

黄勤,王玮,李亚丽,等. X波段双偏振雷达不同衰减订正方法对比分析[J]. 陕西气象,2024(3):68-74.

文章编号:1006-4354(2024)03-0068-07

# X波段双偏振雷达不同衰减订正方法对比分析

黄勤<sup>1,2</sup>,王玮<sup>1</sup>,李亚丽<sup>1</sup>,贾晨刚<sup>1</sup>

(1. 陕西省气象信息中心,西安 710014;

2. 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室,西安 710016)

**摘要:**利用旬邑 X 波段双偏振雷达数据,采用  $Z_h-K_{DP}$  综合法、 $Z_h-K_{DP}$  综合分类法、ZPHI 降水廓线法和初始相位法进行衰减订正对比分析,并将订正后数据与西安 C 波段天气雷达数据进行对比检验。结果表明,4 种订正方法均能对反射率因子进行有效订正,订正后强回波中心与  $K_{DP}$  强中心基本吻合,可基本还原降水分布特征;采用 ZPHI 降水廓线法订正后出现条纹状误差回波,订正效果较差;不同订正方法均可使 X 波段雷达反射率因子与 C 波段雷达反射率因子间的相关性提高;采用  $Z_h-K_{DP}$  综合法、 $Z_h-K_{DP}$  综合分类法和初始相位法订正后,强回波中心位置与 C 波段雷达较接近,订正后的反射率因子平均值与 C 波段雷达反射率因子值接近,绝对偏差和相对偏差减小; $Z_h-K_{DP}$  综合分类法和初始相位法订正效果相对不稳定, $Z_h-K_{DP}$  综合法订正效果较好且稳定。

**关键词:**X 波段双偏振雷达;衰减订正; $Z_h-K_{DP}$  综合法; $Z_h-K_{DP}$  综合分类法;ZPHI 降水廓线法;初始相位法

中图分类号:P414

文献标识码:A

X 波段双偏振雷达由于体积小、成本低、物理参量丰富,在降水估计及粒子相态识别等方面被广泛应用。但由于波长短,雷达信号在通过雨区时存在衰减,严重影响雷达资料的应用<sup>[1-2]</sup>。因此在雷达资料应用前对其进行衰减订正很有必要。天气雷达反射率因子的衰减订正主要采用衰减率( $A_H$ )与反射率因子( $Z_h$ )之间的关系完成。由于差分传播相移率( $K_{DP}$ )和差分传播相移( $\Phi_{DP}$ )不受衰减影响<sup>[3]</sup>,因此在衰减订正方法研究中被广泛使用,主要利用  $K_{DP}$  或  $\Phi_{DP}$  与  $A_H$  的关系计算衰减订正<sup>[3-12]</sup>。Carey<sup>[4]</sup> 等通过数值模拟表明, $K_{DP}$  和  $A_H$  存在线性关系,提出  $A_H-K_{DP}$  经验公式<sup>[3]</sup>,并结合衰减率与反射率因子关系式,形成初始相位订正法。该方法计算较为简单,但由于受雨滴谱分布影响和衰减对温度的依赖性,直接采用该方法只能进行近似订正<sup>[3]</sup>。为防止外界其

他因素干扰影响订正效果,胡智群等提出  $Z_h-K_{DP}$  综合法<sup>[7]</sup>。Testud<sup>[8]</sup> 提出 ZPHI 降水廓线订正法,利用  $\Phi_{DP}$  完成订正。Bringi<sup>[9]</sup> 等对 ZPHI 降水廓线法进行改进,形成自适应算法<sup>[3,10]</sup>。为减小衰减系数受雨滴谱分布的影响,李宗飞等综合自适应算法和  $Z_h-K_{DP}$  综合法,提出  $Z_h-K_{DP}$  综合分类法<sup>[6]</sup>。

本文采用  $Z_h-K_{DP}$  综合法、 $Z_h-K_{DP}$  综合分类法、ZPHI 降水廓线法和初始相位法等 4 种订正方法,选取 2022 年 11 月 8 日旬邑 X 波段双偏振雷达资料进行反射率因子衰减订正,并与西安 C 波段天气雷达等高平面反射率因子数据进行对比,以期分析不同方法的订正效果,为后期旬邑 X 波段双偏振雷达资料组网应用奠定基础。

## 1 订正方法

### 1.1 $Z_h-K_{DP}$ 综合法

为了避免在低信噪比情况下  $K_{DP}$  数据质量影

收稿日期:2023-03-23

作者简介:黄勤(1987—),女,汉族,四川眉山人,硕士,高工,主要从事气象数据分析与应用研究。

通信作者:王玮(1992—),男,汉族,陕西清涧人,硕士,工程师,主要从事气象数据分析与应用研究。

基金项目:陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2022Y-9)

