

引用格式:孙晨玥,戴强,纪端阳,顾于,刘超楠,李雁鹏. 基于多相态 $KE-I$ 关系的降水动能计算方法[J]. 山地学报, 2023, 41(5): 771-784.
SUN Chenyue, DAI Qiang, JI Duanyang, GU Yu, LIU Chaonan, LI Yanpeng. Calculation of precipitation kinetic energy based on multi-phase $KE-I$ relationship [J]. Mountain Research, 2023, 41(5): 771-784.

基于多相态 $KE-I$ 关系的降水动能计算方法

孙晨玥¹, 戴强^{1*}, 纪端阳¹, 顾于¹, 刘超楠¹, 李雁鹏²

(1. 南京师范大学 地理科学学院, 南京 210023; 2. 中国气象局 公共气象服务中心, 北京 100081)

摘 要: 降水动能描述了水凝物到达地表的动能大小, 是计算土壤颗粒分离和土壤侵蚀等地表物理化学过程的重要参数之一。针对目前降水动能计算多考虑降雨特征, 忽略其他相态降水的问题, 本研究基于 2018 年全国 25 个雨滴谱仪站点的降水观测数据, 结合速度(V)-直径(D)关系对水凝物进行相态划分, 拟合了不同相态降水的降水动能-降水强度(KE_v-I)经验公式, 总结出适用于雨、雪、雹的动能计算关系模型, 并对各相态降水动能进行偏差分析和校正。结果表明: (1) 降雨动能计算适用 KE_v-I 指数型关系公式, 降雪和降雹动能计算适用幂函数型关系公式; (2) 降水动能偏差与总降水中非液态占比呈正相关, 仅以降雨 KE_v-I 经验公式估算所有相态降水的动能会显著高估降雪动能和低估降雹动能, 对降水整体估算偏差在 -0.05 到 0.31 之间; (3) 通过建立各相态的 KE_v-I 计算模型, 降水整体估算误差得到有效降低, 降雪偏差从 7.08 降至 -0.05 , 降雹偏差从 -0.29 降至 0.03 。本文所提出的方法能够有效提高降水动能估算的准确度, 为区域土壤水力侵蚀计算提供更好的支撑。

关键词: 降水动能; 雨滴谱; $KE-I$; 降水强度; 相态分类; 偏差计算

中图分类号: P412.13

文献标志码: A

降水动能描述水凝物从空中坠落到地表的动能大小, 是决定降水在土-气(水凝物撞击土壤的侵蚀过程)、水-气(水凝物撞击水体的碳氧扩散过程)、物-气(水凝物撞击植物叶面的集聚过程)等不同陆-气交换界面上作用效果的重要参数。研究表明^[1], 随着全球气候变暖, 世界各地的冬季降水形式发生改变, 全球降雨能量增加。构建考虑水凝物相态的降水动能计算模型, 对提升降水动能计算精度具有实际意义。

中国大部分地区降水形式以降雨为主, 其他相态降水事件可忽略不计, 然而, 在特定地区或极端气候条件下, 传统方法导致降水动能计算结果偏差大。

传统方法直接将降水强度(Intensity, I)代入降雨动能-降雨强度(Energy per unit volume of precipitation-Rainfall intensity, KE_v-R)(即 KE_v-I_{rain})经验关系, 并不区分降水相态, 统一用降雨模型计算完整的降水过程。由于雪、雹粒子的直径和下降速度与雨滴差异大, 各相态降水强度及降水结构区域间差异较大^[2,3], 降水强度与降水能量具有显著差异, 在降雪为主的高纬地区, 或降雹事件多发的高原地区, 降水动能直接影响对地表形态的塑造^[4]。因此, 在估算总降水动能时, 应将雪、雹等水凝物类型考虑在内, 提升降水能量计算精度^[5]。

前人关于降水动能的研究多侧重于以降雨强度

收稿日期(Received date): 2023-04-08; 改回日期(Accepted date): 2023-10-13

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(42371409, 41871299)。[National Natural Science Foundation of China (42371409, 41871299)]

作者简介(Biography): 孙晨玥(2001-), 女, 天津人, 本科生, 主要研究方向: 降水观测与模拟。[SUN Chenyue (2001-), female, born in Tianjin, B.S. candidate, research on precipitation observation and simulation] E-mail: 10200123@njnu.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 戴强(1987-), 男, 江苏扬中人, 博士, 教授, 主要研究方向: 水文遥感与地理建模。[DAI Qiang (1987-), male, born in Yangzhong, Jiangsu province, Ph.D., professor, research on hydrological remote sensing and geographic modeling] E-mail: q.dai@njnu.edu.cn

为基础的计算^[6]。根据不同环境特征, KE_v-R 经验公式可采用对数型关系、线性关系、幂函数型关系等多种形式,以及近年来较多采用的指数型关系式^[5,7-8]。 $KE-I$ 关系中,线性与幂函数型关系拟合效果最佳^[4,9],指数型模型相较对数型会产生更小的样本均值标准误,能够更好地描述 $KE-I$ 关系。尽管降雨 $KE-I$ 模型部分考虑到了植被冠层、地形、持续时间等因素,但仅给出降雨动能与降雨强度的拟合关系,并未关注于降水的相态变化特性^[10-12];同时,降雨 $KE-I$ 关系严重低估高强度降水强度的动能值^[13]。为了能更准确估算降水动能,需进一步研究不同时空尺度上的高强度及低强度降水事件,建立多相态降水 $KE-I$ 关系模型。

