泊水环境的研究和治理。本文利用洱海周边 11 个气象站降水观测数据,对洱海周边站点的降水进行分析,并基于自然邻点插值法对洱海湖面降水进行分辨率为 0.01° 的网格插值,分析洱海湖面降水的分布特征。结果表明:洱海湖面降水分布时空差异显著,时间上具有季节性特征,夏季最多,秋季次之,冬季最少;空间上存在显著分布不均,降水高值中心位于洱海中部靠西岸湖湾区域,低值中心位于东南部湖区,最大格点降水量是最小格点的 1.9 倍;湖面降水存在明显的季节性空间振荡特征,降水的高值中心夏季略有北移向外呈发散性递减。洱海湖面降水时空分布特征的研究为大气湿沉降敏感区域和时段的划分提供数据支持,同时为湖泊水环境研究治理提供科学的技术支持。

关键词 洱海;湖面降水;自然邻点插值法

中图分类号: P413 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20200417 **文献标识码:** A

引言

洱海地处云南省大理白族自治州境内,是云南省第 2 大高原淡水湖泊,湖面面积 252 km^2 ;湖泊南北长 42 km,东西宽 4~9 km,湖型狭长,来水主要为降水和融雪^[1]。洱海流域地形复杂,地处亚洲季风气候区,为亚热带高原季风气候,受季风影响,气候水平分布复杂,且受潮陆风和山谷风的影响,局地气候特征显著^[2-3]。徐安伦等^[4]的研究发现,洱海流域降水在空间上分布差异显著,洱海湖区降水西部多东部少。简单的面雨量不足以表征洱海湖面降水的分布特征。

降水是影响湖泊水环境的重要因素之一,准确的降雨量资料对湖泊水环境研究及治理应用来说十分重要^[5-6]。湖面降水是计算湖泊水量变化的必要因子之一^[7],对水质的影响有着重要的作用,降水本身对蓝藻爆发也具有一定抑制作用^[8-9]。谢国清等^[8]对滇池的研究认为,降水不利于蓝藻水华的产生,王佳等^[10]对盛夏人工增雨防控太湖蓝藻的效果

进行分析,发现增雨降温对防控太湖蓝藻有积极的作用。同时,降水也是影响污染物颗粒大气沉降的重要因素^[11-14],大气湿沉降是太湖流域氮、磷输入的重要途径,对湖泊富营养化的贡献不容忽视。

对洱海湖面降水插值的分布特征进行分析,加深了对湖面无站点区域的降水分布特征的认识,有助于进一步了解洱海水质、水量及污染物湿沉降的迁移变化特征,对洱海区域的降水预报以及降水对水体环境的影响等方面具有重要意义。由于雨量观测站点分布限制,以往研究多基于湖泊外围单站降水数据资料进行分析,受地形影响,洱海周边各站点的降水有一定差别,且洱海湖型狭长,简单的面雨量不能满足洱海环境污染治理的需要,因此,科学的网格化湖面降水研究对于湖泊水环境研究十分必要^[15-16]。气象数据网格化插值需根据研究目的及研究区域特征选取合适的插值方法^[17],基于泰森多边形的自然邻点插值法是一种根据区域比例决定各站点影响权重较为精确的插值方法^[18],在对气象数据的空间插值及网格化研究中具有广泛的应用和良

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

2018 年云南省州(市)区域创新能力提升专项资金项目(2018CA011-02)资助

作者简介:高志伟,男,1973 年生,硕士,高级工程师,主要从事天气气候分析与应用,Email:24509325801@qq.com

收稿日期:2020 年 9 月 29 日;定稿日期:2021 年 5 月 21 日

好的效果^[18-20],能够满足对洱海湖面降水时空分布特征进行研究的需求。因此,本文不对过往研究提出的由于湖面与陆面热力差异,中大型湖泊与小型湖泊群^[21-23]可能会出现湖效应降水事件进行单独考虑,仅以洱海周边 11 个气象站月降水观测数据为基础,从数学方法上对洱海湖面降水进行等间距格点插值研究,尝试为洱海生态环境修复保护提供科学的数据支持。