响衰减订正效果,  $Z_h - K_{DP}$  综合订正法<sup>[3,6,11]</sup>通过设置阈值, 利用  $K_{DP}$  计算衰减率, 并联合反射率因子衰减订正的基本公式完成订正。反射率因子衰减订正的基本公式<sup>[3]</sup>如下。

$$Z_{ha} = Z_h + 2 \int_0^r A_H(s) ds, \quad (1)$$

其中  $Z_h$  和  $Z_{ha}$  为订正前后的反射率因子,  $r$  为雷达探测目标与雷达中心间的距离,  $s$  表示距离库增量,  $A_H$  为衰减率。  $A_H$  的计算方法<sup>[6,11]</sup>如下。

$$A_H = \begin{cases} \alpha_1 K_{DP} & 0.1 \leq K_{DP} \leq 3 \\ \alpha_2 Z_h^\beta & \text{其他} \end{cases}, \quad (2)$$

表 1 不同反射率因子  $Z_h$  和差分传播相移率  $K_{DP}$  下的衰减系数

$Z_h$ /dBZ	衰减系数				
	$[0, 1.5](^\circ)/\text{km}$	$(1.5, 3.0](^\circ)/\text{km}$	$(3.0, 4.5](^\circ)/\text{km}$	$(4.5, 6.0](^\circ)/\text{km}$	$(6.0, 7.5](^\circ)/\text{km}$
$[0, 15]$	0.216	0.218	0.201	0.125	0.1
$(15, 30]$	0.200	0.193	0.167	0.178	0.1
$(30, 45]$	0.202	0.175	0.163	0.189	0.12
$(45, 60]$	0.369	0.234	0.187	0.154	0.12

### 1.3 ZPHI 降水廓线法

ZPHI 降水廓线法<sup>[3,10]</sup>是在一定的约束条件下, 利用  $\Phi_{DP}$  计算衰减率  $A_H$ , 结合反射率因子衰减订正基本公式计算订正值。ZPHI 订正法需要进行降雨分段, 通过设定  $n+1$  个边界, 将一个径向数据分成  $n$  段来计算衰减率。每一段的  $A_H$  的计算方法<sup>[3]</sup>如下。

$$A_H = \left( \frac{Z_h^b(r)}{I(r_1, r_2) + (10^{0.1b\gamma\Delta\phi} - 1)I(r, r_2)} \right) \times (10^{0.1b\gamma\Delta\phi} - 1), \quad (3)$$

$$I(r, r_2) = 0.46b \int_r^{r_2} Z_h^b(s) ds, \quad (4)$$

$$I(r_1, r_2) = 0.46b \int_{r_1}^{r_2} Z_h^b(s) ds, \quad (5)$$

$$\Delta\phi = \phi_{DP}(r_2) - \phi_{DP}(r_1). \quad (6)$$

其中  $Z_h$  为订正前反射率因子,  $r_1$ 、 $r_2$  分别表示进行降雨分段时径向数据段的起、始位置,  $r$  表示径向数据段中某一个距离库,  $b$  为常数, 取值范围  $0.757 \sim 0.804$ , 本文中  $b = 0.804$ ,  $\gamma = 0.32$ 。  $\Delta\phi$  表示  $r_1$  到  $r_2$  这段路径的  $\Phi_{DP}$  变化量。

### 1.4 初始相位法

初始相位法是通过每个径向上的初始相位

其中  $K_{DP}$  为差分传播相移率。针对 X 波段雷达, Bringi<sup>[9]</sup> 等通过模拟雷达信号回波为 Gamma 分布, 求得  $a_1$  范围为  $0.210 \sim 0.247$ 。本文取  $a_1 = 0.247$ ,  $a_2$ 、 $\beta$  分别取常数  $1.37 \times 10^{-4}$ 、 $0.779$ 。

### 1.2 $Z_h - K_{DP}$ 综合分类法

为减小雨滴谱分布对衰减订正的影响,  $Z_h - K_{DP}$  综合分类法<sup>[6]</sup>根据不同降水类型统计出不同强度反射率因子和  $K_{DP}$  下的衰减系数  $a$ , 利用  $a$  和  $K_{DP}$  计算  $A_H$ , 并联合反射率因子衰减订正基本公式计算衰减订正值。不同反射率因子  $Z_h$  和  $K_{DP}$  对应的衰减系数如表 1 所示。

