

高原和开阔山地风资源的估算

陈万隆

(南京气象学院)

提 要: 本文着重介绍了在高海拔地区如何利用短期梯度考察资料估算风源资的一种计算方案。

主题词: 风力资源 梯度资料

(一) 用梯度资料确定10m高度风速的方法

近地层风速梯度可写成下列无因次梯度形式

$$\varphi_m(z/L) = (kz/u_*) \partial u / \partial z \quad (1)$$

这里 φ_m 又称为普适函数, 其中 z 为高度, L 为莫宁-奥布霍夫长度尺度, k 为卡门常数(本文取为0.4), u_* 表示摩擦速度, u 为平均风速。目前关于 $\varphi_m(z/L)$ 的形式有很多种, 本文打算引用Businger等人(1971)提出的公式^[1], 即

$$\varphi_m(z/L) = \begin{cases} 1 + 4.7z/L & \text{当 } z/L > 0 \\ (1 - 15z/L)^{-1/4} & \text{当 } z/L < 0 \end{cases} \quad (2)$$

利用梯度资料和(2)式, 就可得到近地层内任一高度上的风速。下面介绍两种应用方法。

(二) 多层梯度观测资料的应用

Paulson对(1)式积分并利用(2)式^[1], 得到

$$u = (u_*/k) [\ln(z/z_0) + 4.7z/L], \text{ 当 } z/L > 0 \quad (3)$$

$$u = (u_*/k) [\ln(z/z_0) - \Psi_m], \text{ 当 } z/L < 0 \quad (4)$$

这里 z_0 为地面粗糙高度, Ψ_m 表示层结订正函数, 且有

$$\Psi_m = 2 \ln[(1+x)/2] + \ln[(1+x^2)/2] - 2 \operatorname{tg}^{-1} x + \frac{\pi}{2};$$
$$x = (1 - 15z/L)^{1/4} = \varphi_m^{-1} \quad (5)$$

由(3)、(4)式看出, 欲用这两个式子推算10m高度上的风速, 需要先确定参数 u_* 、 z_0 和 L 。

假定有几个高度的观测值且 L 可预先计算出, 我们便可用回归方法求出 u_* 和 z_0 。

将(3)和(4)式改写成

$$u_i = a z_i' + b \quad (6)$$

式中

$$\bar{z}_i' = \ln z_i'; \quad z_i' = z_i \exp(-\Psi_m'),$$

$$\Psi_m' = \begin{cases} -4.7z_i/L, & \text{当 } z/L > 0 \\ \Psi_m(z_i/L) = 2\ln[(1+x_i)/2] + \ln[(1+x_i^2)/2] - 2\operatorname{tg}^{-1}x_i + \pi/2, & \text{当 } z/L < 0 \end{cases}$$

$$x_i = (1-15z_i/L)^{1/4}$$

根据(6)式和几个高度的风速测量值不难求出回归系数 a 和 b ,并由(3)和(4)式解得

$$u_* = ka; \quad z_0 = \exp(-b/a) \quad (7)$$

至于 L ,我们曾得到它的近似表达式^[2]为

$$L = \begin{cases} 6.80[(\theta_2 - \theta_{0.5})/(u_2 - u_{0.5})^2]^{-1.016}, & \text{当 } L \geq 0 \\ -17.23[(\theta_{0.5} - \theta_2)/(u_2 - u_{0.5})^2]^{-1.136}, & \text{当 } L < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中 θ 表示位温, θ 和 u 的下标表示高度(m), L 的单位为m。

利用青藏高原气象科学实验资料和大别山开闢山顶梯度资料计算结果表明,在任一大气层结下,近地层风速廓线在 u 与 $\ln z'$ 坐标系上为一直线。这说明(2)式对于上述地形是适合的。

(三) 两层梯度观测资料的应用

设这两层高度分别为 $z_1 = 0.5\text{m}$, $z_2 = 2.0\text{m}$ 。我们可用半经验方法和(3)、(4)式来推算10m高度上的风速。 L 仍按(8)式和两层梯度资料算出。考虑到2m高度以下风速随高度的变化在任何层结下都能很好地满足对数律(即 $u = (u_*/k)\ln(z/z_0)$)的事实,由此得到 z_0 的计算公式:

$$z_0 = z_2 \cdot \exp(-ku_2/u_*) \quad (8)$$

式中的 u_* 可由对(1)式求定积分得出^[2],即

$$(1) \text{ 当 } z/L \geq 0, \text{ 有 } u_* = k(u_2 - u_{0.5})/[\ln(z_2/z_1) + 4.7(z_2 - z_1)/L],$$

$$(2) \text{ 当 } z/L < 0 \text{ 时, 有 } u_* = k(u_2 - u_{0.5})/(2\operatorname{tg}^{-1}A + \ln B),$$

其中 $A = [(1-15z_2/L)^{1/4} - (1-15z_1/L)^{1/4}]/[1 + (1-15z_2/L)^{1/4}(1-15z_1/L)^{1/4}]$

$$B = [(1-15z_2/L)^{1/4} - 1][(1-15z_1/L)^{1/4} + 1]/[(1-15z_2/L)^{1/4} + 1](1-15z_1/L)^{1/4} - 1]$$