1 资料与方法

1.1 资料

所用插值降水量数据来自洱海周边的 11 个自动气象站,其中 1 个国家级气象站,9 个区域自动站,以及大理机场的自动气象观测站,站点分布如图 1 所示。站点平均海拔为 2041.8 m,站点间最大海拔高差为 235 m,时间为 2016 年 1 月至 2019 年 12 月,共 4 年 1461 个时次。大理国家观象台及大理机场资料完整率为 100%,区域站资料完整率在 99.11%~100%之间,区域站出现缺省的日数以大理国家观象台资料为参照,判断是否为降雨日后,再进行线性订正。插值效果检验降水量数据来自插值区域内的文武自动气象站(100.27°E, 25.72°N)。

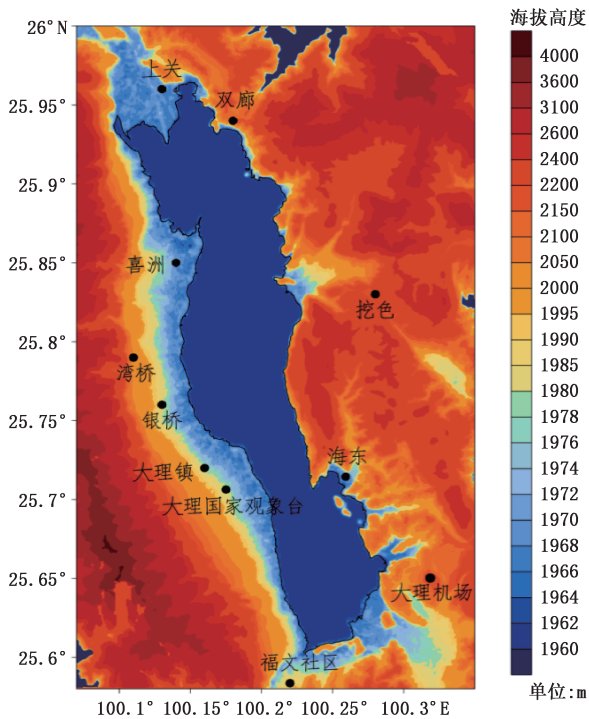


图 1 洱海周边叠加地形站点分布

1.2 自然邻点插值法

将所有相邻站点连成三角形,作这些三角形各边的垂直平分线,将每个三角形三条边垂直平分线的交点连接起来得到的多边形即为泰森多边形,泰森多边形在流域面雨量的计算与区域降水研究有着广泛的应用^[24-26]。自然邻点插值法是一种基于泰森多边形的插值方法,基本原理是对于一组泰森多边形,当在数据集中加入一个新的数据点时,就会修改这些泰森多边形,每一个节点对应的邻接节点称为自然邻点(Natural Neighbors, NN)^[27],使用自然邻点的权重平均值将决定待插点的权重,可构造插值格式^[25]:

$$f(y) = \sum \Phi_i(y) f_i, \quad i \in [1, 2, 3, \dots, N] \quad (1)$$

其中, $f(y)$ 是待插值点 y 的物理量值; i 是点 y 的自然邻点 x_i 的序号, N 为 y 的自然邻点数目; f_i 是点 x_i 的物理量值; $\Phi_i(y)$ 是对应节点 x_i 的插值基函数。

插值基函数 $\Phi_i(y)$ 是由待插值点 y 的自然邻点坐标(Natural Neighbor Coordinates, NNC)定义的。将原始数据集 x 生成一组泰森多边形(图 2a)。将待插值点 y 作为新节点加入数据中,得到一个与该新节点相对应的一组新泰森多边形(图 2b),点 y 所在的泰森多边形面积记为 T_y ,将 T_y 分为 N 个部分,每部分面积为点 y 的自然邻点 x_i 所在泰森多边形面积的变化量 T_{x_i} ,可得到插值点 y 的插值基函数:

$$\Phi_i(y) = \frac{T_{x_i}}{T_y} \quad (2)$$

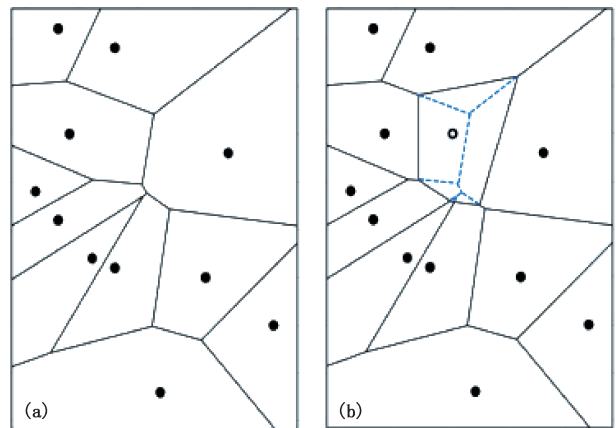


图 2 原始数据集 x 生成的一组泰森多边形(a); 将待插值点 y 加入数据中得到的一组新的泰森多边形(b) (空心点为插值点 y ,虚线部分为自然邻点所在的泰森多边形面积的变化量)

1.3 湖面降水量插值

利用洱海周边的 11 个气象站月降水量数据,基于自然邻点插值法,进行降水量 0.01°分辨率的网格插值,应用地理信息系统识别出洱海湖面区域的 245 个格点。

2 洱海周边站点降水量特征分析

从洱海周边各站点 2016—2019 年的逐年降水量(图 3)上看到,同一年份各站点间年降水量具有一定差异,不同年份各站点间的年降水量差异较为相似。这 4 年中,站点平均年降水量最大值出现在 2016 年,为 971.1 mm,最小值出现在 2019 年,为 729.7 mm,相差 241.4 mm。站点年降水最大值在 2016 年和 2017 年出现在洱海西部的银桥,2018 年和 2019 年出现在洱海西部的湾桥,站点降水最小值这四年均出现在洱海东南部的海东;年内站点年降水量差值最大为 1023.7 mm,出现在 2018 年,差值最小为 475.2 mm,出现在 2019 年。降水相对偏多的年份,站点间年降水量差异较大,而降水相对偏少的年份站点间差异较小。综上所述,洱海周边站点的降水分布具有时间和空间上的差异性。

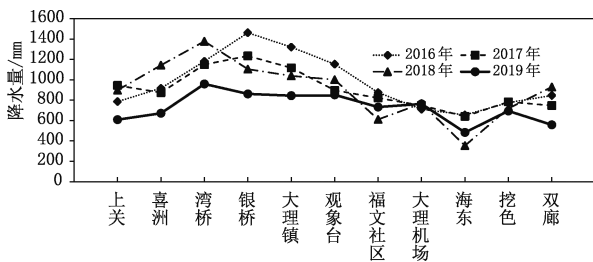


图 3 洱海周边站点 2016—2019 年逐年降水量

洱海周边 11 个站点 4 年平均降水量为 877.4 mm,最大降水量为 1166.7 mm,最小降水量为 533.3 mm,相差 633.4 mm,降水量最大站点是最小站点的 2.2 倍。空间分布如图 4 所示,洱海西侧降水较多,东侧降水较少,降水量的高值区位于湾桥、银桥一带,湾桥年平均降水量为 1166.7 mm,银桥年平均降水量为 1165.3 mm;低值区位于洱海东南部的海东,年平均降水量为 533.3 mm。降水分布在洱海东西两侧差异明显,洱海西侧的降水量以湾桥、银桥为中心向南北两侧逐渐递减,洱海东侧的降水以东南部的海东为中心向南北两侧逐渐递增。