$\Phi_{DP}(0)$  计算衰减订正值<sup>[3,10]</sup>, 公式如下。

$$Z_{ha} = Z_h + \delta(\phi_{DP}(r) - \phi_{DP}(0)). \quad (7)$$

其中  $\delta = 0.25$  dB/( $^\circ$ )。初始相位  $\Phi_{DP}(0)$  的取值方法<sup>[12]</sup>如下: 沿径向向外寻找, 在连续 10 个距离库中, 当 X 波段雷达偏振参量的相关系数大于 0.9 且  $\Phi_{DP}$  标准差小于  $3^\circ$  时, 取连续 10 个距离库的  $\Phi_{DP}$  平均值作为该径向的初始相位  $\Phi_{DP}(0)$ 。一般情况下, 不同时刻、仰角和方位角的初始相位在径向上波动不大。

## 2 订正效果分析

文中所用雷达资料包括旬邑 X 波段双偏振雷达和西安 C 波段天气雷达的基数据, 观测资料时间为 2022 年 11 月 8 日, 两部雷达海拔分别为 1 323.0 m 和 407.7 m, 旬邑 X 波段雷达位于西安 C 波段雷达西北方向, 相距约 99 km。由于  $\Phi_{DP}$  数据质量问题会影响衰减订正效果, 因此使用  $\Phi_{DP}$  数据前需对其进行退模糊处理<sup>[1,13-16]</sup>。

### 2.1 单仰角订正效果分析

图 1 为 X 波段双偏振雷达 12:13 订正前  $1.5^\circ$  仰角的反射率因子、差分传播相移率和差分

传播相移。可以看出降水主要位于雷达东南侧,从实际观测可知降水中心集中在(34.8°N,108.6°E)附近,回波强度在30~50 dBZ之间。当差分传播相移率 $K_{DP}$ 增大时, $\Phi_{DP}$ 变化剧烈<sup>[6]</sup>,反射率因子应随之增大。 $K_{DP}$ 和 $\Phi_{DP}$ 指示的降水中心应在

34.2°N附近区域,该区域 $K_{DP}$ 增大、 $\Phi_{DP}$ 变化剧烈,反射率因子应较其他区域更大,但实际观测的反射率因子却减小后迅速结束,表明在通过降水区域时雷达信号存在严重衰减,回波突然结束区域信号被完全衰减。

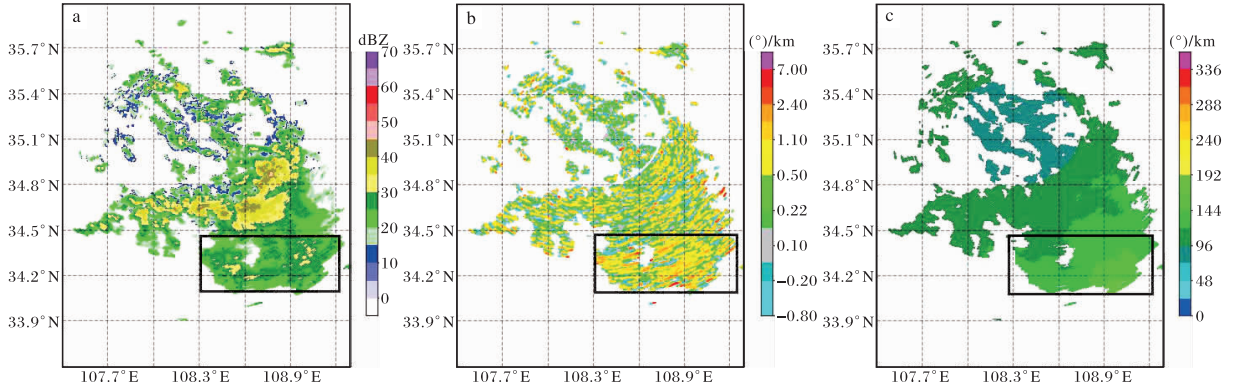


图1 2022-11-08T12:13旬邑X波段双偏振雷达订正前1.5°仰角反射率因子(a)、差分传播相移率 $K_{DP}$ (b)、差分传播相移 $\Phi_{DP}$ (c)(黑色方框区域存在严重衰减)

图2为采用 $Z_h-K_{DP}$ 综合法、 $Z_h-K_{DP}$ 综合分类法、ZPHI降水廓线法和初始相位法对1.5°仰角反射率因子进行衰减订正后的效果。4种方法均能对反射率因子进行适当订正,35.1°N以南反射率因子订正效果明显,34.2°N附近强回波中心与 $K_{DP}$ 强中心基本吻合。34.2°N以南无回波区域雷达信号被完全衰减,无法进行衰减订正。