(四) 风能的推算方法

$$\text{风能的功率 定义为 } w = \frac{1}{2} \rho F u^3 \quad (10)$$

式中 F 表示单位时间内气流穿过的面积, ρ 为测站的空气密度。

统计上已证明, u 的概率分布符合韦伯二参数分布,即有

$$f(u) = (K/C)(U/C)^{K-1} \exp[-(U/C)^K] \quad (11)$$

式中 C 称为尺度因子, K 表示形状因子。根据韦伯二参数分布的性质,可求得 U 的数学期望 m 和方差 σ^2 分别为

$$\left. \begin{aligned} m &= \bar{u} = C \Gamma(1+1/K) \\ \sigma^2 &= C^2 \{ \Gamma(1+2/K) - [\Gamma(1+1/K)]^2 \} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中 Γ 为伽玛函数。由上式得到尺度因子

$$C = \bar{u} / \Gamma(1 + 1/K) \quad (13)$$

另外, Justus等得到 K 的近似式为〔8〕

$$K = (\sigma / \bar{u})^{-1.086} \quad (14)$$

(13) 和 (14) 式表示用样本平均值和均方差来确定韦伯分布的二个参数 C 和 K 。

假定考察站 A 与气象站 B 相距不甚远, 且两站地形开阔平坦, 同处于大地形的一侧。我们认为它们受同一环流条件的影响, 并且两站的风速满足下列线性关系:

$$u_A = \alpha u_B + \beta \quad (15)$$

而 A 与 B 两站风速的方差应满足如下关系:

$$\sigma_A^2 = \alpha^2 \sigma_B^2 \quad (16)$$

据此我们可考虑一种特殊情况的应用, 即当 A 和 B 两站海拔高度相差不大时, (15) 式中的 β 应当 $\ll \alpha \bar{u}_B$ 。则由 (14) 式求得 A 站的形状因子

$$K_A = (\sigma_A / \bar{u}_A)^{-1.086} = [\alpha \sigma_B / (\alpha \bar{u}_B + \beta)]^{-1.086} \approx K_B \quad (17)$$

相应的尺度因子 C 由 (13) 式给出, 即

$$C_A = (\alpha \bar{u}_B + \beta) / \Gamma(1 + 1/K_B) \quad (18)$$

这就是说, 在上述个例情况下, 气象站风速韦伯二参数分布的形状因子 K_B 可以直接移到考察站上。这对形状因子 K_A 的估计大约不超过10%的误差。

现在讨论风速考察资料的序列延长问题。以下标 S 和 L 分别代示短和长序列。据线性回归理论, 我们能将考察站风速短序列的均值和方差延长为长序列的均值和方差, 即由 (15) 和 (16) 式得到

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_{AL} &= \bar{u}_{AS} + \alpha(\bar{u}_{BL} - \bar{u}_{BS}) \\ \sigma_{AL}^2 &= \sigma_{AS}^2 + \sigma_{BL}^2 / \sigma_{BS}^2 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

这就是通常称为序列延长的差值法和比值法。将 (19) 式代入 (13) 和 (14) 式, 便可得到考察站经序列延长后的尺度因子和形状因子, 对于水平相距不甚远而高度差不太大的二地, 仍可采用以下二参数来估计考察站出现风速 u 的概率密度:

$$\left. \begin{aligned} K_{AL} &\approx K_{BL} = (\sigma_{BL} / \bar{u}_{BL})^{-1.086} \\ C_{AL} &= (\alpha \bar{u}_{BL} + \beta) / \Gamma(1 + 1/K_{BL}) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

最后, 如令 (10) 式的 $F = 1$, 则气象平均风能为

$$\bar{W} = \frac{1}{2} \rho \int_0^\infty f(u) u^3 du \quad (21)$$

上式右边是可积的。

近二十年来, 我国气象工作者广泛开展了高原和山地的小气候考察, 积累了丰富的梯度、观测资料。以上我们介绍了利用这些梯度资料估算高原地区和开阔山地风资源的方法。其估算步骤可概括如下:

(1) 根据Businger等人提出的普适函数 $\varphi_m(z/L)$, 将考察站测风资料延伸到10m高度(即气象站测风高度), 求出考察站该高度上风速 u_A 。

(2) 在对考察站风速 u_A 与气象站风速 u_B 进行回归分析的基础上,按(19)式将考察站风速短序列延长为长序列。

(3) 根据(11)、(20)和(21)式计算出考察站的平均风能。

参 考 文 献

- (1) D.A.豪根(主编).(李兴生等译).微气象学.科学出版社.北京:1984,77—79.
- (2) 陈万隆,孙卫国.计算湍流交换的一个实用公式.地理科学,1983,3(3):215—223.
- (3) 谭冠日、严济远、朱瑞兆.应用气候.上海科技出版社,1985,313—336.

AN ESTIMATING METHOD OF WIND POWER RESOURCE OVER HIGHLAND

Chen Wanlong

(Nanjing Institute of Meteorology)

Subject terms: Wind power resource, Estimation, Gradient data

Abstract

A technique using gradient data obtained from short-term survey to estimate wind power resource over highland is introduced basec on the universal function developed by Businger etc., and data sequence extension method as well as weibull distribution with two parameters.