通过以上数据的分析,发现洱海周边站点降水

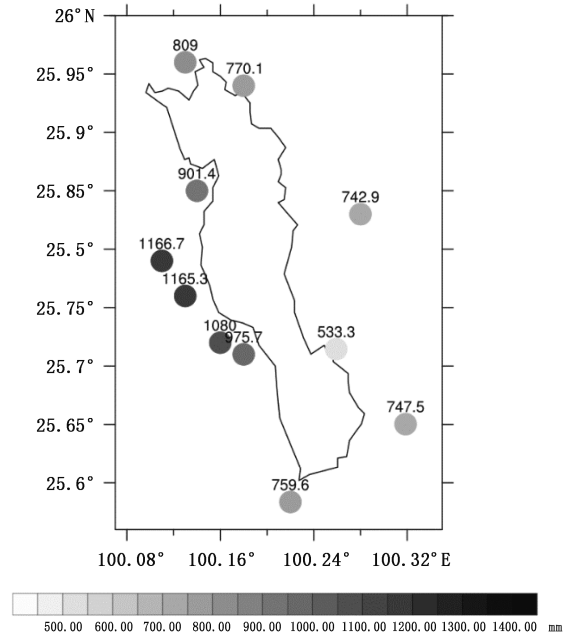


图 4 洱海周边站点 2016—2019 年 4 年平均降水量空间分布

量分布在时间上呈现出显著的季节性特征,在空间分布上呈现出了明显的局地性差异。洱海湖型狭长,沿湖周边站点降水量存在的差异性一定程度上反映了洱海湖面降水的分布特征。

3 精度评价

实际验证是应用较为广泛的气象要素插值精度评价方法之一^[28-29],实际验证将一部分气象站点用于插值计算,而另一部分站点作为验证数据不参与插值计算,利用验证数据站点的实际观测值与插值结果对比,计算验证站点实际观测值与估算值的误差。本文选取平均绝对误差(M_{AE})、均方根误差(R_{MSE})和相关系数(r)为实际验证的评价指标,计算公式分别为:

$$M_{AE} = \sum_{i=1}^n \frac{|K_{oi} - K_{ei}|}{n} \quad (3)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(K_{oi} - K_{ei})^2}{n}} \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(K_{oi} - \bar{K}_o)(K_{ei} - \bar{K}_e)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (K_{oi} - \bar{K}_o)^2 \sum_{i=1}^n (K_{ei} - \bar{K}_e)^2}} \quad (5)$$

其中, K_{oi} 为站点第 i 个时次的实测值; K_{ei} 为站点第 i 个时次的插值估算值, n 为总时次数, \bar{K}_o 为站点实

测值的平均值, \bar{K}_e 为站点插值估算值的平均值。

M_{AE} 反映样本数据估算值的总体误差和精度水平, R_{MSE} 反映样本数据估算值的灵敏度和极值效应, r 反映样本数据与估算值的相关度, 以插值区域内的文武自动气象站数据为检验样本进行实际检验。

从 2016—2019 年降水量的实测值与估算值对比(表 1)看到, 文武站年平均降水量为 574.5 mm, 平均年降水实测值与估算值的差值为 -16.8 mm, 逐年降水实测与估算的差值在 -85.9~91.7 mm 之间。

表 1 文武站 2016—2019 年降水量实测值与估算值对比
mm

年份	实测	估算	差值
2016 年	648.0	692.7	-44.7
2017 年	591.7	677.6	-85.9
2018 年	544.7	452.9	91.7
2019 年	513.8	542.3	-28.5
平均	574.5	591.4	-16.8

从 2016—2019 年降水量的实测值与估算值检验结果(表 2)看到, 文武平均绝对误差(M_{AE})为 7.0 mm, 均方根误差(R_{MSE})为 13.0 mm, 相关系数(r)为 0.98, 相关系数通过了 99.9% 可信度检验。检验结果表明, 实测值与估算值的相关性较好, 估算的总体误差较小, 精度水平较高。

表 2 文武 2016—2019 年降水量计算检验

站点	平均绝对误差/mm	均方根误差/mm	相关系数
文武	7.0	13.0	0.98*

注: * : 通过 99.9% 可信度检验

4 洱海湖面降水分布特征分析

4.1 空间分布特征

通过对基于自然邻点插值法得到的洱海湖面降水格点数据进行分析, 洱海湖面年平均降水量为 863.3 mm, 降水量空间分布与周边气象站类似, 但较洱海周边气象站的平均降水量偏少 14.1 mm, 湖面最大格点降水量为 1122.8 mm, 最小格点降水量为 591.2 mm, 差值为 531.6 mm, 最大格点是最小格点的 1.9 倍, 其中, 春季湖面平均降水量为 104.0 mm, 最大格点降水量为 206.8 mm, 最小格点降水量为 62.4 mm, 差值为 144.4 mm, 最大格点是最小格点的 3.3 倍; 夏季降水量最多, 湖面平均降水量为

