

秦剑, 赵刚, 陈艳, 等. 2013. 金沙江下游局地大气边界层风场变化特征. 气象, 39(6): 749-758.

金沙江下游局地大气边界层风场变化特征^{* 1}

秦 剑¹ 赵 刚¹ 陈 艳² 綦正信¹ 朱保林¹ 刘 瑜³

1 云南省气象局, 昆明 650034

2 四川省凉山彝族自治州气象局, 西昌 615000

3 云南省气候中心, 昆明 650034

提 要: 利用 2008 年在金沙江下游溪洛渡水电站坝区及向家坝水电站库区获得 GPS 低空探空资料以及同步地面观测资料, 统计分析了坝区从地面开始到大气边界层 2000 m 高度四季不同高度的风场变化特征。结果表明: (1) 春季溪洛渡坝区大气边界层以偏西风为主导风向, 1500 m 高度层以下静风和小风出现频率大, 是四个季节中地面静风、小风出现频率的最大值; (2) 夏季地面静风、小风出现频率为四个季节中最小, 夏季大气边界层中低层主要盛行西风和西北偏西风; (3) 秋季溪洛渡坝区大气边界层中低层主要盛行偏西风, 到高层则逐渐转变为偏北风; (4) 冬季溪洛渡坝区大气边界层低空盛行以西风和西北偏西风为主导的偏西风; 中高层主要风向是西风、西南偏西风、东风和东北偏东风; (5) 溪洛渡坝区秋、冬季大气边界层西风、东北偏北风、东北偏东风风速最大值均出现在 2000 m 高度层。

关键词: 溪洛渡坝区, 向家坝库区, 大气边界层, 水电站, GPS 探空, 风场变化特征

中图分类号: P463

文献标识码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.06.011

Variation Features of Wind Fields in Atmospheric Boundary Layer over the Lower Reaches of Jinsha River

QIN Jian¹ ZHAO Gang¹ CHEN Yan² QI Zhengxin¹ ZHU Baolin¹ LIU Yu³

1 Yunnan Meteorological Service, Kunming 650034

2 Meteorological Office of Liangshan Yi Autonomous Prefecture, Sichuan Province, Xichang 615000

3 Yunnan Climate Centre, Kunming 650034

Abstract: Using the GPS low-level sounding data obtained in the dam area of Xiluodu Hydropower Station and the reservoir area of Xiangjiaba Hydropower Station in the lower reaches of Jinsha River as well as the synchronous surface observation data, this paper analyzes the variation characteristics of the wind fields in different heights from surface to the 2000 m height of atmospheric boundary layer in spring, summer, autumn and winter. The results indicate that: (1) in spring westerly winds blow in the atmospheric boundary layer over Xiluodu Dam Area mainly while under the height of 1500 m calm and light winds appear more frequently, reaching the maximum values of surface calm and light winds in the four seasons; (2) in summer the occurrence of surface calm and light winds is the least in the four seasons, and west winds and northwest-west winds prevail in the middle and lower levels of atmospheric boundary layer; (3) in autumn westerly winds are the major theme in the middle and lower levels over Xiluodu Dam Area but turn to northerly winds gradually in the upper level; (4) in winter westerlies dominated by west and northwest-west winds prevail in the low level whilst in the middle and high levels the directions of winds become

* 中国长江三峡集团公司 2008 年《溪洛渡水电站坝区及向家坝水电站库区局地气候环境本底监测与分析》[JS(07)064]项目资助
2012 年 2 月 14 日收稿; 2012 年 8 月 7 日收修定稿

第一作者: 秦剑, 主要从事应用气象及气象服务方面的研究. Email: cqkly@sina.com

通信作者: 刘瑜, 主要从事气候与气候变化研究. Email: cqkly@163.com

west, southwest-west, east and northeast-east; (5) in autumn and winter the maximum wind speeds of west, northeast-north, northeast-east in the atmosphere boundary layer over Xiluodu Dam Area all appear in the high level of 2000 m.

Key words: Xiluodu Dam, Xiangjiaba Reservoir Area, atmospheric boundary layer, hydropower station, GPS sounding, variation features of wind field

引 言

金沙江是我国规划的十三大水电基地中最大的水电基地,在西南及全国均具有重要战略地位,是规划的“西电东送”的重要水电基地(刘锋,2007)。

溪洛渡水电站是我国西电东送中线的骨干电源之一,坝址位于云南省永善县与四川省雷波县接壤的金沙江下段溪洛渡峡谷河段,是金沙江下游梯级开发的第三级水电站,上接白鹤滩电站,下与向家坝水库相连。向家坝水电站是金沙江下游梯级开发中最末的一个梯级,坝址位于川滇两省宜宾县与水富县交界的金沙江下游河段。向家坝水电站的开发任务以发电为主,兼顾防洪、改善通航条件、灌溉,同时具有拦沙和为溪洛渡水电站进行反调节等作用。向家坝水电站装机容量 640 万 kW,溪洛渡水电站装机容量 1260 万 kW,两座电站总装机容量大于三峡水电站 1800 万 kW。