图2a为采用 $Z_h-K_{DP}$ 综合法进行衰减订正后的效果。该方法采用固定衰减系数,不区分降水类型和降水中心。订正后回波纹理平滑,在34.5°N以北和34.2°N附近出现3个50 dBZ以上的强回波中心。在(34.2°N,108.9°E)附近,45 dBZ以上强回波中心与 $K_{DP}$ 和 $\Phi_{DP}$ 强中心基本吻合。图2b为采用 $Z_h-K_{DP}$ 综合分类法进行衰减订正后效果。该方法采用的订正系数是在不同降水类型下 $K_{DP}$ 和反射率因子的统计结果,总体上订正系数随反射率因子增大而增大,随 $K_{DP}$ 增大而减小。订正后回波纹理平滑,强回波区订正值较 $Z_h-K_{DP}$ 综合法订正值小,只在34.2°N以北,108.9°E以西附近出现1个50 dBZ以上的强回波中心,且在强 $K_{DP}$ 中心订正不足。图2c为ZPHI降水廓线法订正效果,降雨分段可以采用20个、60个、80个和整段等距离库个数进行分

段,本文采用20个距离库进行分段,将1.5 km分为1个雨区。从订正效果看,订正值较 $Z_h-K_{DP}$ 综合法大,出现条纹状回波,严重影响订正效果。该方法易受距离库分段区间 $\Phi_{DP}$ 质量影响,当 $\Phi_{DP}$ 缺测或距离库分段区间在降水边沿时,会造成较大误差,出现如条纹状等误差回波。图2d为采用初始相位法订正效果,该方法通过沿径向寻找初始相位来计算衰减系数,因初始相位在不同仰角和方位角上波动不大,所以计算简单。从订正效果看,采用初始相位法的订正值大于其他三种,在34.2°N和34.8°N附近出现6个50 dBZ以上的强回波中心,且较 $Z_h-K_{DP}$ 综合法订正后的回波面积和反射率因子值更大。综上所述,以上4种方法均能实现适当订正, $Z_h-K_{DP}$ 综合分类法订正值最小且在强 $K_{DP}$ 处订正不足,ZPHI降水廓线法订正后存在条纹状回波, $Z_h-K_{DP}$ 综合法和初始相位法订正后回波纹理平滑且强回波中心与 $K_{DP}$ 强中心吻合。

## 2.2 与C波段天气雷达对比分析

为检验衰减订正效果,利用西安C波段天气雷达资料进行对比分析。对比分析前,需将X波段双偏振雷达和C波段天气雷达极坐标下空间分辨率不等的回波数据统一插值到空间分布均匀

