Climate Change Research Letters 气候变化研究快报, 2025, 14(5), 961-972
Published Online September 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ccrl
https://doi.org/10.12677/ccrl.2025.145095

丽江高原湖泊首场透雨分析

杨沛琼，董自香，靳宗许，元　超

丽江市气象局气象台，云南　丽江

收稿日期：2025年7月28日；录用日期：2025年8月28日；发布日期：2025年9月5日

摘　要

通过对丽江两大高原湖泊首场透雨分析发现泸沽湖和程海湖首场透雨出现的日期呈现先偏早后偏晚的趋势，从60年代到90年代中期首场透雨日期出现偏早的趋势，之后一直到2023年首场透雨出现日期是一个呈现偏晚的阶段。首场透雨出现在5月份的频率最高，泸沽湖达63%、程海湖达49%，其次是6月份，仅有1到2场首场透雨出现在7月。首场透雨出现时，高空槽配合切变线的形势占比最高，达45%左右，其次是高原槽配合切变线的形势，为25%左右，另外高空槽配合低层西南气流、高原槽叠加南支槽也会出现透雨天气，但高空有高空槽或高原槽影响且低空无天气系统配合时，泸沽湖会出现透雨天气，但程海湖在该环流形势下不会出现透雨天气。

关键词

高原湖泊，首场透雨

Analysis of the First Soaking Rain in the Plateau Lakes of Lijiang

Peiqiong Yang, Zixiang Dong, Zongxu Jin, Chao Yuan

Lijiang Meteorological Bureau Observatory, Lijiang Yunnan

Received: Jul. 28th, 2025; accepted: Aug. 28th, 2025; published: Sep. 5th, 2025

Abstract

Analysis of the first soaking rain in two plateau lakes of Lijiang reveals that the occurrence dates of the first soaking rain in Luguhu and Chenghai Lake show a trend of first becoming earlier and then later. From the 1960s to the mid-1990s, the first soaking rain tended to occur earlier, but from then until 2023, the trend shifted to later occurrence. The first soaking rain most frequently occurs in May, with Luguhu Lake at 63% and Chenghai Lake at 49%, followed by June. Only 1 to 2 instances of the first soaking rain were recorded in July. When the first soaking rain occurs, the most common synoptic pattern is an upper-level trough combined with a shear line, accounting for about 45% of

文章引用: 杨沛琼, 董自香, 靳宗许, 元超. 丽江高原湖泊首场透雨分析[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(5): 961-972.
DOI: 10.12677/ccrl.2025.145095

cases. The second most frequent pattern is a plateau trough with a shear line, making up around 25%. Additionally, soaking rain can also result from an upper-level trough paired with low-level southwesterly airflow or a plateau trough overlapping with a southern branch trough. However, when an upper-level trough or plateau trough is present without any accompanying low-level weather system, Luguhu Lake may still experience soaking rain, whereas Chenghai Lake does not produce soaking rain under such circulation conditions.

Keywords

Plateau Lakes, The First Soaking Rain

1. 引言

在云南的九大高原湖泊中丽江市占有两个，分别为泸沽湖和程海湖。泸沽湖位于云南省西北部宁蒗县和四川省西南部盐源县的交界处，是我国第三深淡水湖泊。湖泊略呈北西一东南向，南北长 9.5 km，东西宽 5.2 km，湖岸线长 44.0 km，其中云南境内为 24.1 km。泸沽湖湖水主要靠雨水和临时性的沟溪汇水和区间坡面漫流补给，云南省境内主要入湖河流有 5 条，沟溪 4 条。泸沽湖是一个高原断层溶蚀陷落湖泊，每条河流长度均小于 10 千米，径流面积均小于 20 平方千米。入湖河流源近流短，呈现出明显的季节性。另有部分地下水补充。

程海湖为云南省永胜县境内金沙江流域湖泊，湖形似米粒，南北狭长，东有东山，西有西山，南部地势较低，是一个“两山夹一湖”的湖盆区。湖盆水面海拔 1501 m，而东、西、北部盆缘山岭高程多在 2500 m~3300 m 间，二者高差达 1000 m~1800 m。程海湖无长年性的固定地面水源补给，无出流，为封闭型湖泊。水量补给主要来自地下水、湖面降水以及雨季湖周地表径流(临时性河沟溪流汇水和坡面漫流)。程海地区周边地表水系发达，流域内主要入湖河流和冲沟有 47 条，但流程较短，且多数河流为季节性溪流。

云南省丽江市具有独特的低纬高原山地季风气候特征，冬半年控制云南的大气环流主要为西风带天气系统，形成典型的干季。干季丽江降水总量仅占全年的 6%，经过漫长的冬春少雨季，陆面上集聚了大量的污染物。初期透雨造成的径流将这些污染物冲刷后流入湖泊，易引起湖泊的水质恶化和水生生态系统破坏。研究表明[1]：在降雨径流产生的初期污染物浓度要高于后期的现象。在降雨初期径流中常携带大量污染物，即初期冲刷效应，其对径流污染起着重要作用[2]。降雨量、前期干燥天数和雨强的动态变化对初期冲刷效应均有很大的影响[3] [4]。同时，研究发现在其他条件近似的情况下，雨前干燥天数越长，地表累积的污染物越多，初期冲刷效应也会越强[5]。由此可以看出丽江经过漫长干季后的首场透雨具有很强的初期冲刷效应，在首场透雨天气过程前，如果将河道、沟渠、湖泊附近路面等提前进行清理，将能大大降低降水径流中携带的污染物，控制初期冲刷效应将对控制径流污染起到事半功倍的效果，从而达到湖泊的生态保护。

2. 资料与方法

2.1. 研究资料

目前，宁蒗泸沽湖无气象观测站点，最近站点位于与泸沽湖相距 13 公里的宁蒗县永宁镇乡政府内，为六要素区域自动站。宁蒗县除西北部年降水量偏少外，全县其余大部乡镇年平均降水量均在 800 到 1000 毫米之间，一致性较好，同时，通过分析永宁自动气象观测站 2013~2023 年的年平均降水量，发现宁蒗国

家气象站年降水量级与泸沽湖最近气象观测站永宁站年降水量级相当，年降水量均为 800 到 900 毫米(图 1(a))。因此本研究宁蒗泸沽湖的研究资料使用宁蒗国家气象观测站 1959~2023 年的地面观测降水资料。