王有民等(2000)在长江三峡工程生态与环境监测系统局地气候监测子系统的设计研究中,通过建立局地气候监测子系统跟踪监测三峡水电站库区气象要素的变化,获得了三峡库区气候监测资料并对库区气候特征开展了分析研究。张强等(2004)在长江三峡局地气候监测系统及设计研究中,在三峡库区沿江气候监测的基础上,还分别在库东、库西使用系留探空仪或雷达探空系统进行了高空气象观测,积累了详实、可靠的库区本底资料。王祖承等(2003)利用三峡坝区 4 个气象站和宜昌站的地面观测资料,统计了各站多年、逐年、分季平均风速和风向频率,揭示了地面风场若干气候特征,提出了坝区典型风场模型;并通过分析各站多年、分季联合频率,对坝区大气扩散的气候特点与能力做了初步评价。上述研究成果有助于及时了解三峡库区气候状况(曾红玲等,2010;张天宇等,2010;程炳炎等,2011)、气候资源和气候灾害的时空变化(翟盘茂,

2011;任国玉,2003;郁珍艳等,2010),为合理利用开发库区气候资源,保障工程顺利进行提供科学依据,也为我国其他巨型水电站建设气候本底监测及大气边界层研究提供了基本思路和基本方法,但是对于巨型水电站建坝前开展野外气候环境本底监测及低空探测研究工作还有待进一步深入。

为摸清金沙江下游溪洛渡水电站坝区及向家坝水电站库区蓄水前局地基本气候特征,掌握该地区大气边界层风向、风速和温度等的时空变化规律,根据国家环境保护部颁布的大气环境调查评估的有关规定——《环境影响评价技术导则——大气环境》(HJ/T2.2—2003)以及中国气象局颁布的《高空气象探测规范》和《地面气象观测规范》技术标准。2008 年云南省气象局开展了溪洛渡水电站坝区及向家坝水电站库区局地气候环境本底监测工作(孟昭林等,2011;梁海河等,2011)。低空探测试验为溪洛渡水电站坝区及向家坝水电站库区局地气候本底监测的一部分。

水电开发不可避免地会对流域周围大气本底环境造成一定的影响。金沙江下游溪洛渡和向家坝两座巨型水电站建成后,溪洛渡水电站坝区到向家坝水电站库区之间长约 160 km 的河道常年水体面积将大大增加,下垫面的改变将引起该河道区域动力、热力作用发生变化,产生局地气候水文特征的变化,最后导致生态环境、大气边界层和区域气候系统变化。另外,由于水电站工程的建设、运行对气象因子的变化十分敏感,尤其是异常、极端天气导致的气象、气候灾害对水电站工程的安全具有较大的威胁,局地大风、局地强对流天气会对水电站工程安全问题产生影响,造成人员伤亡、工程设施损毁等。

分析溪洛渡水电站坝区及向家坝水电站库区大气边界风场的时空变化特征,能为今后电站建成后金沙江流域下段水电开发环境的可持续发展、电站建成前后局地气候环境演变影响评价和大气边界层变化分析研究提供科学依据,同时,大气边界层风场

的分析结果也可为电站建设施工过程中局地大风、局地强对流天气的预报预测提供强有力的理论依据。

低空探测试验所获得的溪洛渡坝区及向家坝库区大气边界层本底监测资料和分析研究成果,为我国巨型水电站建设和金沙江水资源的开发利用,提供了一整套大气边界层本底监测的思路、技术和方法,这将为国内其他即将开发的巨型电站在局地大气边界层和区域气候系统研究方面提供大量珍贵的经验、方法和资料,为我国水电环境资源的可持续发展起到重要的指示作用。

1 低空探测试验基本情况

溪洛渡水电站坝区及向家坝水电站库区所在的区域位于高山峡谷中,其气候生态环境是原生态的,基本处于未开发状态。溪洛渡水电站于2007年11月启动截留工程,2008年的低空探测试验是为了摸清溪洛渡水电站坝区及向家坝水电站库区蓄水前大气边界层风向和风速的时空变化规律,为以后电站建成后的气候对比分析提供科学依据。

在溪洛渡水电站建坝前建立溪洛渡水电站坝区局地剖面气候本底监测网,应用先进的大气探测技术开展低空探测,低空探测试验中引入GPS探空技术(姚文等,2009;雷国文等,2005),使得低空探空资料更加准确、可靠。

1.1 低空探测试验场地选择

溪洛渡水电站坝区及向家坝水电站库区(以下简称溪洛渡水电站坝区)是一个整体区域,是指溪洛渡水电站坝体开始到向家坝水电站坝体之间金沙江下游流域的区域,溪洛渡水电站与下游向家坝水电站距离160 km(河道里程)左右。在2008年建站之前,我们在该区域范围内开展了全面实地勘察,根据中国气象局颁布的地面和高空气象探测规范以及坝区地形地貌的特点,最终确定马鞍山三坪村民委员会(28°15'N、103°38'E)为溪洛渡水电站坝区低空气象探测试验观测站,其海拔高度972 m。

1.2 低空探测试验技术路线

本次试验采用GPS探空仪来完成溪洛渡水电站坝区低空气象要素探测工作。GPS探空仪系统的气压、温度、湿度、风向、风速的探测精度和位势高

度误差等指标,经过世界气象组织的国际高质量探空仪对比,表明其达到了世界一流水平。GPS探空仪系统先后为南极科学考察、南方暴雨试验以及2008年北京奥运会火炬的珠穆朗玛峰登顶提供了优质的气象服务。