本研究选择合适的水凝物类型,分别构建降雨、降雪和降雹的 KE_v-I 关系模型,探讨原有基于降雨强度的降水动能计算的偏差问题,提出适用于各相态的降水动能计算公式,对比各地降水事件中的能量特征并进行偏差校正,以提高地面降水特征认知,为更加科学有效地应对极端降水事件奠定基础。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

中国受纬度、地形、海陆分布等因素影响,各区域降水量分布不均,具有明显的时空分布差异^[14]。全国大部分区域降水以降雨为主,整体呈现自东南沿海向西北内陆逐渐减少的特点。降雪多分布东北和西北北部地区,而东南部地区降雪较少,降雪强度在黄淮、江淮一带最大,东北和西北北部呈减弱趋势。降雹事件在高原地区频发,且由于降雹具有较强的区域特性,不同区域的年际变化均较大。

1.2 数据来源

本研究使用的中国区域内 25 部 OTT Parsivel2 激光雨滴谱仪,雨滴谱仪空间位置分布如图 1 所示,数据来源于中国气象局。该激光雨滴谱仪可以直接获得各站点每分钟 22 个直径档位(0.125 ~ 8 mm)和 20 个速度档位(0 ~ 10 m · s⁻¹)中通过雨滴的数量^[15],实现天气现象的自动监测功能,并能计算输出降水的类型、数量、强度、动能、能见度以及等效雷达反射率等参数。本研究使用 2018 年雨滴谱仪逐

分钟降水观测资料,降水样本共计 728 302 条,各站点雨滴谱仪基本信息如表 1 所示。

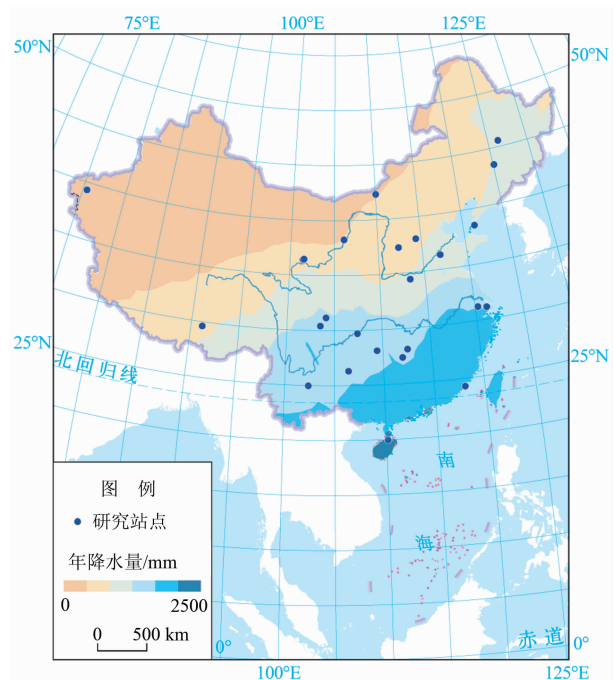


图 1 雨滴谱仪站点位置分布图

Fig. 1 Location of raindrop spectrometer stations in China

(审图号:GS(2022)4318 号)

2 研究方法

2.1 $V-D$ 经验公式与相态分类

在没有垂直空气运动的情况下,不同类型水凝物粒子直径 D 与平均下落终速度 V 之间的关系存在着较大差异。本文基于不同水凝物 $V-D$ 经验关系,同时结合粒子粒径范围,对雨、雪、雹粒子进行分类。降雨粒子直径范围为 0.06 ~ 5 mm,降雪范围为 0.19 ~ 8 mm,降雹范围为 5 ~ 24.5 mm。此外,若仅对 $V-D$ 经验公式 $\pm 60\%$ 阈值以外的数据进行剔除^[16],会出现划分不清晰、相态重叠的情况。因而,本研究使用掩膜的方式^[17],在粒子规定直径内对水凝物进行分类。采用 Atlas^[18]等的降雨、降雪 $V-D$ 经验公式得到降雨粒子和降雪粒子平均终速度($V(D)_{\text{rain}}$ 、 $V(D)_{\text{snow}}$)表达式。以 5 mm 为分界采用 Friedrich^[19]等的降雹 $V-D$ 经验公式得到降雹粒子平均终速度($V(D)_{\text{hail}(D>5)}$ 、 $V(D)_{\text{hail}(D<5)}$)表达式为:

$$V(D)_{\text{rain}} = [9.65 - 10.3 \exp(-0.6D)] \quad (1)$$

表 1 雨滴谱仪数据基本信息
Tab. 1 Basic information of raindrop spectrometer data

站点号	所属地区	站点名称	起始日期	结束日期	纬度/(°)	经度/(°)	有效样本个数
50953	黑龙江	哈尔滨	2018-01-11	2018-12-31	45.93	126.57	34 384
51709	新疆	喀什	2018-01-01	2018-12-31	39.49	75.75	7 547
52863	青海	互助	2018-01-02	2018-12-31	36.82	101.95	35 762
52866	青海	西宁	2018-01-10	2018-12-31	36.73	101.75	30 834
53149	内蒙古	满都拉	2018-01-01	2018-12-31	42.53	110.13	11 731
53614	宁夏	银川	2018-01-12	2018-12-31	38.47	106.20	15 263
53698	河北	石家庄	2018-01-16	2018-12-31	38.07	114.35	12 942
53772	山西	太原	2018-01-11	2018-12-31	37.62	112.58	26 140
54161	吉林	长春	2018-01-08	2018-12-31	43.90	125.22	20 351
54662	辽宁	大连	2018-01-11	2018-12-31	38.91	121.64	17 994
54823	山东	济南	2018-01-11	2018-12-31	36.60	117.01	19 454
55591	西藏	拉萨	2018-01-01	2018-12-31	29.67	91.13	28 067
56186	四川	绵竹	2018-01-11	2018-12-31	31.33	104.20	43 883
56187	四川	温江	2018-01-11	2018-12-31	30.75	103.86	52 148
56778	云南	昆明	2018-01-11	2018-12-31	25.00	102.65	28 037
57083	河南	郑州	2018-01-11	2018-12-31	34.70	113.67	23 450
57522	重庆	涪陵	2018-01-01	2018-12-31	29.74	107.27	41 996
57649	湖南	吉首	2018-01-11	2018-12-31	28.24	109.68	49 794
57687	湖南	长沙	2018-01-11	2018-12-31	28.11	112.79	41 009
57763	湖南	娄底	2018-01-11	2018-12-31	27.69	112.00	39 004
57816	贵州	贵阳	2018-01-11	2018-12-31	26.58	106.73	39 383
58349	江苏	苏州	2018-01-01	2018-12-31	31.41	120.56	41 484
58367	上海	徐家汇	2018-02-02	2018-12-20	31.20	121.43	13 842
59134	福建	厦门	2018-01-11	2018-12-31	24.48	118.07	21 344
59758	海南	海口	2018-01-01	2018-12-31	20.00	110.25	32 459

$$V(D)_{\text{snow}} = 2.07 \times (\frac{D}{10})^{0.31} \tag{2}$$

$$V(D)_{\text{hail}(D>5)} = 10.58 \times (\frac{D}{10})^{0.267} \tag{3}$$

$$V(D)_{\text{hail}(D<5)} = 1.3 \times D^{0.66} \tag{4}$$

2.2 各相态降水能量计算

根据雨滴谱仪各直径档和速度档观测数据,将各直径档水凝物数量进行累加,第 i 直径档、第 j 速度档的水凝物浓度 $N(D_i)$ 的计算公式为:

$$N(D_i) = \sum_{j=1}^{n_c} \frac{n_{ij}}{A_i \Delta t V_j \Delta D_i} \tag{5}$$

式中, D_i 为第 i 直径等级的中值; n_c 为总分档数; n_{ij} 为第 i 直径档和第 j 速度档处的水凝物数量; A_i 为第 i 直径档的有效采样面积, LPM 雨滴谱仪有效采样面积为 45.6 cm^2 ; Δt 为雨滴仪采样时间间隔; V_j 是第 j 速度档的下落速度。

根据单位体积单位粒径范围内的水凝物数量 $N(D_i)$, 可进一步计算出降雨强度 I_{rain} 、降雪强度 $I_{\text{snow}}^{[20]}$ 、降雹强度 $I_{\text{hail}}^{[21]}$, 计算公式为:

$$I_{\text{rain}} = 6\pi \times 10^{-4} \sum_{i=1}^{n_c} D_i^3 V_i N(D_i) \Delta D_i \tag{6}$$

$$I_{\text{snow}} = \frac{\rho_s \pi}{6} \times \frac{36}{10^4} \sum_{i=1}^{n_c} D_i^3 V_i N(D_i) \Delta D_i \quad (7)$$

$$I_{\text{hail}} = \frac{\rho_h \pi}{6} \times \frac{36}{10^7} \sum_{i=1}^{n_c} D_i^3 V_i N(D_i) \Delta D_i \quad (8)$$

$$\text{其中, } \rho_s = 0.178 D_0^{-0.922} \quad (9)$$

式中, ρ_s 为平均雪密度; ρ_h 为冰雹的体积密度, 为 $910 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; D_0 为中位数体积直径参数。

降水动能 e 是评价水凝物在降水过程中分离土壤颗粒能力的重要参数之一^[22], 降水动能与降水粒子的质量 m 和降水末速度 v 有关, 计算公式为:

$$e = \frac{1}{2} m v^2 \quad (10)$$

当假设粒子为均匀球体时, 降水动能计算公式为:

$$e_i = \frac{1}{12} 10^{-6} \pi \rho V_i^2 D_i^3 \quad (11)$$

式中, e_i 为第 i 档直径对应的粒子动能; ρ 为水凝物的密度, 降雨密度为 $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 降雪密度为 $0.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 降雹密度为 $0.82 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; V_i 为不同相态粒子的降水末速度。

雨滴谱仪单位时间降水总动能 E 的计算公式为:

$$E = \sum_{i=0}^{n_i} N_i e_i = \frac{\rho \pi}{12} \frac{10^4}{10^6} \frac{1}{A} \sum_{i=0}^{n_i} N_i D_i^3 V_i^2 \quad (12)$$

式中, A 指雨滴谱仪传感器的采样面积; N_i 是第 i 档直径的粒子数目; n_i 是直径档数目。

单位降雨深度的降水动能 KE_v 计算公式为:

$$KE_v = \frac{e_{\text{sum}}}{AP_t} = \frac{1}{AP_t} \sum_{i=1}^{n_i} N_i e_i \quad (13)$$