永胜县地势北高南低，降水量也呈现北高南低，北部乡镇年平均降水量在 1000 毫米左右，而南部乡镇年平均降水量仅为 500 毫米，永胜县北部乡镇降水量达南部乡镇的两倍，通过分析永胜县自动气象观测站 2013~2023 年的年平均降水量(图 1(b))，发现永胜国家气象站年降水量级与程海北部兴义站点量级相当。因此本研究中程海湖的降水数据采用永胜国家站 1959~2023 年的地面观测降水资料。

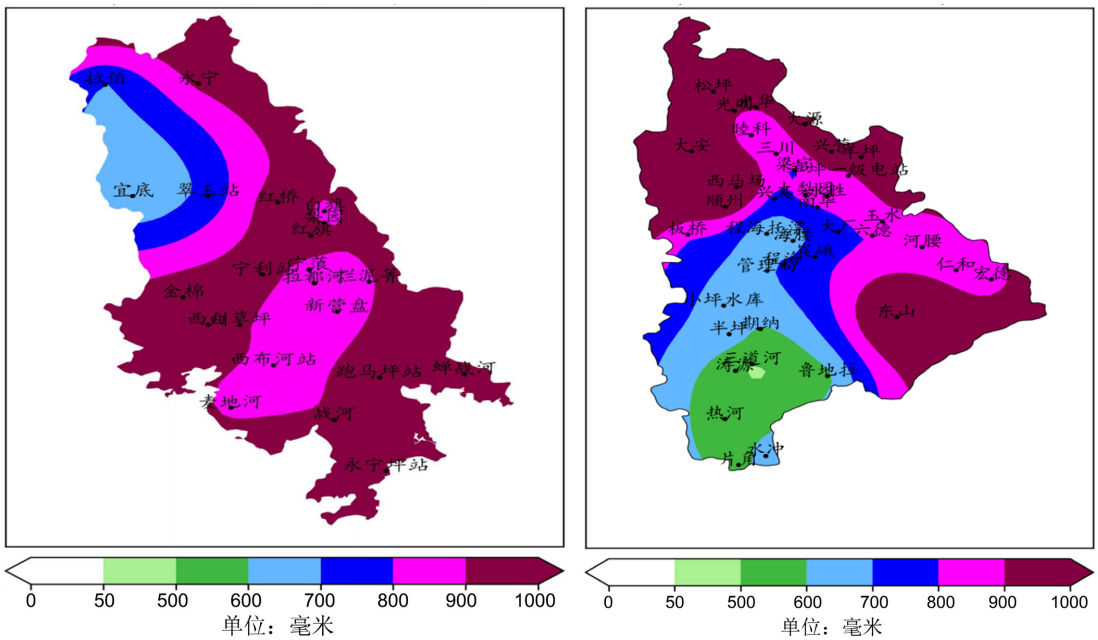


Figure 1. Annual mean precipitation in Ninglang County (a) and Yongsheng County (b) (2013~2023)
图 1. 宁蒗县(a)和永胜县(b) 2013~2023 年年平均降水量

2.2. 透雨标准

选取自 5 月 1 日起，满足任意一天日降雨量 ≥17 mm 或任意 3 天滑动累计雨量 ≥25 mm，且这 3 天中任意一天日降雨量 ≥10 mm 的日定为“透雨”开始日。

2.3. 研究方法

按第一场透雨标准，利用宁蒗和永胜国家气象站 1959 年至 2023 年的降水资料，统计各站的透雨日期。同时对透雨日期进行编码，形成透雨编码日期序列：将雨季 5 月 1 日记为 1，5 月 31 日记为 31，6 月 1 日记为 32，6 月 30 日记为 61，7 月 1 日记为 62，7 月 31 日记为 92。

3. 结果分析

3.1. 丽江高原湖泊首场透雨的时间分布

世界气象组织对气候异常提出 2 种判别标准，本文采用距平大于标准差的 2 倍作为异常标准[6]。对宁蒗泸沽湖第一场透雨日期序列求距平和标准差。标准差值为 13.6，规定距平 ≤−27.2 为异常偏早，−27.2 < 距平 ≤−13.6 为偏早年，−13.6 < 距平 < 13.6 为正常年，13.6 ≤ 距平 < 27.2 为偏迟年，距平 ≥27.2 的年份为异常偏迟年。通过分析得出宁蒗泸沽湖 1960 年、2010 年、2015 年、2019 年共 4 年首场透雨异常

偏晚，无异常偏早年。1986 年和 1994 年为首场透雨偏晚年，1964、1966、1978、1989、1991、1999、2001、2002、2007、2008、2016、2017、2022 年共 13 年首场透雨偏早。

对永胜程海湖第一场透雨日期序列求距平和标准差。标准差值为 15.0，规定距平 ≤ −30.0 为异常偏早，−30.0 < 距平 ≤ −15.0 为偏早年，−15.0 < 距平 < 15.0 为正常年，15.0 ≤ 距平 < 30.0 为偏迟年，距平 ≥ 30.0 的年份为异常偏迟年。通过分析得出永胜程海湖 2010 年、2015 年年共 2 年首场透雨异常偏晚，1991 年为异常偏早年。1960、1969、1971、1986、1994、1997、2000、2019 年为程海湖首场透雨偏迟年，1964、1978、1984、1996、1999、2001、2002、2007、2008、2017 年为首场透雨偏早年。