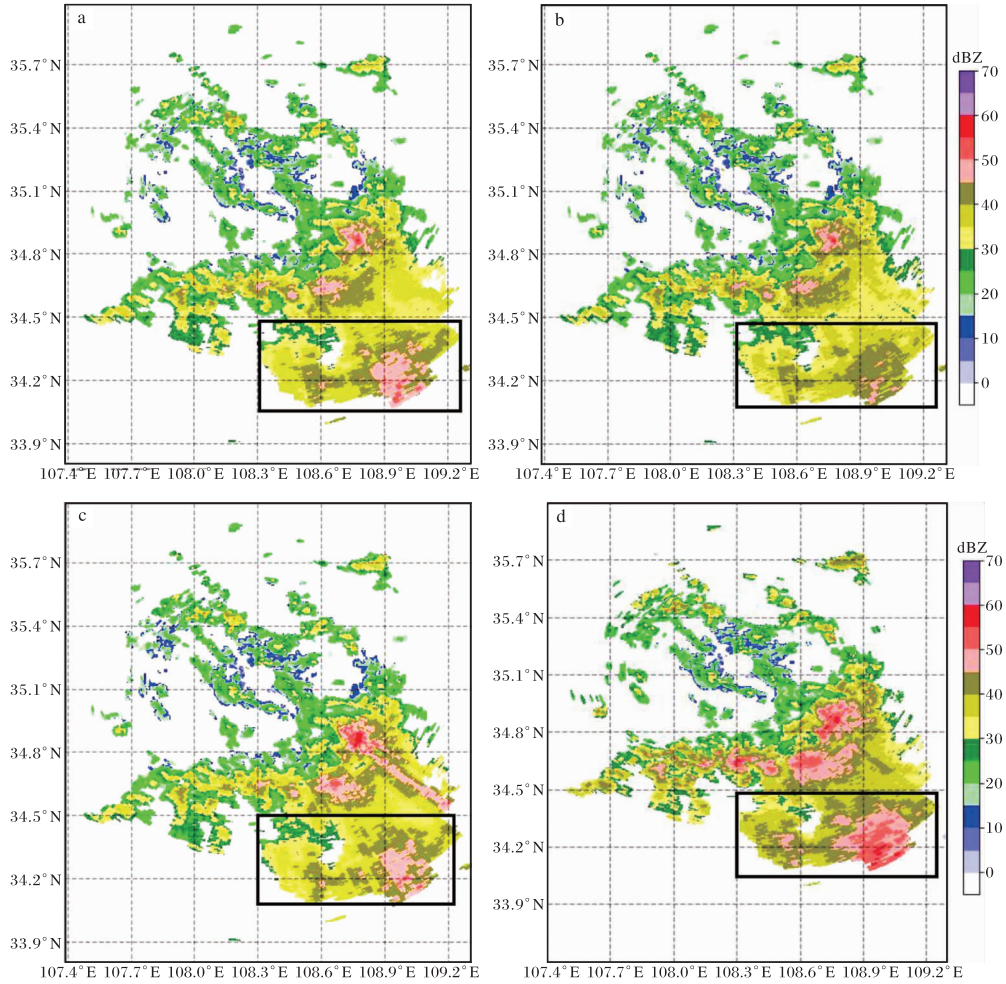


图2 2022-11-08T12:13旬邑X波段双偏振雷达1.5°仰角反射率因子订正效果  
 (a  $Z_h-K_{DP}$ 综合法,b  $Z_h-K_{DP}$ 综合分类法,c ZPHI降水廓线法,d 初始相位订正法)  
 (黑色方框区域在订正前存在严重衰减)

的笛卡尔坐标系下。本文采用双线性插值法,选取C波段雷达上空2 km高度作为对比平面,分

别对X波段和C波段两部雷达进行等高平面插值。由图3可见,在34.2°N~34.8°N区域,两部

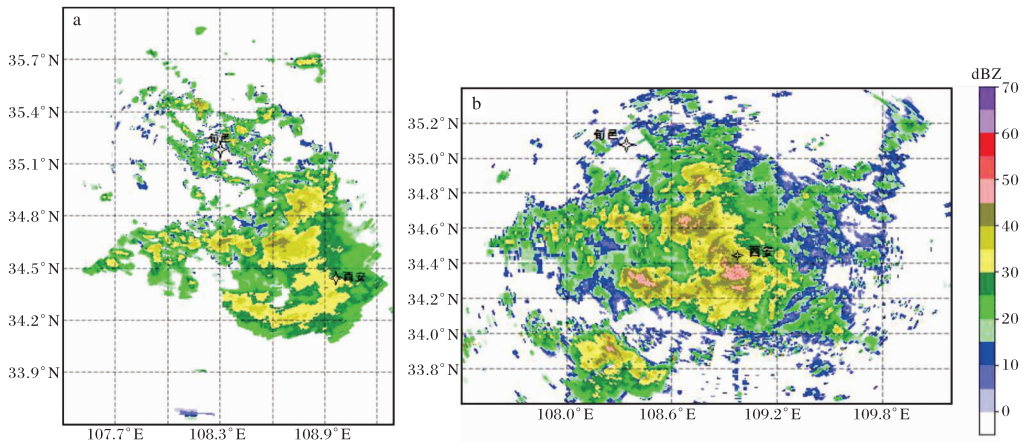


图3 2022-11-08T12:13订正前旬邑X波段(a)和西安C波段(b)雷达等高平面反射率因子

雷达 30 dBZ 以上的回波形态相似, X 波段雷达回波均在 45 dBZ 以下, C 波段雷达则存在 3 个 45 dBZ 以上的强回波中心。

采用  $Z_h-K_{DP}$  综合订正法后(图 4a), 在  $34.2^{\circ}\text{N}\sim 34.8^{\circ}\text{N}$  区域出现了多个 45 dBZ 以上的强回波中心, 与 C 波段雷达的强回波中心和强度基本吻合。但在  $(34.2^{\circ}\text{N}, 108.6^{\circ}\text{E})$  附近, 订正后 45 dBZ 以上回波面积小于 C 波段雷达。图 4b 为  $Z_h-K_{DP}$  综合分类订正法的订正效果, 该方法的订正值小于  $Z_h-K_{DP}$  综合订正法的订正值。在