式中, e_{sum} 为不同采样直径雨滴所产生的降水动能总和; P_t 为第 t 分钟降水深度。

2.3 动能拟合与偏差计算

现有研究多针对单一相态水凝物展开, 计算降雨动能时, 往往会剔除其他相态只拟合降雨的 KE_v-I_{rain} 经验关系。然而, 相同降水强度下不同相态水凝物动能差异较大, 在计算所有相态降水动能时均使用 KE_v-I_{rain} 公式会存在较大误差。目前对已知降水事件中的动能计算大都依赖 KE_v-I 关系, 此关系具有区域特性, 不同地域环境和气候条件有不同的雨滴谱特征。

本实验采用 2018 年全国 25 个站点的逐分钟降水数据进行各相态 KE_v-I 公式拟合, 单位体积降雨

动能 $KE_{V(\text{rain})}$ 基于指数函数^[7, 23-25] 拟合, 降雪 $KE_{V(\text{snow})}$ 及降雹的单位体积动能 $KE_{V(\text{hail})}$ 基于幂函数拟合, 表达式为:

$$KE_{V(\text{rain})} = a(1 - be^{-cl_{\text{rain}}}) \quad (14)$$

$$KE_{V(\text{snow})} = a \times I^b \quad (15)$$

$$KE_{V(\text{hail})} = a \times I^b \quad (16)$$

式中, a 、 b 、 c 为拟合常数。

降水动能预测值 RKE 的计算公式为:

$$RKE = \frac{KE_v \times I}{60} \quad (17)$$

为定量计算降水动能计算的偏差, 本文使用相对误差 (Relative Error, RE)、平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE) 和均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 评估降水能量偏差。将各相态水凝物代入 KE_v-I_{rain} 经验公式得到的预测值, 与雨滴谱仪观测所得的实际动能进行比较, 采用的误差计算表达式分别为:

$$RE = \frac{h(x_i) - y_i}{y_i} \quad (18)$$

$$MAE(X, h) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |h(x_i) - y_i| \quad (19)$$

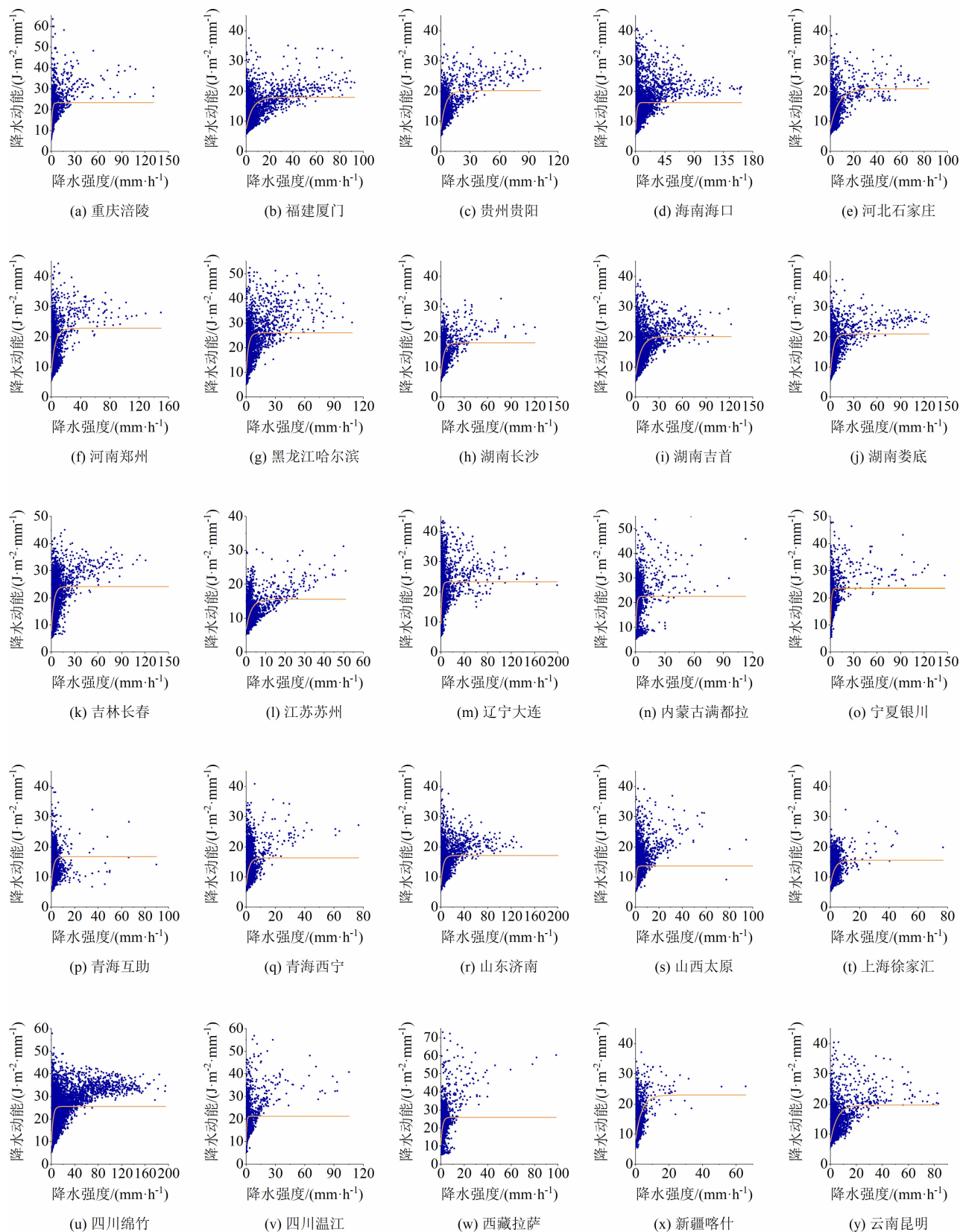
$$RMSE(X, h) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (h(x_i) - y_i)^2} \quad (20)$$