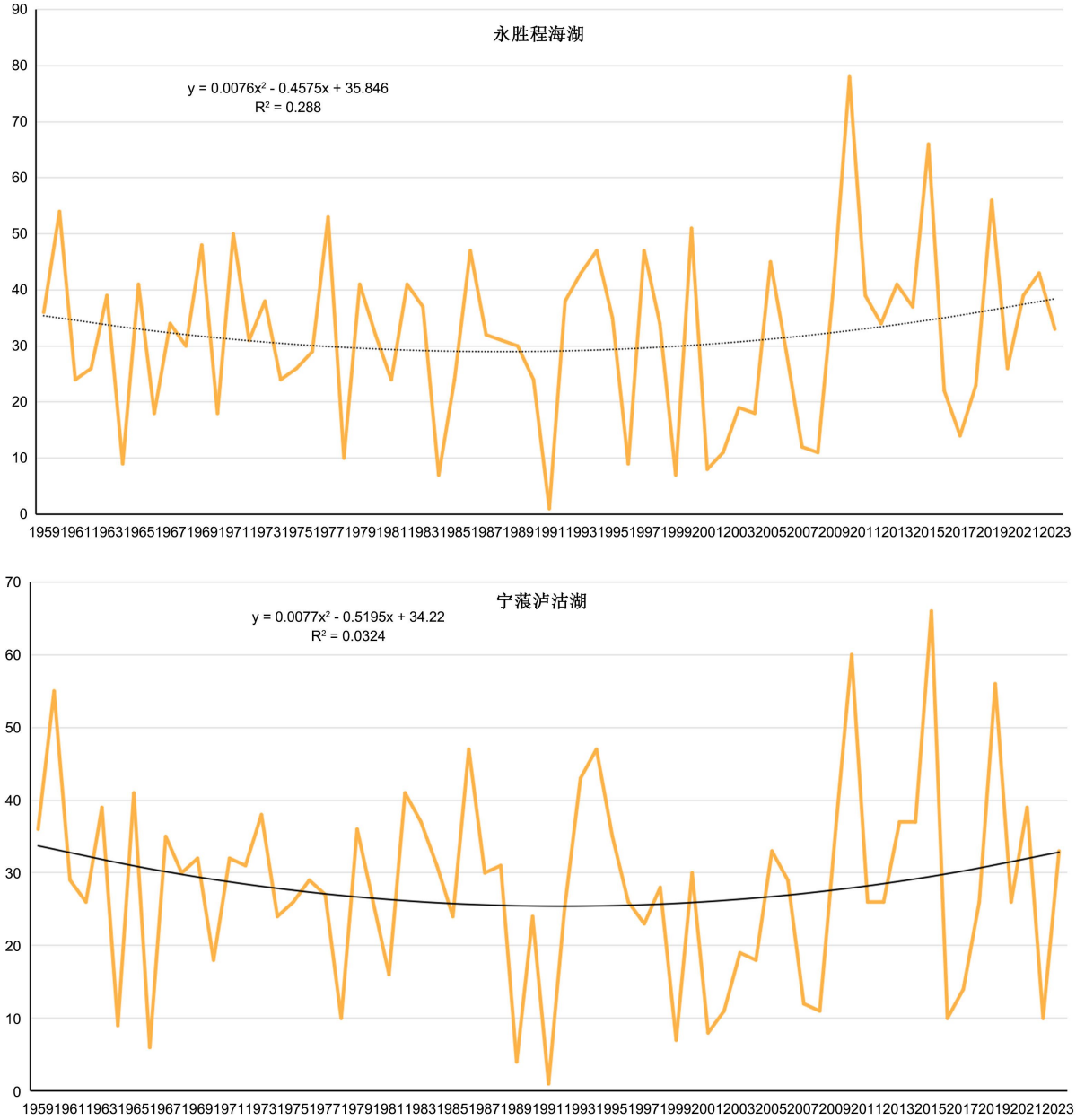


Figure 2. Interannual variation of the first soaking rain date at Luguhu Lake and Chenghai Lake (the line represents interannual variation, the curve represents the polynomial trend)

图 2. 泸沽湖和程海湖首场透雨出现日期年际变化(折线为年际变化，曲线为多项式趋势)

利用线性倾向估计的方法分析 1959~2023 年宁蒗泸沽湖和永胜程海湖首场透雨出现日期的变化。从图 2 可以看出，泸沽湖和程海湖首场透雨出现的日期呈现先偏早后偏晚的趋势，从 60 年代到 90 年代中期首场透雨出现日期是一个提早的趋势，之后一直到 2023 年透雨出现日期是一个偏晚的形势。

按照宁蒗泸沽湖首场透雨出现的时间，在这 65 年中，透雨最早出现在 5 月 1 日，最晚出现在 7 月 5 日。有 41 场首场透雨出现在 5 月份，泸沽湖首场透雨出现在 5 月份的频率高达 63%，23 场透雨出现在 6 月份，频率为 35%，这 65 年中仅有 1 场透雨出现在 7 月份。

按照永胜程海湖首场透雨出现的时间，透雨最早出现在 5 月 1 日，最晚出现在 7 月 17 日。有 32 场首场透雨出现在 5 月份，程海湖首场透雨出现在 5 月份的频率为 49%，31 场透雨出现在 6 月份，频率为 48%，这 65 年中有 2 场透雨出现在 7 月份，频率为 3%。

3.2. 丽江高原湖泊出现首场透雨时大气环流特征分析

分析首场透雨时的环流形势发现(表 1)宁蒗泸沽湖首场透雨次出现时有高空槽配合 700 hPa 切变线，高原槽配合 700 hPa 切变线，高空槽配合低层西南气流、高原槽叠加南支槽、高空槽和高原槽共 6 种环流形势。其中，在这 65 年中共有 31 次首场透雨是高空槽配合切变线的形势，占 48%；有 15 次是高原槽配合切变线的形势，占 23%；8 次过程是高原槽和南支槽同位相叠加，占 12%；有 3 次透雨天气是高空槽配合低层西南气流，占 5%；同时，在高空有高空槽或高原槽影响且低空无天气系统配合时，在这 65 年中共出现 7 次，占 11%，宁蒗泸沽湖也会出现透雨天气，这是不同于永胜程海湖出现首场透雨的天气环流形势。

Table 1. Circulation patterns during the first soaking rain at Ninglang Luguhu Lake (1959~2023)
表 1. 1959~2023 年宁蒗泸沽湖出现首场透雨时环流形势