479.2 mm, 最大格点降水量为 633.8 mm, 最小格点降水量为 333.8 mm, 差值为 300.0 mm, 最大格点是最小格点的 1.9 倍; 秋季湖面平均降水量为 189.4 mm, 最大格点降水量为 271.1 mm, 最小格点降水量为 119.1 mm, 差值为 152.0 mm, 最大格点是最小格点的 2.3 倍; 冬季降水量最少, 湖面平均为 34.7 mm, 最大格点降水量为 80.8 mm, 最小格点降水量为 10.8 mm, 差值为 70.0 mm, 最大格点是最小格点的 7.5 倍。

降水量以夏季最多, 秋季次之, 冬季最少, 最大格点降水量与最小格点降水量差值夏季最大, 秋季次之, 冬季最小。由此可以看到, 洱海湖面降水在时间和空间分布的差异均较大, 不同区域由湖面降水形式汇入洱海中的水量差异较大。

4.2 季节性空间振荡

从 4 年平均的洱海湖面季节降水量分布(图 5)上看到, 降水的高值中心在四个季节中均位于洱海中部靠西岸附近湖面, 夏季中心略有北移, 低值中心在夏秋两季位于东南部的海东附近湖区, 降水由西岸至东岸逐渐递减; 春秋两季中部降水较多, 南部和北部较少, 降水东西向差异较为明显; 夏季中部、北部降水较多, 南部降水较少, 冬季则呈反相分布特征, 中部、南部降水较多, 北部降水较少; 从夏秋季降水分布可以明显看到降水由高值中心向外呈发散性递减, 由低值中心向外呈发散性递增的分布特征。湖面降水分布上的时空差异结合湖面大气污染物沉降数据, 可以为大气湿沉降的敏感区域和时段的划分提供参考, 同时这种差异同样可能会对湖内水流循环和蓝藻爆发产生一定的影响。

4.3 分区变化特征

按照湖面年平均格点降水量分布趋势, 将湖面年平均格点降水量小于 760 mm 的 58.6 km² 区域定为 I 区, 760~900 mm 的 133.7 km² 定为 II 区, 大于 900 mm 的 59.7 km² 定为 III 区。分区空间分布如图 6 所示, III 区靠近洱海中部的西岸, I 区位于洱海南部, II 区为洱海中东部及北部湖面区域。

分区统计结果见表 3, 年降水量 II 区较 I 区偏多 170.6 mm, 偏多 26%, III 区较 II 区偏多 135.4 mm, 偏多 16%。其中, 春季 I 区较 II 区偏少仅 9 mm, 较 III 区偏少近 50 mm, 表明春季降水量南北无明显差异, 主要差异在中部西岸湖区, 其降水量是其它区域的 1.5 倍; 夏季 III 区与 II 区相差不到 10%,