式中, $h(x_i)$ 为预测值; y_i 为实际值; m 为数据个数。这三个指标通常被用来测量模拟值与观测值之间的差异, 当结果越接近 0 时, 误差越小。MAE 能够更好地描述时间序列分析中预测值偏差^[26], RMSE 用于说明观测值的离散程度。

3 实验结果与分析

3.1 传统降水动能计算

为计算传统降水动能, 本文基于降雨 KE_v-I_{rain} 经验公式, 对 25 个站点降水事件进行关系公式拟合。降水强度与单位体积降水动能整体趋势一致, 均呈指数型分布 (图 2)。根据上述拟合的降雨公式计算得到的预测动能与实际动能相比 (图 3), 降水总动能预测值与真实值差距较大, 全国 25 个站点未区分降水相态的传统降水总动能为 $3.14 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$, 与实际降水动能相差 $1.38 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ 。单一的 KE_v-I_{rain} 关系不完全适用于多相态的降水动能计算,



纵坐标中降水动能为单位体积降水动能;蓝色点表示降雨,橙色线为拟合公式(见表2)。

图2 KE_v-I_{rain} 关系拟合结果

Fig. 2 Results of the KE_v-I_{rain} fitting

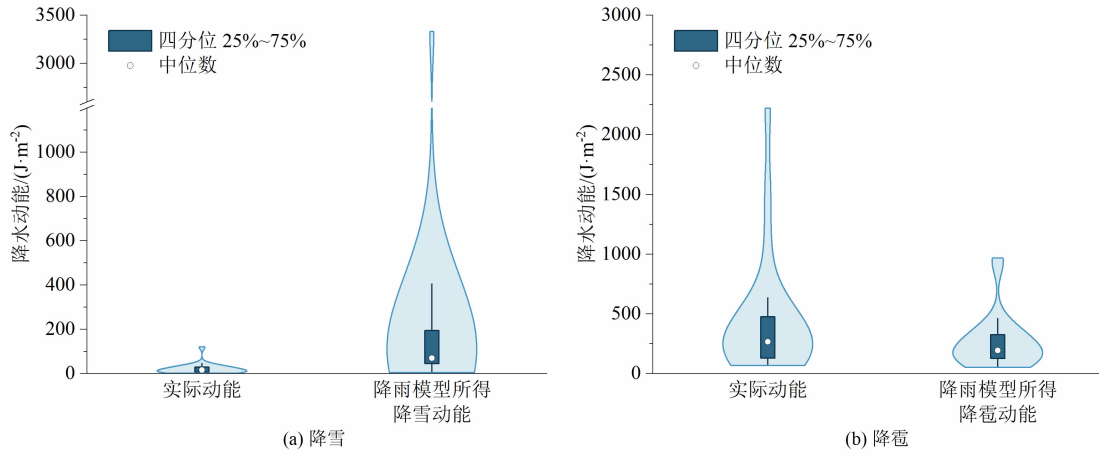


图3 实际动能值与动能预测值比较

Fig. 3 Comparison of actual kinetic energy values with kinetic energy predictions