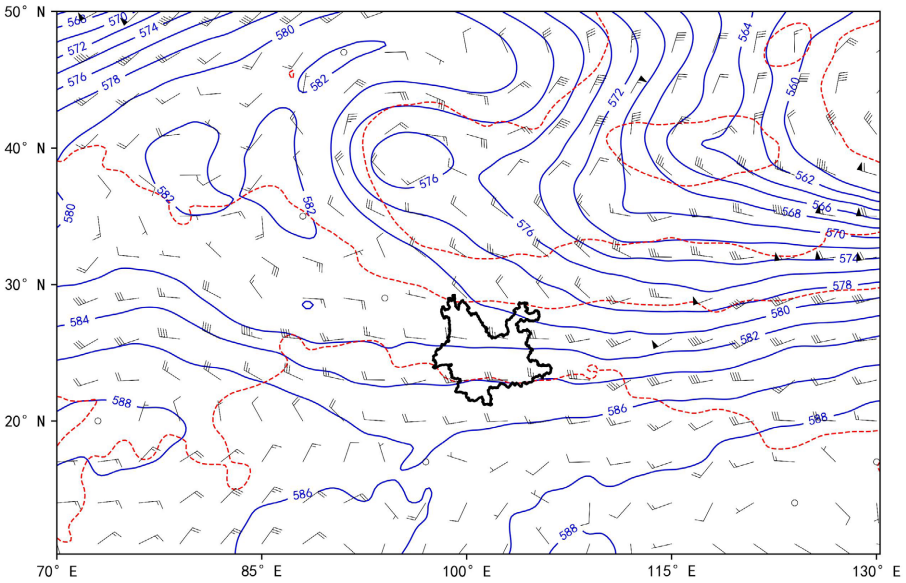
高空槽 + 切变	高原槽 + 切变	高空槽 + 西南气流	高原槽 + 南支槽	高空槽	高原槽
1960, 1964, 1966, 1967, 1969, 1971, 1972, 1973, 1975, 1978, 1979, 1986, 1988, 1991, 1992, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2004, 2008, 2009, 2011, 2015, 2017, 2020, 2023	1963, 1965, 1968, 1970, 1980, 1984, 1990, 1993, 2005, 2006, 2014, 2018, 2019, 2021, 2022	1959, 1982, 2013	1961, 1962, 1974, 1976, 1983, 1985, 2002, 2003, 2007	1977, 1987, 1989	1981, 2010, 2012, 2016

分析环流形势发现(表 2)，高空槽配合 700 hPa 切变线，高原槽配合 700 hPa 切变线，高空槽配合低层西南气流、高原槽叠加南支槽这 4 种环流形势是永胜程海湖首场透雨出现时的大气环流形势。其中，在这 65 年中共有 28 次首场透雨是高空槽配合切变线的形势，占 43%；有 19 次是高原槽配合切变线的形势，占 29%；14 次过程是高原槽和南支槽同位相叠加，占 22%；有 4 次透雨天气是高空槽配合低层西南气流，占 6%。

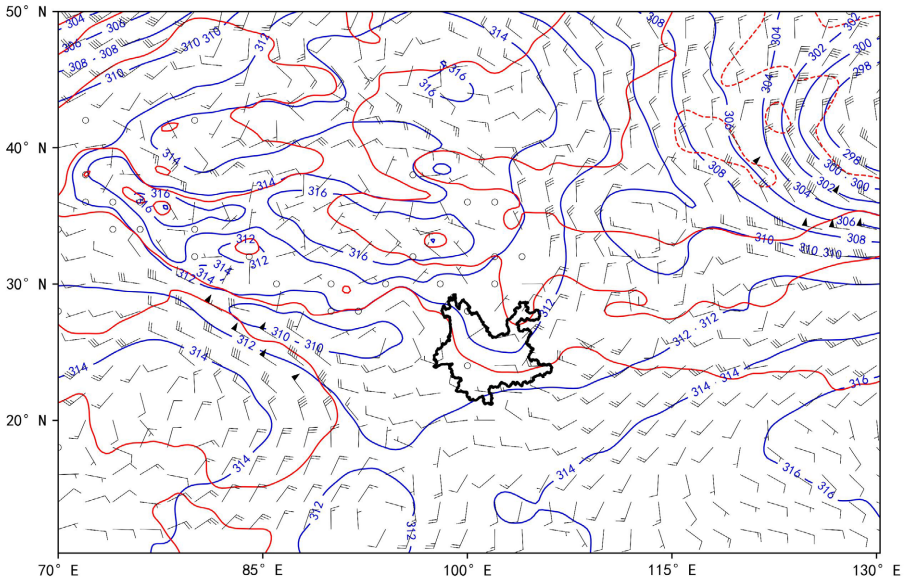
Table 2. Circulation patterns during the first soaking rain at Yongsheng Chenghai Lake (1959~2023)
表 2. 1959~2023 年永胜程海湖出现首场透雨时环流形势

高空槽 + 切变	高原槽 + 切变	高空槽 + 西南气流	高原槽 + 南支槽
1960, 1964, 1967, 1969, 1971, 1973, 1975, 1977, 1978, 1986, 1988, 1989, 1991, 1992, 1994, 1995, 1999, 2001, 2004, 2005, 2008, 2010, 2013, 2015, 2017, 2020, 2022, 2023	1963, 1961, 1965, 1966, 1968, 1970, 1972, 1979, 1980, 1981, 1990, 1993, 1996, 1997, 2006, 2009, 2014, 2019, 2021	1959, 1982, 1987, 2000	1962, 1974, 1976, 1983, 1985, 1984, 1998, 2002, 2003, 2007, 2011, 2012, 2016, 2018,

宁蒗泸沽湖和永胜程海湖出现首场透雨时，高空槽配合切变线的形势是占比最高的，分别为 48%和 43%。分析得出高空槽配合切变线是丽江出现首场透雨最主要的环流形势。选取 2017 年的首场透雨为例，5 月 15 日 08 时，500 hPa (图 3(a))高空在亚洲高纬地区有一高空槽携较强冷空气南下，滇北受槽后偏北气流控制，丽江正好处于高空槽槽底，对流层高层的偏北气流明显，高层干冷空气下侵是不稳定能量释放产生强降水的主要触发因素之一[7]。此次首场透雨永胜站出现 38.5 mm 的日降水量，达到大雨量级。700 hPa (图 3(b))受冷空气回流影响，从滇东北到滇西北一线形成川滇间切变，使得具备较好的动力抬升机制。



(a)

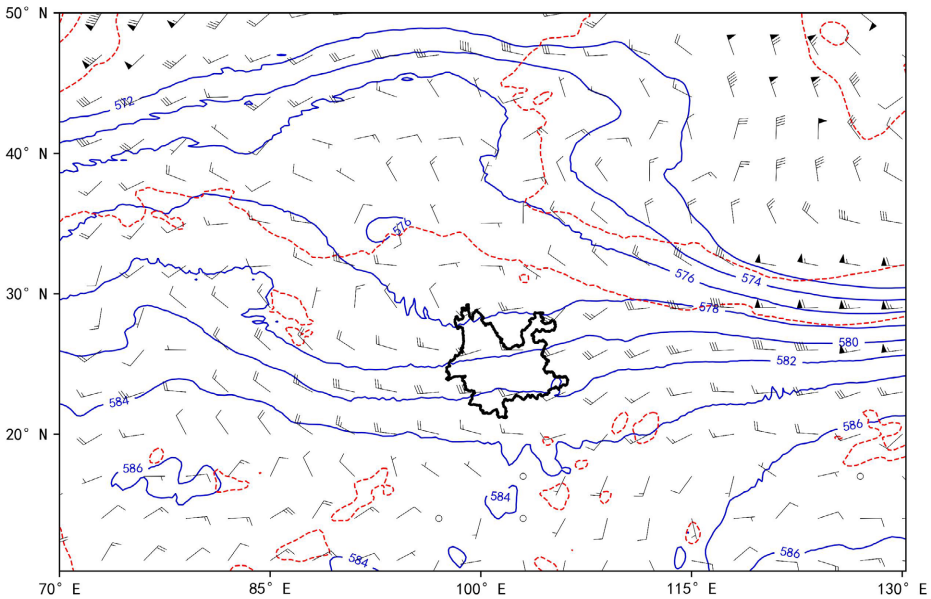


(b)