1.3 资料来源

探空试验共计80 d,2008年春、夏、秋、冬季各20 d。具体时间为春季3月7—26日,夏季7月1—20日,秋季10月1—20日,冬季12月1—20日。

试验采用探空小球携带GPS探空仪的方法,探空气球的升速控制在 $150 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 以内,每日获取02、05、07、10、14、16、19和23时共8个时次样本。每次获取空间间隔小于25 m的风向、风速和温度等要素的探测资料。在GPS探空试验时段内,每天进行地面风向、风速、温度等要素的同步观测。

1.4 观测试验风向数据处理

对试验获得的640份有效GPS探空资料计算从地面到2000 m高空每隔25 m的风向资料供分析使用。对溪洛渡水电站坝区春、夏、秋、冬四季地面及大气边界层风场变化特征采用每100 m/层,共计20层的探空试验数据和地面同步观测数据进行统计分析。(说明:对观测探测资料中风速 $\leq 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的记为静风C,风速 $< 1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的记为小风,风向风速不纳入统计。)

该项目在历时一年的时间内,观测、收集整理了磨刀溪、出机田等共10个站的逐时地面观测资料;获得了2008年1月使用双经纬仪方法的探空资料100多份;2008年3、7、10和12月使用GPS方法的探空资料近700份(其中有效加密资料17份);2008年1、4、7和10月的平衡球资料242份。为溪洛渡水电站坝区积累了珍贵的气候环境本底资料。

2 坝区地面风向特征

表1是试验期间溪洛渡水电站坝区及向家坝水电站库区春、夏、秋、冬四季地面主要风向频率统计情况,各个季节地面主要风向特征具体分析如下。

2.1 春季地面风场特征

溪洛渡水电站坝区春季地面以东风和东北风为盛行风向,出现频率分别为14.8%和12.9%,没有

出现西南、西风和偏西风。小风和静风出现频率为 40.6%，是四个季节中地面静风和小风出现频率的

最大值。

表 1 溪洛渡水电站坝区试验期间春夏秋冬地面主要风向频率(单位:%)
Table 1 Main ground wind direction frequencies in the four seasons during the testing period in the dam area of Xiluodu Hydropower Station (unit: %)

风向	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	WNW	静风和小风
春季	12.9	9.0	14.8	4.5	6.5	1.3		40.6
夏季	9.4	6.9	10.0	18.8	10.6	6.9	11.3	5.6
秋季	2.5	18.8	30.0	21.3	6.9	3.1		12.5
冬季	3.8	2.5	12.7	11.4	19.6	14.6	3.2	20.3

2.2 夏季地面风向特征

溪洛渡水电站坝区夏季地面主要盛行风向为偏东(ESE、E、SE)风,出现频率在 6.9%~18.8%之间,最大为东南偏东风,出现频率为 18.8%,为地面主导风向;其次为东南风,出现频率为 10.6%。西北偏西风出现频率为 11.3%,为地面次主导风向。与春、秋、冬三个季节相比较,夏季出现静风和小风频率很小,仅为 5.6%。

2.3 秋季地面风向特征

溪洛渡水电站坝区秋季地面盛行偏东风,出现最多的风向是东风,其频率为 30%,其次为出现频率 21.3%的东南偏东风,加之出现频率第三的东北偏东风,偏东风的出现频率高达 70.1%。整个秋季试验期间,地面没有出现西南偏南风、西南风、西南偏西风、西风、西北偏西风和西北风。地面静风和小风出现频率为 12.5%。

2.4 冬季地面风向特征

溪洛渡水电站坝区冬季坝区没有出现北风和西南风,主要盛行偏东(E、ESE、SE、SSE)风,最多风向为东南风,出现频率为 19.6%,次风向为东南偏南风,出现频率为 14.6%。静风和小风出现频率为 20.3%。

综上所述,溪洛渡水电站坝区全年地面均盛行偏东风,春季地面静风和小风频率为全年最大,夏季地面静风和小风频率为四季最小。

3 坝区地面风速特征

通过对溪洛渡水电站坝区地面四季 16 位风向平均风速统计结果分析(表略),可以得知该地区春、

夏季地面均是东南风风速最大,秋季地面西北偏北风风速最大,冬季地面西风风速最大,四季分析如下。

3.1 春季地面风场特征

溪洛渡水电站坝区春季地面偏东风(E、ESE、SE)风速较大,其中东南风风速最大,其值为 $2.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,东风风速次之,为 $2.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3.2 夏季地面风向特征

溪洛渡水电站坝区夏季地面偏南风(SE、SSE)风速较大,其中东南风风速最大,其值为 $3.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,东南偏南风次之,其值为 $2.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3.3 秋季地面风向特征

溪洛渡水电站坝区秋季地面西北偏北风风速最大,其值为 $4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,次大风速为东南偏南风,其值为 $3.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3.4 冬季地面风向特征

溪洛渡水电站坝区冬季地面西风风速最大,其值为 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,次大风速为东南风,其值为 $2.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