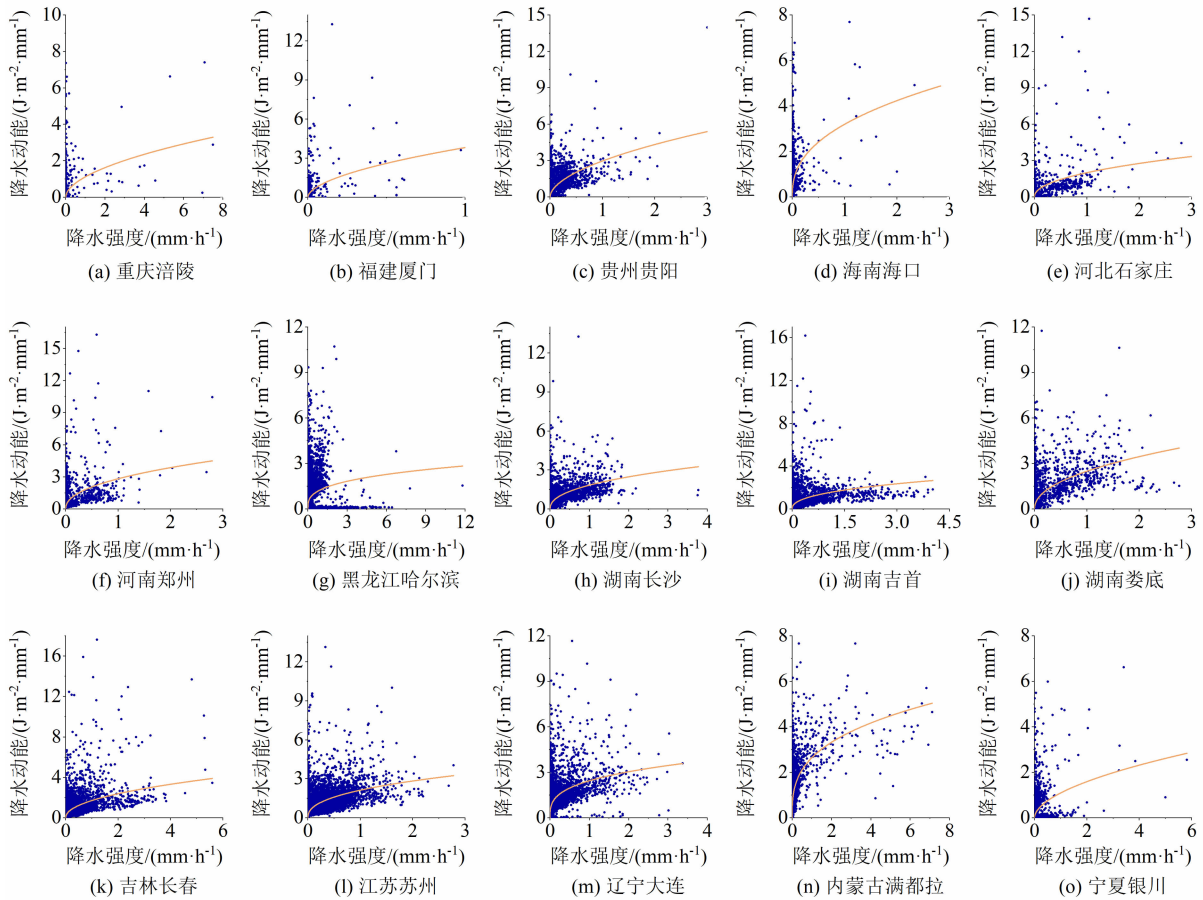
需各相态拟合相应 KE_v-I 经验公式,以提高降水动能的估算准确度。

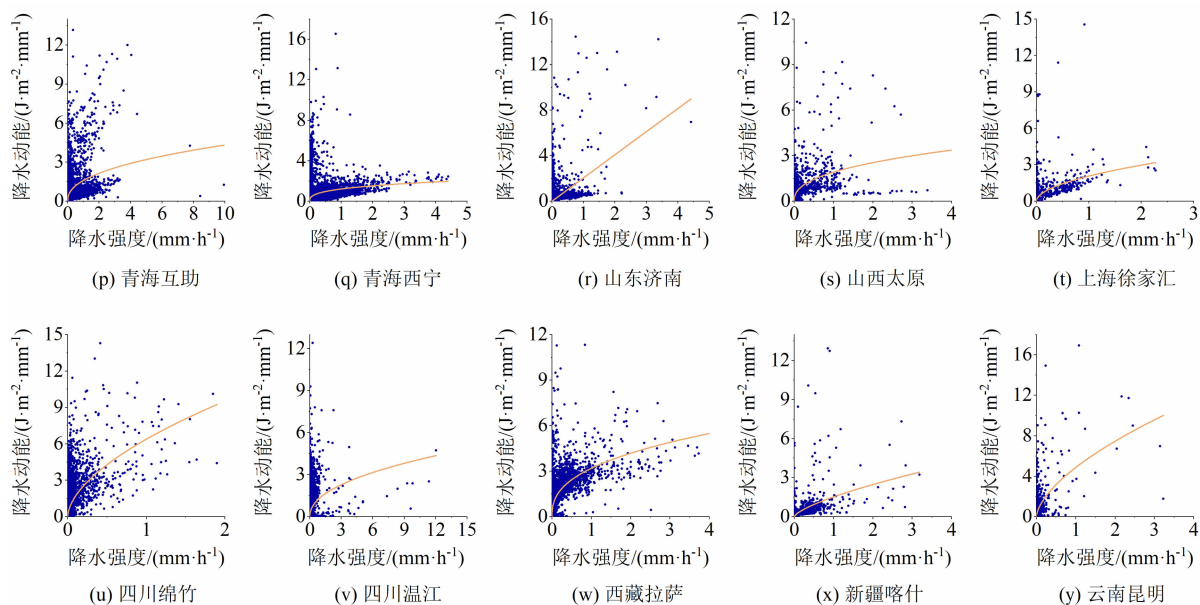
3.2 各相态 KE_v-I 经验公式

图2、4、5分别为雨滴仪实测的降雨、降雪、降雹单位降水动能 KE_v 和降水强度 I 关系的分布图以及拟合推导的 KE_v-I 经验公式。结果表明, KE_v 与降

水强度呈正相关,降雨、降雪、降雹的平均拟合系数分别为0.51、0.41、0.76,拟合结果较好。25个站点各相态 KE_v-I 拟合公式结果显示,不同地区之间存在较大差异(表2)。