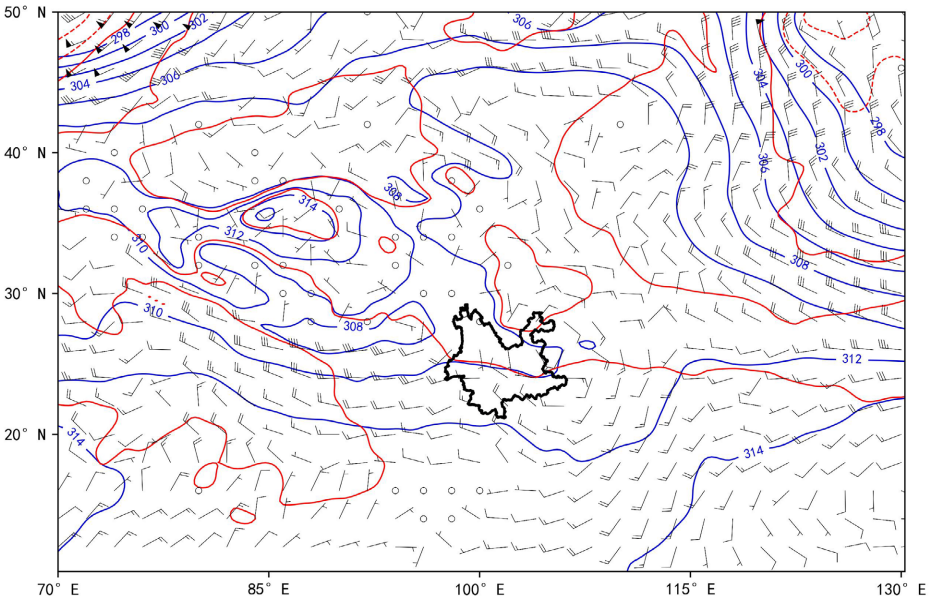
Figure 3. 500 hPa (a) and 700 hPa (b) geopotential height (units: dagpm, solid lines) and temperature (units: ˚C, dashed lines) at 08:00 on 15 May 2017

图 3. 2017 年 5 月 15 日 08 时 500 hPa (a) 和 700 hPa (b) 高度场(单位：dagpm，实线)和温度场(单位：˚C，虚线)

高原槽配合切变线的形势是宁蒗泸沽湖和永胜程海湖出现首场透雨另一主要形势，分别占 23%和 29%。选取 1968 年的首场透雨为例，5 月 30 日 08 时，500 hPa (图 4(a))在我国中东部地区高空槽携强冷空气大举南下，高空槽槽底抵达 25˚N 附近。同时，在青藏高原(25~32˚N, 90˚E)有高原波动携带弱冷空气南下，丽江受高原槽前西偏南气流影响，有一定的动力抬升条件。700 hPa (图 4(b))云南大部地区为偏西气流控制，孟加拉湾的水汽通道并未建立，但受中东部冷空气回流影响，在滇西北一线形成切变气流，因此从低层到高层均有较好的动力抬升条件。



(a)

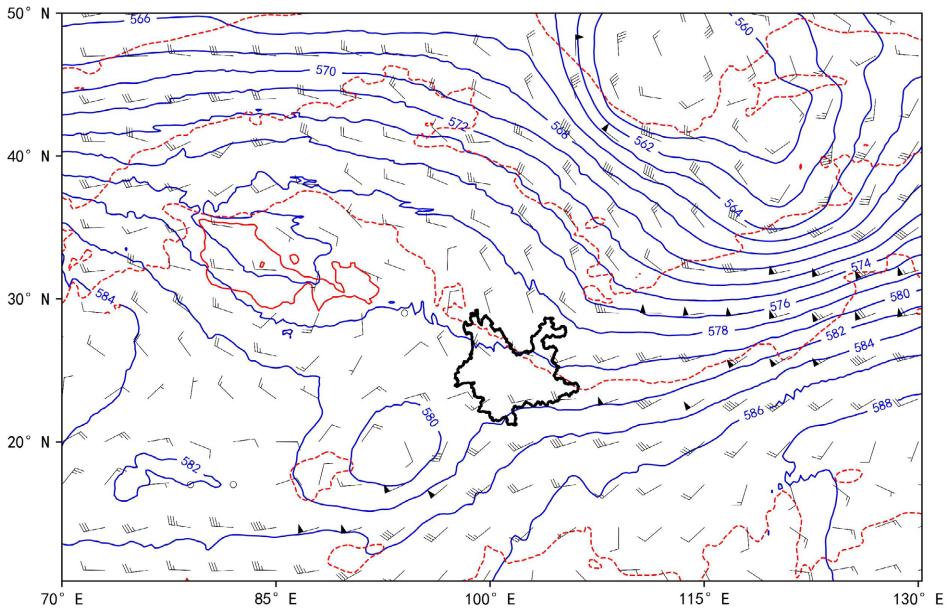


(b)