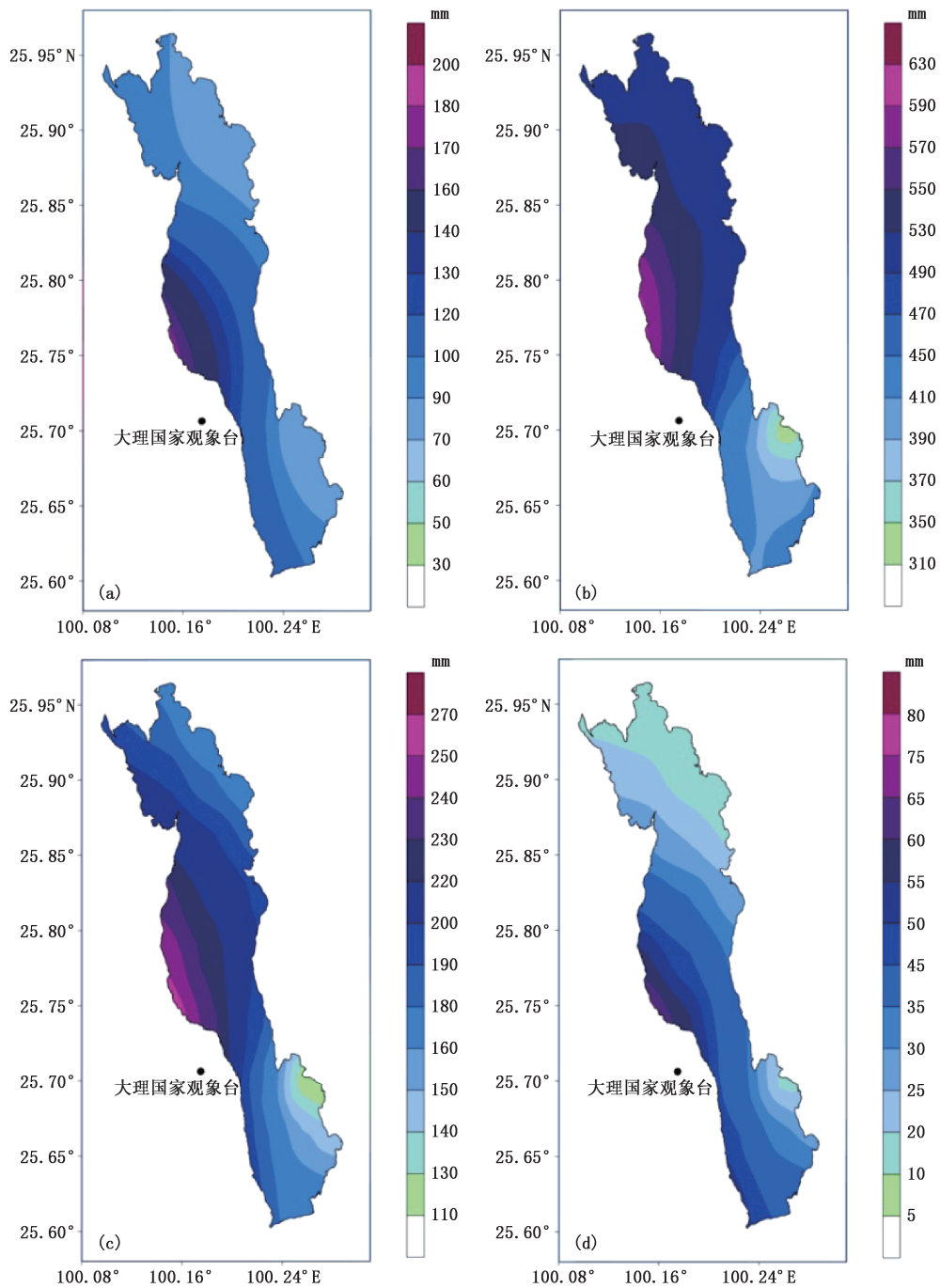


图 5 2016—2019 年平均洱海湖面季节降水量:(a)春季,(b)夏季,(c)秋季,(d)冬季

但较 I 区偏多 130~170 mm, 偏多 33%~44%, 表明南部与其他区域差异显著, 夏季降水是造成年降水量显著差异的关键; 秋季呈现的特征类似年降水量, II 区较 I 区偏多 24%, III 区较 II 区偏多 17%; 冬季则出现 III 区最大, I 区次之, II 区最小, 冬季与其

他季节不同, 降水量排序为 III 区 > I 区 > II 区。分干季、湿季统计表明, 干季 I 区、II 区降水量比较接近, 较 III 区降水量明显偏少, III 区降水量大致是其他区域的 1.5 倍; 湿季降水量受夏季影响大, 特征类似夏季, II 区与 III 区差异不大, I 区明显偏少。

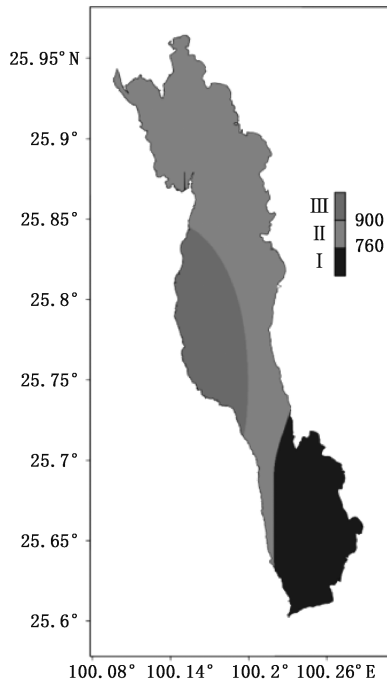


图6 2016—2019年洱海区域降水量分布

表3 洱海分区降水量 mm

	I区	II区	III区
春季	90.2	99.3	140.1
夏季	383.6	513.4	553.5
秋季	159.5	198.3	232.9
冬季	35.6	28.5	48.4
干季	125.8	127.8	188.5
湿季	543.1	711.7	786.3
年	668.9	839.5	974.9