4 大气边界层四季不同高度风向特征

表 2 为试验期间溪洛渡水电站坝区春、夏、秋、冬四季大气边界层主要风向频率统计情况,各个季节大气边界层主要风向特征具体分析如下。

4.1 春季大气边界层风向特征

溪洛渡水电站坝区春季大气边界层 1700 m 以下盛行偏西风,高层以偏北风为主导风向,100~

700 m 高度层出现西北偏西风和西风的频率均在 20% 以上,最小频率 20.1% 出现在 700 m 高度,最大频率 43.1% 出现在 200 m 高度,风向皆为西北偏西风。100~1100 m 高度层西风频率大多在 20% 以上,最大西风频率出现在 700 m 高度,频率为 27.1%。从 900 m 高度层开始西北偏西风开始逐渐减小,西南偏西风开始逐渐盛行,出现频率为 13.2%,这种状况一直延续到 1700 m 高度层,在 1300 m 高度层出现频率为 22.2%,为春季坝区大气边界层西南偏西风出现最大频率。1800~2000 m 高度层主要盛行偏北(N、NNE、NE)风。图 1 为 1700 和 2000 m 高度层风向玫瑰图,从图 1 中可知,

1700 高度层西南偏西风频率为 16.0%,2000 m 高度层东北偏北风频率为 15.3%,其出现频率均为同高度层最大值。

大气边界层中除 300、400、1300 和 1700 m 高度没有出现过静风频率外,1500 m 高度层以下静风和小风出现频率大,统计数据说明春季该地区出现风速小于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的情况较多,静风和小风主要出现在 800~1000 m 高度层,最大小风频率和静风出现频率均出现在 800 m 高度层,其值分别为 22.9% 和 2.8%。

4.2 夏季大气边界层风向特征

溪洛渡水电站坝区夏季大气边界层中低层主要

表 2 溪洛渡水电站坝区试验期间四季大气边界层主要风向频率(单位:%)

Table 2 Main atmospheric boundary layer wind direction frequencies in the four seasons during the testing period in the dam area of Xiluodu Hydropower Station (unit: %)

风向	NNE	NE	E	WSW	W	WNW	C	小风
春季								
200 m		0.7	1.4	1.4	24.3	43.1	2.2	8.9
700 m	0.7		6.9	6.9	27.1	20.1	1.4	16.7
800 m	0.7		6.3	9.0	24.3	16.7	2.8	22.9
1300 m		1.4	4.9	22.2	12.5	2.8		11.8
夏季								
200 m	0.6		6.5	1.3	13.5	26.5	3.3	27.0
600 m	1.3		12.3	1.9	23.2	11.0	4.5	27.8
800 m			14.8	6.5	23.9	5.8	3.3	19.9
2000 m	5.2	3.9	1.9	4.5	5.8	1.9	2.6	9.0
秋季								
200 m				1.3	26.1	48.4	1.3	8.3
800 m	1.3		2.5	8.3	28.7	14.0	3.8	25.5
1000 m	0.6	0.6	1.3	14.0	22.9	12.1	7.6	24.2
1200 m		1.3	3.2	21.7	22.3	5.1	0.6	22.3
冬季								
200 m	0.6		1.9	3.2	21.4	42.9	2.7	12.2
600 m		1.3	3.9	1.9	29.9	23.4	0.7	16.8
1000 m	0.6		15.6	8.4	26.0	9.7	2.1	16.1
1400 m	2.6	8.4	4.5	10.4	9.1	0.6	2.7	19.4

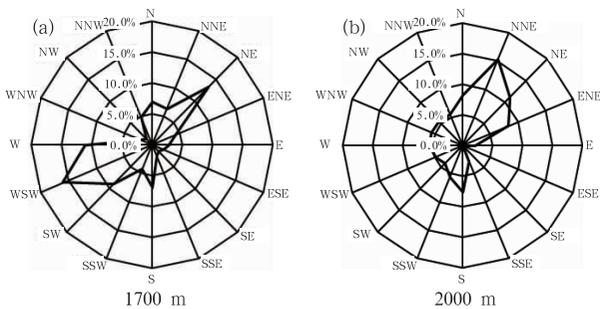


图 1 溪洛渡水电站坝区春季大气边界层 1700(a)和 2000 m(b)高度风向玫瑰图

Fig. 1 Wind rose chart for 1700 m (a) and 2000 m (b) height of atmospheric boundary layer in the dam area of Xiluodu Hydropower Station in spring

盛行西风和西北偏西风,中高层主要盛行西风和西南偏西风,中层出现东风频率较大。100~600 m 低层主要风向为西风和西北偏西风,其中 200 m 高度层出现西北偏西风的频率为 26.5%,是夏季大气边界层中该风向出现频率的最大值。从 700 m 高度层开始西北偏西风频率逐渐减小,而西风频率大值则继续保持,一直到 1700 m 高度层,800 m 高度层西风频率为 25.8%,是该季节大气边界层西风出现最大频率值。1000 m 高度层西风频率为 25.2% (图 2a),其出现频率为同高度层各风向频率最大值,也是该季节大气边界层西风出现次大频率值。600~900 m 高度层没有出现或者极少出现北风、东北偏北风和东北风。700 和 800 m 高度层出现东风频率均为 14.8%,是 600~1000 m 高度层东风出现

的最大频率值。1000~1700 m 高度层西南偏西风频率在 11.0%~18.7%之间,为高层主要盛行风向之一。1400 m 高度层西南偏西风频率为 18.7% (图 2b),其出现频率为同高度层各风向频率最大值。100~1300 m 出现 20%以上静风和小风频率,最大出现在 600 m 高度,其频率值为 32.3%。最大静风出现频率为 4.5%,分别出现在 600 和 1000 m 高度。最大小风出现频率为 28.4%,分别出现在 500 和 700 m 高度。2000 m 高度层静风和小风频率为 11.6%,是该季节大气边界层中最小的静风和小风频率。