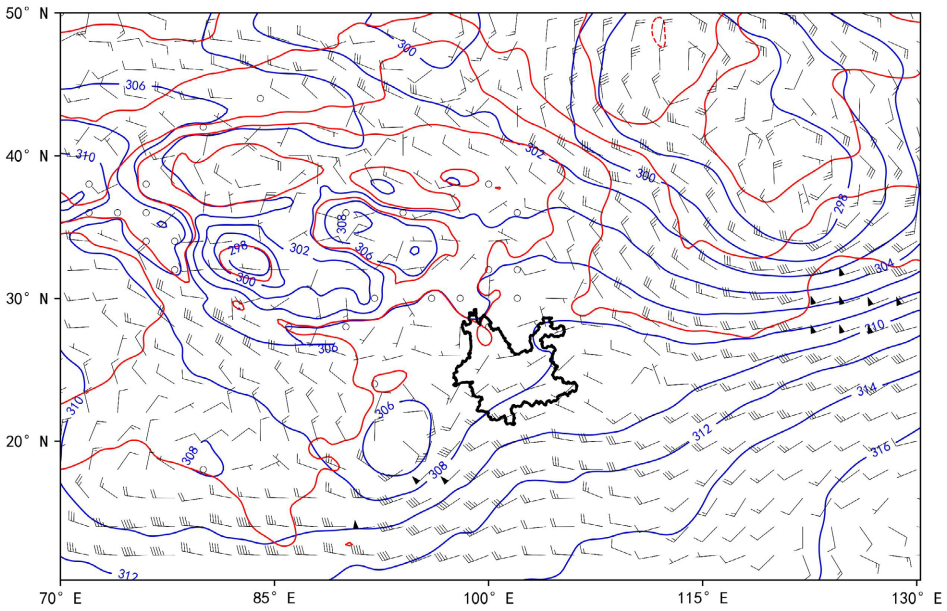
Figure 4. 500 hPa (a) and 700 hPa (b) geopotential height (units: dagpm, solid lines) and temperature (units: ˚C, dashed lines) at 08:00 on 30 May 1968

图 4. 1968 年 5 月 30 日 08 时 500 hPa (a)和 700 hPa (b)高度场(单位：dagpm，实线)和温度场(单位：˚C，虚线)

宁蒗泸沽湖和永胜程海湖出现首场透雨时，高空槽配合低层西南气流的形势仅占到5%和6%，以1959年的首场透雨为例，6月5日20时500 hPa (图5(a))在广大亚洲中高纬地区受东亚大槽控制，滇西北受槽底西北气流携带的干冷空气影响，同时，在90˚E，20˚N附近有孟加拉湾低涡，由于高空槽较为强劲，槽底位置偏南明显，因此孟加拉湾低涡位置也较为偏南，丽江并未受其影响。700 hPa (图5(b))上由于冷空气主体位置偏东，整个云南受孟加拉湾低涡前的西南气流影响，强劲的西南气流将水汽源源不断的输送到云南，低层暖湿高层干冷形成不稳定形势，使得永胜程海湖两日的累计降雨量超过50毫米。



(a)

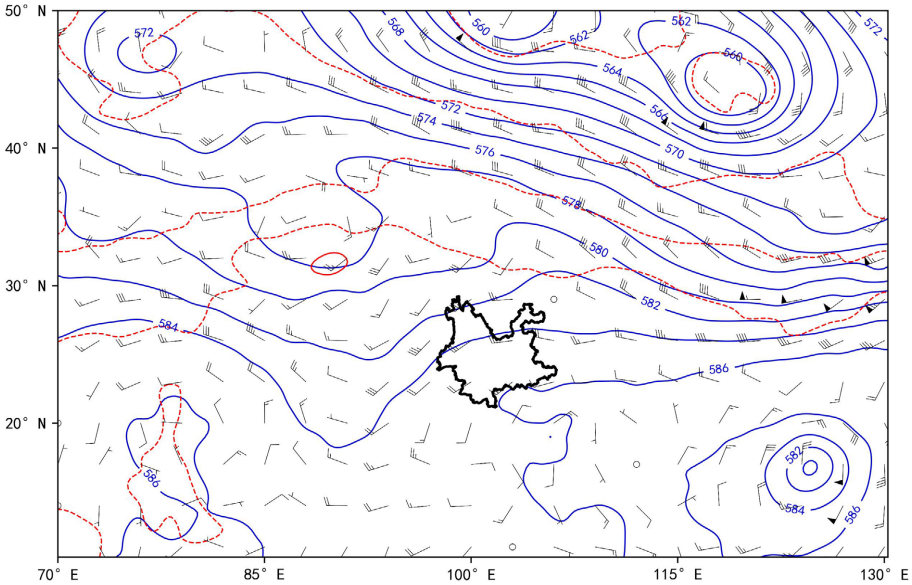


(b)

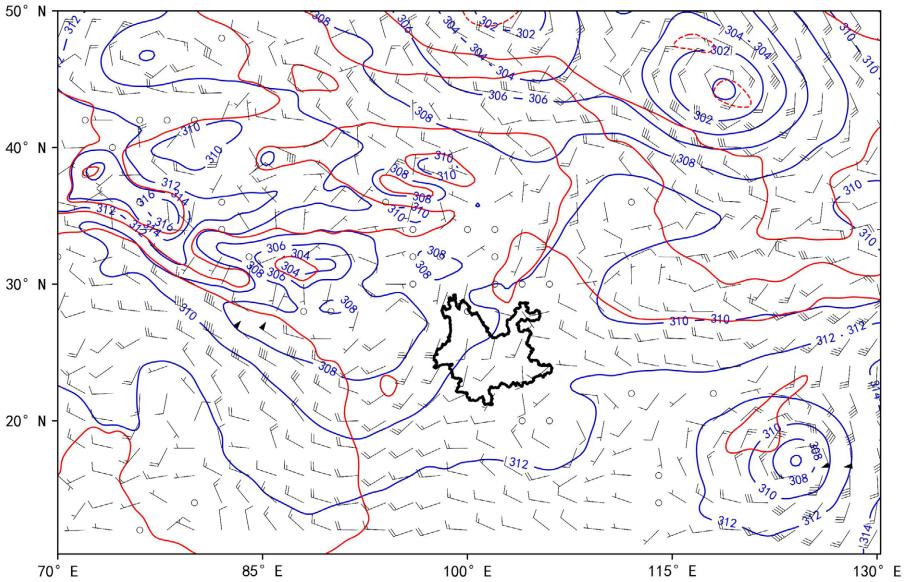
Figure 5. 500 hPa (a) and 700 hPa (b) geopotential height (units: dagpm, solid lines) and temperature (units: ˚C, dashed lines) at 20:00 on 5 June 1959

图5. 1959年6月5日20时500 hPa (a)和700 hPa (b)高度场(单位：dagpm，实线)和温度场(单位：˚C，虚线)