5 结论

通过对洱海周边实际站点的降水及基于自然邻点插值法插值得到的洱海湖面降水分布进行分析,得到如下结论:

(1)洱海周边站点降水分布不均差异显著,降水高值位于洱海中部西岸的银桥、湾桥,向南北两侧逐渐递减,低值位于南部东岸的海东向南北两侧逐渐递增,同年降水量站点间差异最大达1023.7 mm。

(2)精度评价结果表明,基于自然邻点插值法得到的降水实测值与估算值的相关性较好,估算的总体误差较小,精度水平较高。

(3)湖面降水分布特征与洱海周边降水分布特征一致,但基于算法限制较洱海周边气象站的平均降水量偏少。湖面降水分布存在季节性空间振荡特

征,降水高值区中心夏季略有北移,南部降水较少,春秋中部降水较多,南部和北部较少,冬季则中部、南部降水较多,北部降水较少。

(4)分区统计结果表明春季降水量南北部无明显差异,中部西岸区域降水量为其它区域的1.5倍;夏季南部与其它区域差异显著,夏季降水是造成年降水量显著差异的关键;秋季特征类似年降水量;冬季则不同,南部区降水量略大于北部区。

参考文献

- [1] 金相灿,等. 中国湖泊环境 [M]. 北京:海洋出版社,1995. 29-72.
- [2] 徐安伦,赵晓红,付志嘉,等. 洱海盆地水面与地面气象要素变化特征的比较 [J]. 大气科学学报, 2011, 34(2):225-231.
- [3] 徐安伦,董保举,刘劲松,等. 洱海湖滨大气边界层结构及特征分析 [J]. 高原气象, 2010(3):637-644.
- [4] 徐安伦,李育,杨帆,等. 连年干旱背景下洱海流域降水的精细化特征 [J]. 高原气象, 2017, 36(6):1557-1566.
- [5] 肖茜,杨昆,洪亮. 近30a云贵高原湖泊表面水体面积变化遥感监测与时空分析 [J]. 湖泊科学, 2018, 30(4):1083-1096.
- [6] 孙凤华,李丽光,梁红,等. 1961—2009年辽河流域气候变化特征及其对水资源的影响 [J]. 气象与环境学报, 2012, 28(5): 8-13.
- [7] 王志杰,李畅游,张生,等. 基于水平衡模型的呼伦湖湖泊水量变化 [J]. 湖泊科学, 2012, 24(5):667-674.
- [8] 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, 22(3).
- [9] 张德林,李军,步春花,等. 淀山湖蓝藻水华暴发的气象条件与预警初探 [J]. 大气科学研究与应用, 2014(1):83-89.
- [10] 王佳,陈钰文. 2010年盛夏人工增雨防控太湖蓝藻效果分析 [J]. 中国农学通报, 2015, 31(14):232-237.
- [11] 高蓉,韩焕豪,崔远来,等. 降雨量对洱海流域稻季氮磷湿沉降通量及浓度的影响 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 191-198.
- [12] 牛勇,牛远,王琳杰,等. 2009-2018年太湖大气湿沉降氮磷特征对比研究 [J]. 环境科学研究, 2020, 33(1):122-129.
- [13] 余辉,张璐璐,燕姝雯,等. 太湖氮磷营养盐大气湿沉降特征及入湖贡献率 [J]. 环境科学研究, 2011, 24(11):1210-1219.
- [14] 何宗健,蔡静静,倪兆奎,等. 洱海不同途径氮来源季节性特征及对水体氮贡献 [J]. 环境科学学报, 2018, 38(5): 254-263.
- [15] Wagner P D, Fiener P, Wilken F, et al. Comparison and evaluation of spatial interpolation schemes for daily rainfall in data scarce regions [J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2012, 464-465.
- [16] Ly S, Charles C, Degre A. Different methods for spatial interpolation of rainfall data for operational hydrology and hydrological modeling at watershed scale. A review [J]. Biotechnology Agronomy