4.3 秋季大气边界层风向特征

溪洛渡水电站坝区秋季大气边界层低层和中层主要盛行偏西风,到高层则逐渐转变为偏北风。1000 m 以下以西风和西北偏西风为主要风向,200 m 高度层西北偏西风频率为 48.4%,是各高度层不同风向出现频率的极大值。西风出现频率最大值在 100 m 高度层,为 35.7% (图 3a)。1100~1500 m 高度层盛行西风和西南偏西风,西南风最大频率出现在 1200 m 高度层,频率值为 21.7%。1800~2000 m 高度层偏北风(N、NNE、NE)为主要盛行风向,2000 m 高度层东北风频率为 16.6% (图 3b),是 1800~2000 m 高度层偏北风出现频率的最大值。

100~600 m 高度层没有出现或者极少出现东北偏北风、东北风、东北偏东风、东风、东南偏东风和东南风风向,600~800 m 高度层没有出现北风风向,1200~1500 m 高度层没有出现东南偏东风风向。300~1900 m 高度层小风出现频率较大,其频

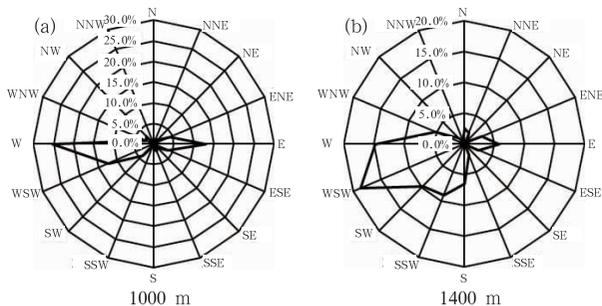


图 2 溪洛渡水电站坝区夏季大气边界层 1000(a)和 1400 m(b)高度风向玫瑰图
Fig. 2 Wind rose chart for 1000 m (a) and 1400 (b) height of atmospheric boundary layer in the dam area of Xiluodu Hydropower Station in summer

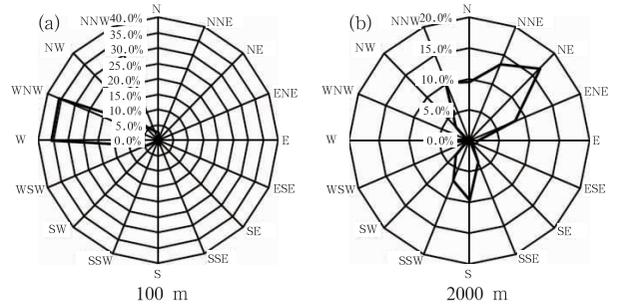


图 3 溪洛渡水电站坝区秋季大气边界层 100(a)和 2000 m(b)高度风向玫瑰图
Fig. 3 Wind rose chart for 100 m (a) and 2000 m (b) height of atmospheric boundary layer in dam area of Xiluodu Hydropower Station in autumn

率值都在 10%以上,800 m 高度层小风出现频率值达到最大,为 25.5%。静风出现频率在 1000 m 高度层最大,为 7.6%,2000 m 高度层没有出现静风。

4.4 冬季大气边界层风向特征

溪洛渡水电站坝区冬季大气边界层中低层盛行偏西(W、WNW)风,几乎没有偏北(N、NNE、NE)风的出现;中高层主要风向为西风、西南偏西风、东风和东北偏东风;高空则盛行偏北(NNE、NE)风。100~900 m 高度层主导风向是西风和西北偏西风,出现频率在 14.9%~42.9%,西北偏西风频率在 700 m 高度层以下均在 20%以上,200~400 m 高度层西北偏西风频率分别为 42.9%、41.6%和 40.9%,其中 200 m 高度层为西北偏西风频率最大值。西风频率在 1200 m 高度层以下均在 20%以上,600 m 高度层西风出现 29.9%的最大频率值。

100~1000 m 高度层没有出现或者极少出现北风、东北偏北风和东北风,1200~1500 m 高度层东北偏东风频率较大,频率值分别为 11.7%、11.0%、12.3%和 12.3%,1500 m 高度层东北偏东风 12.3% 的频率(图 4a)为该高度层各风向频率的次大值。900~1100 m 高度层东风频率较大,各层出现频率值分别为 10.4%、15.6%和 14.9%。1600~2000 m 高度层偏东风出现频率大,2000 m 高度层东北风频率为 15.6% (图 4b),是该高度层所有风向出现频率的最大值,与春、夏、秋三个季节试验相比较,冬季出现静风和小风频率较小,最大小风出现频率值为 19.4%,出现在 1400 m 高度层。

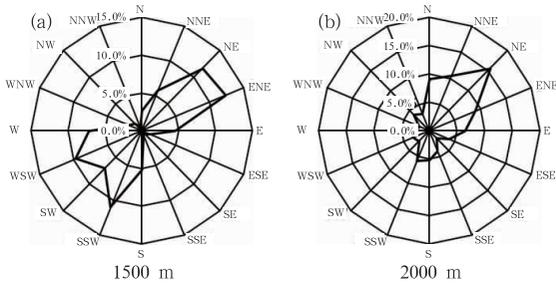


图 4 溪洛渡水电站坝区秋季大气边界层 1500(a)和 2000 m(b)高度风向玫瑰图
 Fig. 4 Wind rose chart for 1500 m (a) and 2000 m (b) height of atmospheric boundary layer in the dam area of Xiluodu Hydropower Station in autumn