宁蒗泸沽湖和永胜程海湖出现首场透雨时，高原槽和南支槽同位相叠加的形势是占比分别为 12%和 22%。以 2012 年永胜程海湖首场透雨为例，2012 年 6 月 2 日永胜程海湖出现首场透雨，宁蒗泸沽湖也出现透雨天气，但 2012 年宁蒗泸沽湖受高原槽影响出现首场透雨的时间较 6 月 2 日更早。通过分析 500 hPa 的高度场和风场(图 6(a))，6 月 2 日 08 时，在 87˚E、30~35˚N 附近存在较强的高原槽，同时，在 87˚E，20˚N 附近存在较深的南支槽，高原槽前的西南气流和南支槽前的西南气流共同影响丽江区域，丽江正好处于槽前西南气流控制，为此次透雨提供有利的动力条件。在低层 700 hPa (图 6(b))，南支槽前西南气流将孟加拉湾的水汽源源不断的输送到宁蒗和永胜，为此次透雨提供了充足的水汽条件。



(a)

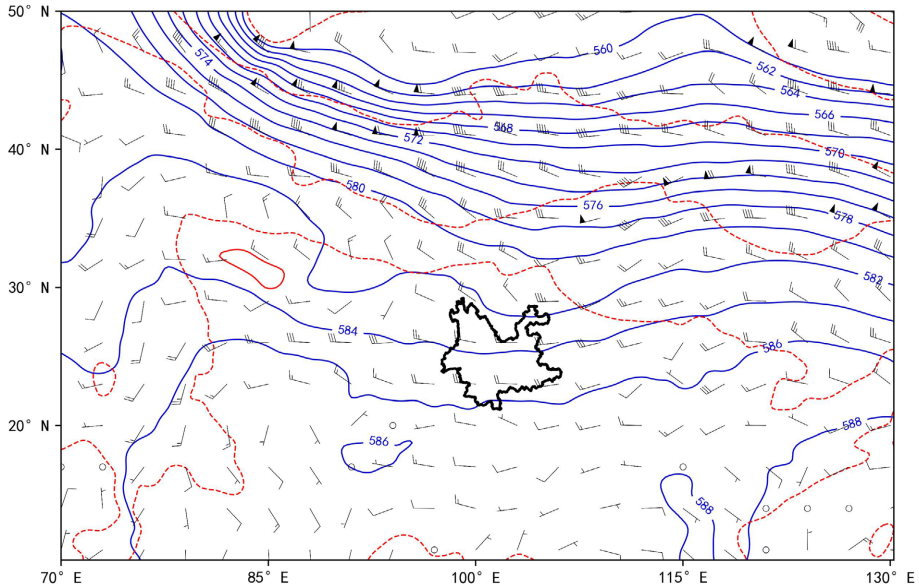


(b)

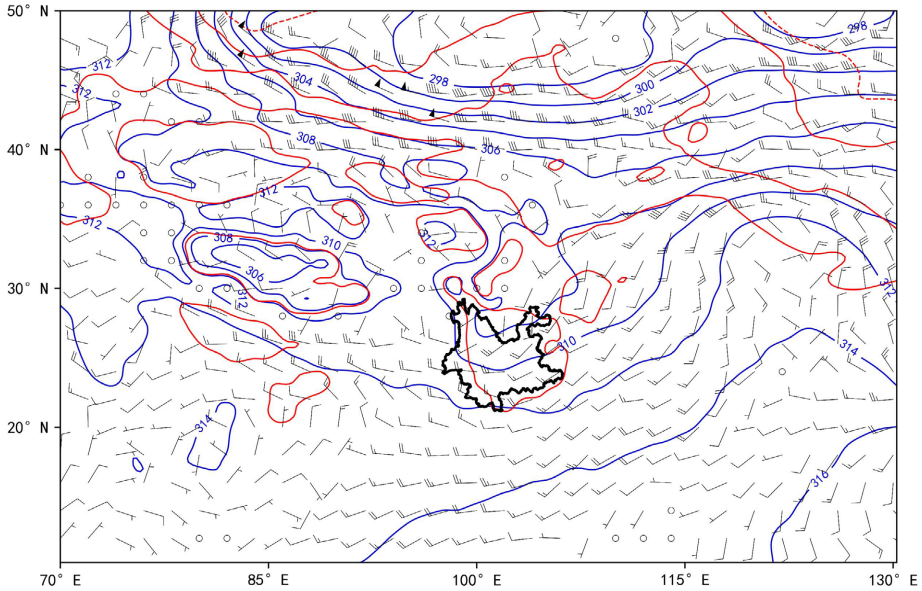
Figure 6. 500 hPa (a) and 700 hPa (b) geopotential height (units: dagpm, solid lines) and temperature (units: ˚C, dashed lines) at 08:00 on 2 June 2012

图 6. 2012 年 6 月 2 日 08 时 500 hPa (a)和 700 hPa (b)高度场(单位：dagpm，实线)和温度场(单位：˚C，虚线)

在高空有高空槽或高原槽影响且低空无天气系统配合时，在这 65 年中宁蒗泸沽湖出现了 7 次透雨天气，占比为 11%，这种天气形势发生时永胜程海湖并未出现透雨天气，且根据分析发现，出现这 7 种环流形势时，宁蒗泸沽湖出现透雨的日期均提前于永胜程海湖。



(a)



(b)

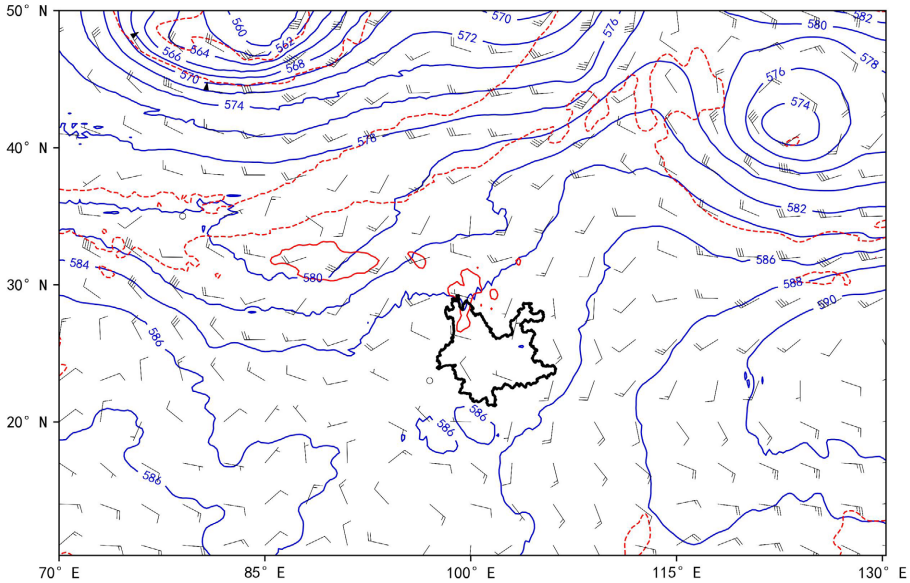
Figure 7. 500 hPa (a) and 700 hPa (b) geopotential height (units: dagpm, solid lines) and temperature (units: ˚C, dashed lines) at 20:00 on 27 May 1977