$34.2^{\circ}\text{N}\sim 34.8^{\circ}\text{N}$  区域, 45 dBZ 以上强回波中心位置与 C 波段雷达基本吻合, 但 X 波段雷达的强回波面积和最大回波强度小于 C 波段雷达。采用 ZPHI 降水廓线订正法后(图 4c), X 波段雷达的强回波中心位置与 C 波段雷达基本吻合, 强回波面积和最大回波强度略大于 C 波段雷达, 条纹状回波明显。采用初始相位订正法后(图 4d),  $34.2^{\circ}\text{N}\sim 34.8^{\circ}\text{N}$  区域 45 dBZ 以上回波面积大于 C 波段雷达, 在  $(34.2^{\circ}\text{N}, 108.6^{\circ}\text{E})$  附近, 订正后 45 dBZ 以上回波面积与 C 波段雷达相近。

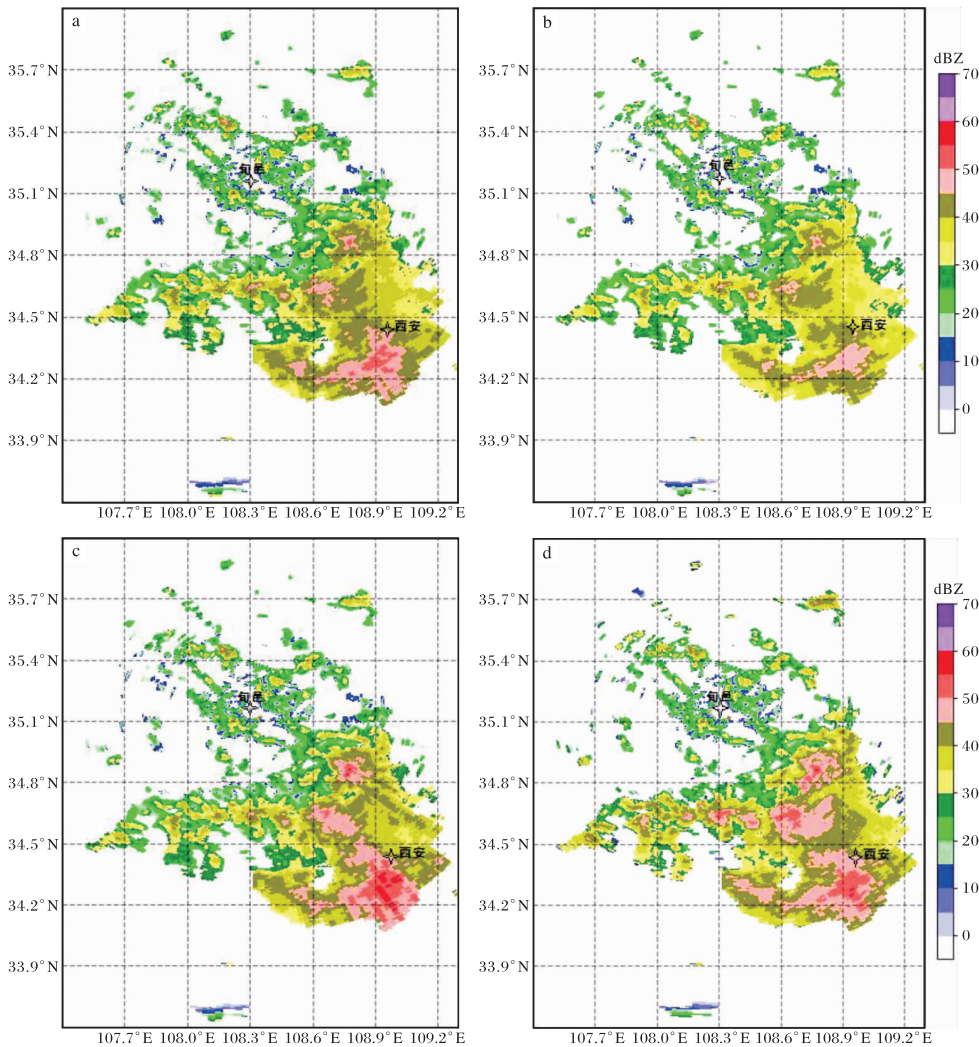


图 4 2022-11-08T12:13 订正后旬邑 X 波段双偏振雷达等高平面反射率因子  
(a  $Z_h-K_{DP}$  综合法, b  $Z_h-K_{DP}$  综合分类法, c ZPHI 降水廓线法, d 初始相位订正法)