综上所述:该地区冬季大气边界层出现最大静风和小风频率要比春、夏、秋季小。各高度层静风和小风出现频率相差不大,最大小风频率值为 19.4%,出现在 1400 m 高度层,最大静风和小风频率值为 22.1%,分别出现在 900 和 1400 m 高度层。

春季大气边界层低层盛行西北偏西风和西风,中高层盛行西风和西南偏西风,高层盛行偏北风(N、NNE、NE),静风和小风主要出现在 800~1000 m 高度层,最大小风频率和静风频率均出现在 800 m 高度层。

夏季大气边界层低层盛行西北偏西风,中高层盛行西风和西南偏西风,600~1000 m 高度层东风出现频率较大。100~1300 m 高度层静风和小风出现频率大,1900 和 2000 m 高度层静风和小风出现频率均为 11.6%,是夏季大气边界层中最小的静风和小风频率。

秋季大气边界层中低层盛行西风和西北偏西风,中高层主要风向为西风和西南偏西风,高层盛行偏北风(N、NE、NNE)。300~1900 m 高度层小风出现频率较大,2000 m 高度层没有出现静风。

冬季大气边界层中低层盛行偏西风(W、WNW),几乎没有偏北风(N、NNE、NE)出现,中高层主要风向为西风、西南偏西风、东风和东北偏东风,高层则盛行偏北风(NNE、NE)。冬季大气边界层最大静风和小风出现频率要比春、夏、秋季小,各高度层静风和小风出现频率相差不大。

总之,这一地区大气边界层全年低层和中高层主要盛行偏西风(WNW、W、WSW),高层主要盛行

偏北风(N、NNE、NE),大气边界层夏季和冬季中低层偏东风出现频率较大。

5 大气边界层四季不同高度风速特征

通过对溪洛渡水电站坝区大气边界层春、夏、秋、冬四季 16 位风向平均风速各层变化特征统计(表略)分析,可知该地区四季各风向风速变化特征如下。

5.1 春季大气边界层各风向平均风速变化特征

大气边界层整层(100~2000 m)东风和偏西风(WSW、W、WNW)均保持较大风速,东风风速最大值出现在 2000 m 高度层(图 5),其值为 $8.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,次大值为 $6.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,出现在 1000 m 高度层;西南偏西风风速最大值出现在 1800 m 高度层(图 5a),其值为 $4.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,西风风速最大值出现在 1200 m 高度层,其值为 $3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,西北偏西风风速最大值出现在 1700 m 高度层,其值为 $4.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

100~700 m 高度层偏北风(N、NW)风速出现较大值,400 m 高度层北风和西北风分别出现 4.8 和 $4.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的较大风速。1100 m 高度以上偏东风(ENE、EN)和偏南风(SW、SSW、S、SSE)风速大,特别是 1700~2000 m 高度层东北偏东风和东北风风速值均在 $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,东北偏东风风速最大值出现在 2000 m 高度层,其值为 $8.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,南风

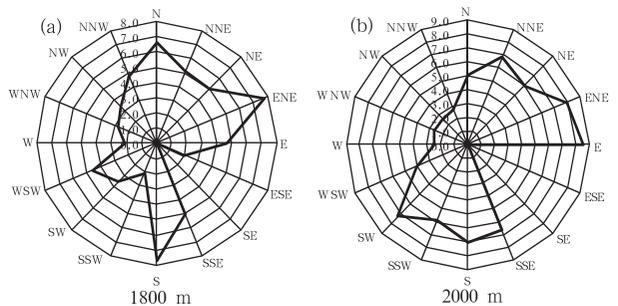


图 5 溪洛渡水电站坝区春季大气边界层 1800(a)和 2000 m(b)高度各风向平均风速玫瑰图(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 5 Average wind speed rose chart for 1800 m (a) and 2000 m (b) height of atmospheric boundary layer in the dam area of Xiluodu Hydropower Station in spring (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

风速最大值出现在 1800 m 高度层,其值为 $7.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,东南偏南风风速最大值出现在 1700 m 高度层,其值为 $7.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。1800~2000 m 高度层偏北风(N、NNE)风速均在 $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,北风风速最大值出现在 1800 m 高度层,其值为 $6.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,东北偏北风风速最大值出现在 2000 m 高度层,其值为 $6.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

5.2 夏季大气边界层各风向平均风速变化特征

大气边界层整层(100~2000 m)偏西风(WNW、W、WSW)和偏东风(ENE、E、ESE)均保持较大风速,西北偏西风风速最大值出现在 1700 m 高度层,其值为 $4.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,西风风速最大值出现在 1900 m 高度层(图 6b),其值为 $4.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,西南偏西风风速最大值出现在 2000 m 高度,其值为 $4.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,东北偏东风风速最大值出现在 1100 m 高度层,其值为 $4.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,东风风速最大值出现在 1800 m 高度层(图 6a),其值为 $6.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。1000 m 高度以上偏南风(SSE、S、SSW、SW)风速开始逐步增大,东南偏南风风速最大值出现在 2000 m 高度层,其值为 $5.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,南风风速最大值出现在 1800 m 高度层,其值为 $6.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,西南偏南风风速最大值出现在 1900 m 高度层,其值为 $4.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,西南风风速最大值出现在 1900 m 高度层,其值为 $6.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。1700 m 高度以上偏北风(NNW、N、NNE、NE)风速值均在 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,北风风