图 7. 1977 年 5 月 27 日 20 时 500 hPa (a)和 700 hPa (b)高度场(单位：dagpm，实线)和温度场(单位：˚C，虚线)

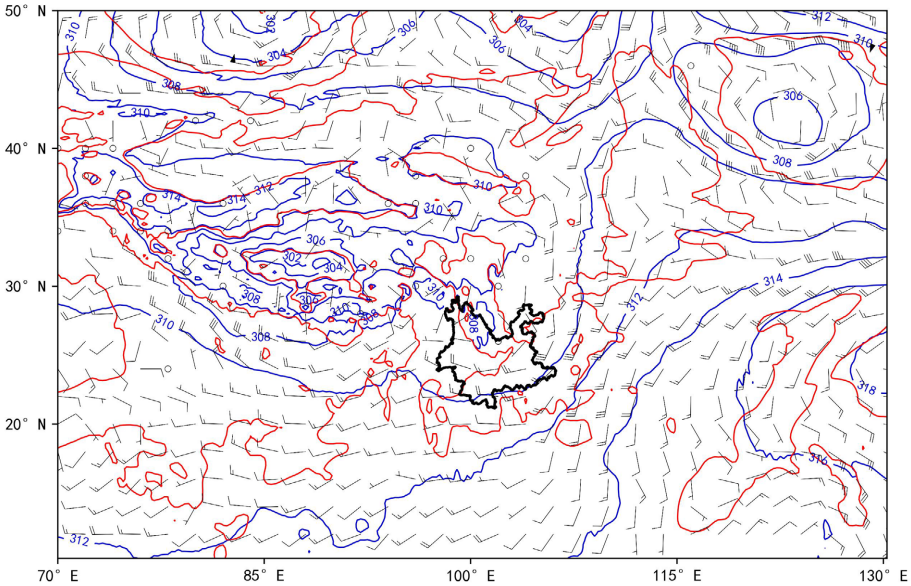
以 1977 年首场透雨为例，500 hPa (图 7)上东亚中高纬地区为宽广的高空槽控制，但高空槽强度弱，高空槽南压不明显，丽江北部受高空槽槽底气流影响，南部则为平直西风气流控制，丽江北部即宁蒗泸沽湖受高空槽槽底气流影响，带来干冷空气，具有一定的动力抬升条件，而 700 hPa 上则无明显的天气系

统存在，为偏西气流控制，空气干暖，形成上冷下暖的形势。从降雨实况分析，宁蒗泸沽湖出现首场透雨，永胜程海湖没有出现明显降雨天气。

以 2010 年首场透雨为例，6 月 29 日 08 时 500 hPa (图 8(a))在青藏高原(27˚N, 87˚E)附近有一明显的高原槽波动，位置较为偏西，主要影响滇西北的怒江、香格里拉一线，丽江市北部宁蒗泸沽湖流域受槽前西南气流影响，有一定的动力抬升条件，和高空槽形势较为相似，700 hPa (图 8(b))上无明显的天气系统，为偏西气流控制，但有一定的风速辐合。从降雨实况分析，宁蒗泸沽湖出现首场透雨，永胜程海湖没有出现明显降雨天气。



(a)



(b)

Figure 8. 500 hPa (a) and 700 hPa (b) geopotential height (units: dagpm, solid lines) and temperature (units: ˚C, dashed lines) at 08:00 on 29 June 2010

图 8. 2010 年 6 月 29 日 08 时 500 hPa (a)和 700 hPa (b)高度场(单位：dagpm，实线)和温度场(单位：˚C，虚线)

4. 小结

1) 泸沽湖和程海湖首场透雨出现的日期呈现先偏早后偏晚的趋势，从 60 年代到 90 年代中期首场透雨出现日期是一个提早的趋势，之后一直到 2023 年透雨出现日期是一个偏晚的形势。

2) 2010 至 2020 年间泸沽湖和程海湖均多次出现首场透雨异常偏晚的情况。

3) 泸沽湖和程海湖首场透雨出现在 5 月份的频率最高，其次是 6 月份，仅有 1 到 2 场透雨出现在 7 月份。

4) 高空槽配合 700 hPa 切变线、高原槽配合 700 hPa 切变线、高空槽配合低层西南气流、高原槽叠加南支槽这 4 种环流形势是泸沽湖和程海湖首场透雨出现时常出现的天气形势，但高空有高空槽或高原槽影响且低空无天气系统配合时，泸沽湖会出现透雨天气，这是不同于程海湖出现首场透雨的大气环流形势。

基金项目

云南省高原湖泊生态气象服务 2022cx08、云南省气象局科研项目 yz202438 资金支持。

参考文献

[1] 张千千, 王效科, 等. 重庆市路面降雨径流特征及污染源解析[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 76-82.

[2] 李春林, 刘淼, 胡远满, 等. 沈阳市降雨径流初期冲刷效应[J]. 生态学, 2013, 33(18): 5952-5961.

[3] Luo, H., Luo, L., Huang, G., Liu, P., Li, J., Hu, S., *et al*. (2009) Total Pollution Effect of Urban Surface Runoff. *Journal of Environmental Sciences*, **21**, 1186-1193. https://doi.org/10.1016/s1001-0742(08)62402-x

[4] 车伍, 张伟, 李俊奇. 城市初期雨水和初期冲刷问题剖析[J]. 中国给水排水, 2011, 27(14): 9-14.

[5] 王书敏. 山地城市面源污染时空分布特征研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2012.

[6] Van de Weerd, H.A., Docking, C.M., Day, J.E.L., Avery, P.J. and Edwards, S.A. (2003) A Systematic Approach Towards Developing Environmental Enrichment for Pigs. *Applied Animal Behaviour Science*, **84**, 101-118. https://doi.org/10.1016/s0168-1591(03)00150-3

[7] 于玉斌, 毛冬艳, 姚秀萍. “强降水和黄海气旋”中的干侵入分析[J]. 高原气象, 2006, 25(1): 16-28.