选取  $34.2^{\circ}\text{N}\sim 34.5^{\circ}\text{N}, 108.6^{\circ}\text{E}\sim 109.2^{\circ}\text{E}$  区域的 X 波段和 C 波段雷达数据, 将订正前后的反射率因子与 C 波段雷达反射率因子进行对比。

C 波段雷达反射率因子的平均值为 33.25 dBZ。由表 2 可见, 采用  $Z_h-K_{DP}$  综合法和初始相位法订正后的反射率因子的平均值与 C 波段雷达的平

均值较接近,绝对偏差和相对偏差较小。其中初始相位法订正后的平均值与C波段雷达最接近,绝对偏差和相对偏差也最小。从相关系数可见,不同订正方法均使X波段雷达反射率因子与C

波段雷达反射率因子间的相关性提高,在0.7左右。从订正效果看, $Z_h-K_{DP}$ 综合法和初始相位法订正效果较好,其中初始相位法最好。

表2 2022-11-08T12:13旬邑X波段雷达反射率因子订正前后与C波段雷达反射率因子对比

对比项	反射率因子平均值/dBZ	相关系数	绝对偏差/dBZ	相对偏差/%
订正前	27.94	0.56	5.31	15.98
$Z_h-K_{DP}$ 综合法	36.06	0.69	2.81	8.46
$Z_h-K_{DP}$ 综合分类法	38.84	0.71	5.59	16.82
ZPHI降水廓线法	43.25	0.72	10.00	30.08
初始相位订正法	33.84	0.65	0.59	1.78

为了验证上述对比分析结果,选取了2022年11月8日12:42、13:18、13:26和13:48四个时次数据进行衰减订正对比分析(图略)。总体上,在 $109.2^{\circ}\text{E}$ 以西区域,采用 $Z_h-K_{DP}$ 综合法、 $Z_h-K_{DP}$ 综合分类法和初始相位法订正后的强回波中心位置与C波段雷达的强回波中心位置基本吻合。采用 $Z_h-K_{DP}$ 综合法订正后,45 dBZ以上强回波位置和面积与C波段最接近。采用ZPHI降水廓线法订正后,45 dBZ以上回波面积和最大回波强度比C波段雷达大得多,且条纹状回波明显。 $Z_h-K_{DP}$ 综合分类法和初始相位法订正的回波面积和最大回波强度略大于C波段雷达。

选取12:42( $34.2^{\circ}\text{N}\sim 34.5^{\circ}\text{N}$ , $108.6^{\circ}\text{E}\sim$

$109.2^{\circ}\text{E}$ )和13:18、13:26、13:48( $34.5^{\circ}\text{N}\sim 34.8^{\circ}\text{N}$ , $108.6^{\circ}\text{E}\sim 109.2^{\circ}\text{E}$ )四个时次的的数据,将订正前后的反射率因子与C波段雷达反射率因子进行对比。C波段雷达反射率因子的平均值为34.53 dBZ。由表3可见,四种订正方法订正后的反射率因子平均值均大于C波段雷达。采用 $Z_h-K_{DP}$ 综合法和 $Z_h-K_{DP}$ 综合分类法订正后的反射率因子平均值与C波段雷达较接近,其中 $Z_h-K_{DP}$ 综合法的各项指标均优于其他方法。 $Z_h-K_{DP}$ 综合分类法和初始相位法的各项指标较12:13的均有变化,说明这两种方法订正效果相对不稳定。总体来看 $Z_h-K_{DP}$ 综合法的订正效果较稳定。

表3 2022-11-08T12:42、13:18、13:26和13:48四个时次旬邑X波段雷达反射率因子订正前后与C波段雷达反射率因子对比

对比项	反射率因子平均值/dBZ	相关系数	绝对偏差/dBZ	相对偏差/%
订正前	26.05	0.52	8.48	24.55
$Z_h-K_{DP}$ 综合法	38.00	0.65	3.47	10.00
$Z_h-K_{DP}$ 综合分类法	39.10	0.64	4.57	13.23
ZPHI降水廓线法	45.00	0.53	10.47	30.32
初始相位订正法	40.34	0.54	5.81	16.82

### 3 结论

本文采用 $Z_h-K_{DP}$ 综合法、 $Z_h-K_{DP}$ 综合分类法、ZPHI降水廓线法和初始相位法4种衰减订正方法,利用2022年11月8日旬邑X波段双偏