速最大值出现在 2000 m 高度层,其值为 $4.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,东北偏北风风速最大值出现在 1800 m 高度层,其值为 $5.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。夏季大气边界层中绝大部分风向的平均风速最大值均出现在 1700~2000 m 高度层,其中 1800 m 高度层东北风 $7.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速值是该季节各高度层 16 位风向平均风速的极值。

5.3 秋季大气边界层各风向平均风速变化特征

大气边界层整层(100~2000 m)偏西风(W、WNW、NW)风速较大,西风风速最大值出现在 2000 m 高度层,其值为 $3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;西北偏西风在 100~300 和 1400~1500 m 高度层风速均在 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,最大风速出现在 200 m 高度层(图 7a),其值为 $3.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,西北风风速最大值出现在 100 m 高度层,其值为 $4.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,从 900 m 高度层开始西南偏西风风速逐渐增大,在 1100~1300 m 高度层出现风速值为 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的等风速层。1300~2000 m 高度层出现偏南风(S、SSW)和偏北风(N、NNE、NE)风速大值区,南风、西南偏南风、北风、东北偏北风和东北风风速值均在 $3.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,西南偏南风和东北偏北风风速最大值均出现在 2000 m 高度层,其值分别为 5.5 和 $6.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,东北风风速最大值出现在 1700 m 高度层(图 7b),其值为 $7.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。大气边界层中南风风速最大值出现在 800 m 高度层,其值为 $6.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,北风风速最大值出现在 1200 m 高度层,其值为 $9.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,

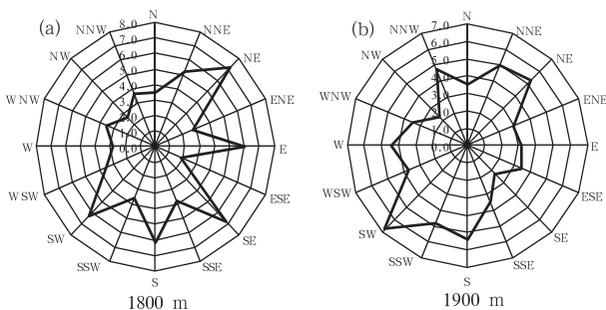


图 6 溪洛渡水电站坝区夏季大气边界层 1800(a)和 1900 m(b)高度各风向平均风速玫瑰图(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 Average wind speed rose chart for 1800 m (a) and 1900 m (b) height of atmospheric boundary layer in the dam area of Xiluodu Hydropower Station in summer (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

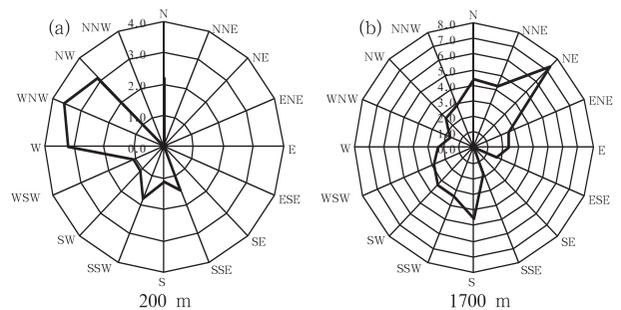


图 7 溪洛渡水电站坝区秋季大气边界层 200(a)和 1700 m(b)高度各风向平均风速玫瑰图(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 7 Average wind speed rose chart for 200 m (a) and 1700 m (b) height of atmospheric boundary layer in the dam area of Xiluodu Hydropower Station in fall (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

800~2000 m 高度层偏东风(E、ENE)风速较大,东北偏东风风速最大值出现在 2000 m 高度层,其值为 $9.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,东风风速最大值出现在 1800 m 高度层,其值为 $10.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,该值是秋季大气边界层中各风向平均风速的极大值。

5.4 冬季大气边界层各风向平均风速变化特征

大气边界层整层(100~2000 m)西风、西北偏西风、东风以及东南偏东风均保持较大风速。西风在 300~1400 m 高度层出现风速为 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右的等风速层,其风速最大值出现在 1500 m 高度层(图 8b),其值为 $4.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。100~700 m 高度层西北偏西风风速均在 $3.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,西北偏西风在 100~300 m 高度层出现风速为 $3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的等风速层,其最大风速为 $4.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,出现在 2000 m 高度层。800~1300 m 高度层东风风速均在 $4.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,其风速最大值出现在 800 m 高度层(图 8a),其值为 $6.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。东南偏东风在 1200~1300 m 高度层出现风速为 $4.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的等风速层,其最大风速为 $4.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,出现在在 1900 m 高度层。1400 m 高度以上偏北风(NNE、NE、ENE)和偏南风(SSE、S、SSW)风速大,东北偏北风风速最大值出现在 1400 m 高度层,其值为 $8.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,东北风和东北偏东风在 2000 m 高度层风速均出现最大值,其值分别为 7.4 和 $7.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,南风风速最大值出现在 2000 m 高度层,其值为 $7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,西

南偏南风风速最大值出现在 1900 m 高度层,其值为 $7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,东南偏南风风速最大值出现在 1800 m 高度,其值为 $6.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,1900~2000 m 高度层东北偏北风、东北风和东北偏东风风速均大于 $7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