根据中国行政区划及地理区划将25个站点分为七大地区,分别为东北地区(黑龙江哈尔滨,吉林

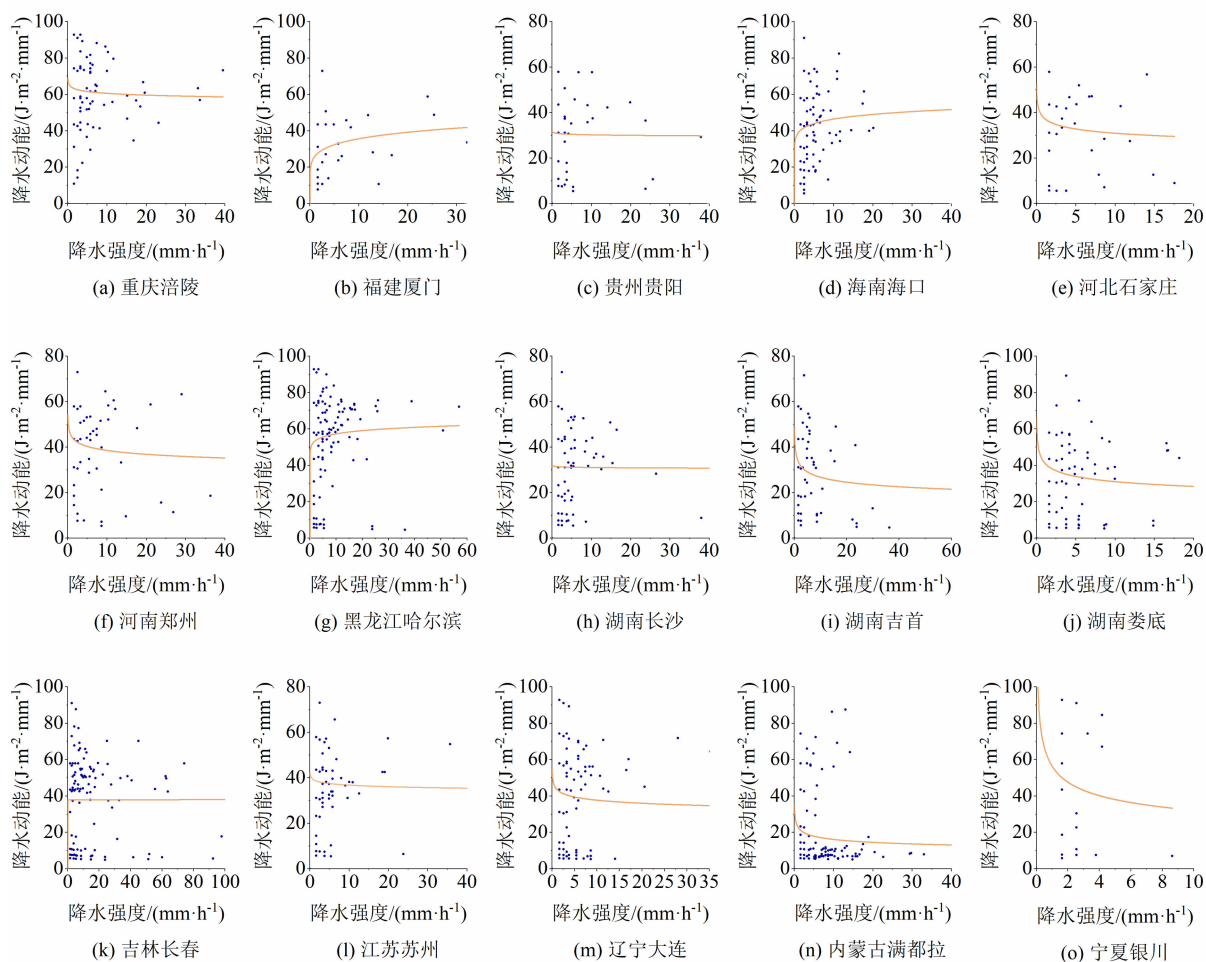


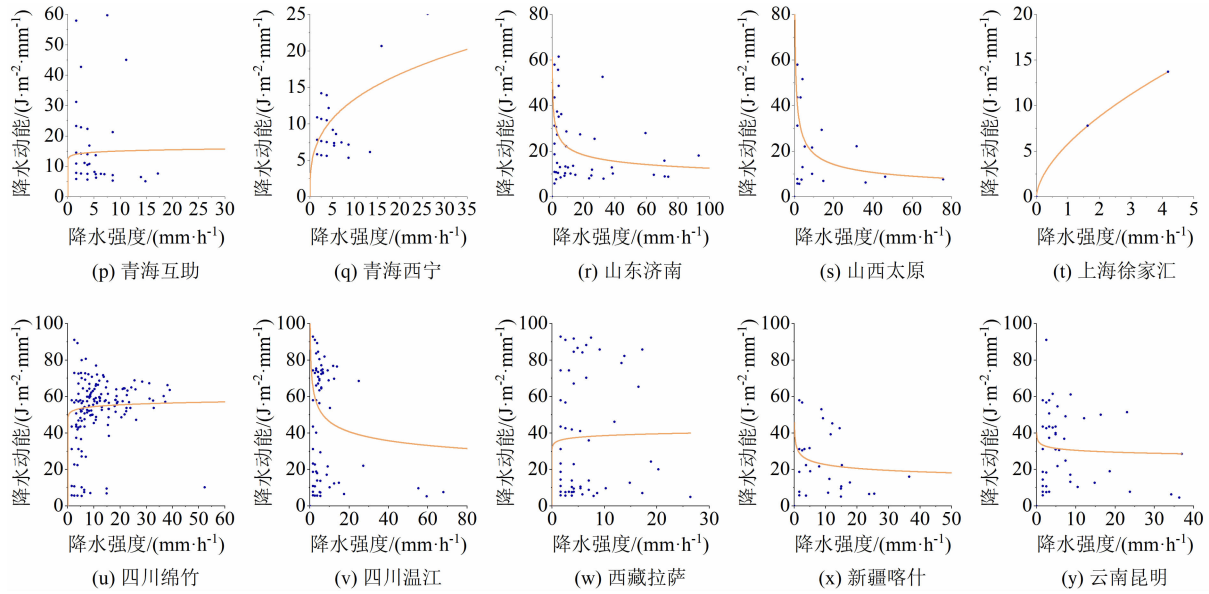


纵坐标中降水动能为单位体积降水动能;蓝色点表示降雪,橙色线为拟合公式(见表2)。

图4 KE_V-I_{snow} 关系拟合结果

Fig. 4 Results of the KE_V-I_{snow} fitting





纵坐标中降水动能为单位体积降水动能;蓝色点表示降水,橙色线为拟合公式(见表2)。

图5 KE_V-I_{hail} 关系拟合结果

Fig. 5 Results of the KE_V-I_{hail} fitting

表2 全国 25 个站点各相态 KE_V-I 拟合公式

Tab. 2 Fitting formulas for KE_V-I in various phases at 25 stations in China

站点名称	KE_V-I_{rain} 拟合公式	KE_V-I_{snow} 拟合公式	KE_V-I_{hail} 拟合公式
重庆涪陵	$KE_V = 23.33 \times (1 - 0.63 \times \exp(-0.91 \times I))$	$KE_V = 1.12 \times I^{0.53}$	$KE_V = 63.99 \times I^{-0.02}$
福建厦门	$KE_V = 17.93 \times (1 - 0.58 \times \exp(-0.19 \times I))$	$KE_V = 3.82 \times I^{0.55}$	$KE_V = 25.96 \times I^{0.14}$
贵州贵阳	$KE_V = 20.15 \times (1 - 0.64 \times \exp(-0.21 \times I))$	$KE_V = 2.97 \times I^{0.54}$	$KE_V = 30.93 \times I^{-0.01}$
海南海口	$KE_V = 16.19 \times (1 - 0.55 \times \exp(-0.60 \times I))$	$KE_V = 3.20 \times I^{0.41}$	$KE_V = 38.90 \times I^{0.08}$
河北石家庄	$KE_V = 20.78 \times (1 - 0.63 \times \exp(-0.14 \times I))$	$KE_V = 2.00 \times I^{0.46}$	$KE_V = 37.54 \times I^{-0.08}$
河南郑州	$KE_V = 22.78 \times (1 - 0.64 \times \exp(-0.20 \times I))$	$KE_V = 2.83 \times I^{0.45}$	$KE_V = 44.76 \times I^{-0.07}$