- Society & Environment, 2013, 17(2):392-406.
- [17] 廖荣伟,曹丽娟,张冬斌,等. 中国地面气温和降水网格化数据精度比较[J]. 气象科技, 2017, 45(2):364-374.
- [18] 许雯,董美莹,陈锋. 基于逐时降水站点资料空间插值方法对比研究[J]. 气象与环境学报, 2017, 33(1): 34-43.
- [19] Nynke H, Malcolm H, Mark N, et al. Comparison of six methods for the interpolation of daily European climate data [J]. Journal of geophysical research, 2008, 113, D21110, doi: 10.1029/2008JD010100.
- [20] 张梦远,姚瑶. 吉林省气温与降水数据空间插值与分布研究[J]. 吉林农业, 2018(20):108-110.
- [21] 刘熙明,傅敏宁,邹海波. 湖泊对降水的影响研究回顾[J]. 气象与减灾研究, 2012, 35(1):1-6.
- [22] Petterssen S, Calabrese P A. On some weather influences due to warming of the air by the Great Lakes in winter [J]. J Meteor, 1959, 16(6): 642-652.
- [23] Laird N F, Sobash R, Hodas N. The frequency and characteristics of lake-effect precipitation events associated with the New York State Finger Lakes [J]. J Appl Meteor Climatol, 2009, 48(4):873-886
- [24] 尉英华,东高红,徐妹. 海河流域不同地形站网密度对面雨量精度的影响[J]. 气象与环境学报, 2014, 30(6):75-79.
- [25] 陈光舟,张晓红. 淮河流域面雨量计算方法的比较分析,安徽农业科学, 2009, 37(24):11637-11640.
- [26] 彭小燕,杜银,丁裕国. 基于 Voronoi 图的强降水过程空间非均匀性定量表征方法[J]. 气象科技, 2013, 41(3):522-52.
- [27] 高洋,张健. 基于自然邻点插值的数据处理方法[J]. 中国科学院大学学报, 2005, 22(3):346-351.
- [28] 赵平伟,鲁镁,彭贵芬,等. 复杂地形区域平均气温空间插值方法研究[J]. 气象科技, 2014, 42(6):1002-1008.
- [29] 黄慧君,王永平,李庆红. 气候变暖背景下洱海水面蒸发量的变化及影响因素[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(1):32-35.

Characteristics Analysis of Precipitation over Erhai Lake Surface Based on Natural Neighbour Interpolation Method

GAO Zhiwei^{1,2} YANG Kunlin¹ Pan Kun³ CHEN Caixia¹

(1 Dali Meteorological Bureau of Yunnan, Dali 671000; 2 Hengduan Mountains Disaster Weather Research Center of China Meteorological Administration, Kunming 650034; 3 School of Computer Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641)

Abstract: Precipitation over the lake surface is one of the essential factors affecting the water quantity and quality of the lake. This article uses precipitation observation data from 11 meteorological stations around Erhai Lake to analyze the precipitation characteristics around the Erhai Lake and based on the natural neighbour interpolation method, the precipitation over Erhai Lake is interpolated by the 0.01° resolution grid. The results show that the distribution of precipitation on the Erhai Lake has a seasonal feature. The precipitation is largest in summer, the second in autumn, and the smallest in winter. There is also a significantly uneven distribution in space. The high-value centre exists in the central part of the Erhai Lake, nearby the west bank, and the low-value centre exists in the lake area near Haidong Station in the summer and autumn seasons. The spatial and temporal differences in precipitation on the lake surface are significant. This study has a specific reference value for the regional sensitivity study of the impact of precipitation on Erhai water quality and quantity. It offers the technical support for the precipitation prediction on water surface and the research and management of the water environment for the lake.

Keywords: Erhai Lake; precipitation over lake surface; natural neighbour interpolation method