通过以上分析,可以得知溪洛渡水电站坝区四季中低层均以偏西风风速较大,中高层除秋季外,春、夏和冬季偏东风均保持较大风速。具体各季节分析如下:春季边界层中低层偏西风风速大,1000~2000 m 高度层东风风速较大;夏季边界层偏西风(WNW、W、WSW)和偏东风(ENE、E、ESE)均保持较大风速,1100 m 高度层以上偏东风风速较偏西风水速大;秋季大气边界层整层(100~2000m)以偏西风(W、WNW、NW)风速较大,底层西北风风速大,高层西风风速大;冬季大气边界层整层偏西风风速较大,偏东风在中高层风速大。

6 成因分析

溪洛渡水电站坝区及向家坝水电站库区(即溪洛渡水电站坝址到向家坝水电站坝址的河道区域)位于金沙江下游地区,金沙江由北向南流到云南西北部的石鼓镇时,突然向东转向 100 多度,折向东北方向流去,在崇山峻岭中形成了溪洛渡水电站坝址到向家坝水电站坝址长约 160 km 东北—西南走向的河道;同时由于该区域冬季受大陆西北气流控制,夏季受东亚季风与南亚热带季风影响,南下的冷空气和北上的暖湿气流受到当地地形地貌和高山峡谷的阻挡,造成了冬季风和夏季风在该区域内的分流和回流,使得该区域地面全年均盛行偏东风,大气边界层不同季节之间存在风向和风速差异。

7 结 论

(1) 溪洛渡水电站坝区春、夏、秋、冬四季地面均盛行偏东风。春、夏季地面均是东南风风速最大。秋季地面西北偏北风风速最大,冬季地面西风风速最大。

(2) 溪洛渡水电站坝区春、夏季大气边界层中低层盛行西北偏西风和西风,中高层盛行西风和西南偏西风。

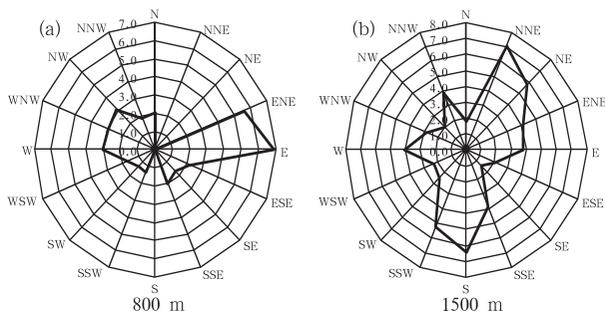


图 8 溪洛渡水电站坝区冬季大气边界层 800(a)和 1500 m(b)高度各风向平均风速玫瑰图(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 8 Average wind speed rose chart for 800 m (a) and 1500 m (b) height of atmospheric boundary layer in the dam area of Xiluodu Hydropower Station in winter (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(3) 溪洛渡水电站坝区秋、冬季大气边界层低层和中层主要盛行偏西风,到高层则逐渐转变为偏北风。

(4) 溪洛渡水电站坝区秋、冬季大气边界层西风、东北偏北风、东北偏东风风速最大值均出现在 2000 m 高度层。

(5) 溪洛渡水电站坝区四季大气边界层整层(100~2000 m)总体以偏西风风速较大,各风向平均风速最大值大部分出现在 1700 m 高度层以上。

参考文献

- 程炳岩,郭渠,张一,等. 2011. 三峡库区高温气候特征及其预测试验. 气象,37(12):1544-1552.
- 丁一汇,耿全震. 1998. 大气、海洋、人类活动与气候变暖. 气象,24(3):12-17.
- 雷国文,李丽,李卫红. 2005. GPS 在气象中的应用. 山西气象,(3):37-39.
- 梁海河,孟昭林,张春晖,等. 2011. 综合气象观测运行监控系统. 气象,37(10):1292-1300.
- 刘锋. 2007. 金沙江下游水电待开发项目简介. 水利水电施工,(3):129-131.
- 孟昭林,李雁,陈挺,等. 2011. 综合气象观测系统业务运行综合评估技术研究. 气象,37(2):219-225.
- 任国玉. 2003. 我们未来的气候:人类的干预有多大? 气象,29(3):3-7.
- 王有民,张强. 2000. 长江三峡工程生态与环境监测系统局地气候监测子系统的设计研究. 应用气象学报,11(2):253-254.
- 王祖承,陈正洪,陈少平,等. 2003. 三峡坝区的地面风场与大气扩散气候特征. 气象,29(5):37-40.
- 姚雯,马颖. 2009. 用 GPS 定位数据研究 L 波段雷达数字探空仪系统的测高误差. 气象,35(2):88-93.
- 郁珍艳,范广洲,华维,等. 2010. 气温突变对我国四季开始日期的影响. 气象,36(11):32-37.
- 曾红玲,张强,祝昌汉. 2010. 三峡库区气压资料的不均一性检验及订正. 气象,36(10):57-61.
- 翟盘茂. 2011. 全球变暖背景下的气候服务. 气象,37(3):257-262.
- 张强,王有民,祝昌汉. 2004. 长江三峡局地气候监测系统及设计研究. 气象,30(9):31-35.
- 张天宇,程炳岩,李永华,等. 2010. 1961—2008 年三峡库区极端高温的变化及其与区域性增暖的关系. 气象,36(12):86-93.