振雷达数据进行衰减订正对比分析,并将订正后数据和西安C波段天气雷达数据插值到统一的数据格点上进行比较检验,得到如下结论。

(1)4种衰减订正方法均能对反射率因子进

行有效订正,订正后强回波中心与  $K_{DP}$  强中心基本吻合。通过 12:13、12:42、13:18、13:26 和 13:48 五个时次的订正,分别还原出 4、4、3、2、2 个强回波中心,基本还原降水分布特征。

(2) 采用  $Z_h-K_{DP}$  综合法、 $Z_h-K_{DP}$  综合分类法和初始相位法订正后反射率因子纹理平滑;采用 ZPHI 降水廓线法订正后出现条纹状误差回波,分段区间内  $\Phi_{DP}$  质量严重影响订正效果。

(3) 不同订正方法均使 X 波段雷达反射率因子值与 C 波段雷达反射率因子值之间的相关性提高。 $Z_h-K_{DP}$  综合法、 $Z_h-K_{DP}$  综合分类法和初始相位法订正后的强回波中心位置与 C 波段雷达较吻合,订正后的反射率因子平均值与 C 波段雷达反射率因子值接近,绝对偏差和相对偏差减小。此次降水过程中, $Z_h-K_{DP}$  综合分类法和初始相位法订正效果相对不稳定, $Z_h-K_{DP}$  综合法订正效果较好且稳定。

总体来说,依赖偏振参量和衰减系数来完成衰减订正的方法均受到较多因素制约。不同地区、季节和降水类型采用相同衰减系数和订正方法,得到的订正效果也不尽相同。下一步将继续筛选、检验订正效果较好的衰减订正方法,实现 X 波段双偏振雷达数据最优订正,为后期 X 波段雷达资料应用提供可靠数据。

#### 参考文献:

- [1] 张林,李峰,冯婉悦,等. 移动 X 波段双线偏振雷达数据质量分析及偏差订正[J]. 气象,2021,47(3): 337-347.
- [2] 李思腾,仰美霖,李林,等. 基于标准差分析法的 X 波段双偏振天气雷达资料质量评估[J]. 干旱气象,2019,37(3):467-476.
- [3] BRINGI V N, CHANDRASEKAR V. 偏振多普勒天气雷达原理和应用[M]. 李忱,张越,译. 北京:气象出版社,2010:334-348.
- [4] CAREY L D, RUTLEDGE S A, AHJEVYCH D A. Correcting propagation effects in C-band polarimetric radar observations of tropical convection using differential propagation phase[J]. Journal of Applied Meteorology,2000,39(9):1405-1433.
- [5] 吴欢,黄兴友. X 波段双线偏振雷达回波强度衰减和地物回波识别订正[J]. 气象科学,2014,34(1): 32-38.
- [6] 李宗飞,肖辉,冯亮,等. X 波段双偏振天气雷达衰减订正方法及效果检验[J]. 气象科技,2019,47(5):731-739.
- [7] 胡志群,刘黎平,楚荣忠,等. X 波段双线偏振雷达不同衰减订正方法对比及其对降水估测影响研究[J]. 气象学报,2008,66(2):251-261.
- [8] TESTUD J, BOUAR L E, OBLIGIS E, et al. The rain profiling algorithm applied to polarimetric weather radar[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2000,17:332-356.
- [9] BRINGI V N, KEENAN T D, CHANDRASEKAR V. Correcting C-band radar reflectivity and differential reflectivity data for rain attenuation: a self-consistent method with constraints[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2001,39(9):1906-1915.
- [10] 王晗,刘黎平,张扬. X 波段双线偏振雷达不同衰减订正法对比分析[J]. 气象科技,2018,46(1):1-9.
- [11] 雷亚会. X 波段双偏振雷达反射率因子的衰减订正[J]. 成都信息工程学院学报,2014,29(6):586-589.
- [12] 范根昌,樊嵘,王梧熠. 河北省双线偏振雷达数据质量分析和衰减订正[J]. 气象科学,2021,41(2): 278-284.
- [13] 徐星,闫贺,周晔,等. X 波段双偏振气象雷达差分相位质量控制[J]. 雷达科学与技术,2022,20(6): 671-677.
- [14] 赵川鸿,周筠珺,肖辉,等. X 波段双线偏振多普勒雷达共极化差分相移资料的滤波方法研究[J]. 大气科学,2019,43(2):285-296.
- [15] 王超,吴翀,刘黎平. X 波段双线偏振雷达数据质量分析及控制方法[J]. 高原气象,2019,38(3): 636-649.
- [16] 肖艳姣,王斌,陈晓辉,等. 移动 X 波段双线偏振多普勒天气雷达差分相位数据质量控制[J]. 高原气象,2012,31(1):223-230.