黑龙江哈尔滨	$KE_V = 26.05 \times (1 - 0.64 \times \exp(-0.43 \times I))$	$KE_V = 1.29 \times I^{0.32}$	$KE_V = 51.86 \times I^{0.04}$
湖南长沙	$KE_V = 17.97 \times (1 - 0.61 \times \exp(-0.28 \times I))$	$KE_V = 1.84 \times I^{0.43}$	$KE_V = 31.44 \times I^{-0.01}$
湖南吉首	$KE_V = 20.08 \times (1 - 0.63 \times \exp(-0.14 \times I))$	$KE_V = 1.50 \times I^{0.41}$	$KE_V = 35.53 \times I^{-0.12}$
湖南娄底	$KE_V = 20.89 \times (1 - 0.65 \times \exp(-0.27 \times I))$	$KE_V = 2.50 \times I^{0.47}$	$KE_V = 41.61 \times I^{-0.13}$
吉林长春	$KE_V = 24.15 \times (1 - 0.67 \times \exp(-0.31 \times I))$	$KE_V = 1.72 \times I^{0.47}$	$KE_V = 37.82 \times I^{7.69 \times 10^{-4}}$
江苏苏州	$KE_V = 15.54 \times (1 - 0.57 \times \exp(-0.39 \times I))$	$KE_V = 2.13 \times I^{0.41}$	$KE_V = 39.12 \times I^{-0.03}$
辽宁大连	$KE_V = 23.30 \times (1 - 0.60 \times \exp(-0.57 \times I))$	$KE_V = 2.45 \times I^{0.31}$	$KE_V = 43.88 \times I^{-0.07}$
内蒙古满都拉	$KE_V = 22.58 \times (1 - 0.58 \times \exp(-0.99 \times I))$	$KE_V = 2.65 \times I^{0.33}$	$KE_V = 22.85 \times I^{-0.15}$
宁夏银川	$KE_V = 23.52 \times (1 - 0.59 \times \exp(-0.83 \times I))$	$KE_V = 1.10 \times I^{0.54}$	$KE_V = 56.40 \times I^{-0.24}$
青海互助	$KE_V = 16.71 \times (1 - 0.57 \times \exp(-0.57 \times I))$	$KE_V = 1.60 \times I^{0.43}$	$KE_V = 13.71 \times I^{0.04}$
青海西宁	$KE_V = 22.32 \times (1 - 0.55 \times \exp(-0.50 \times I))$	$KE_V = 1.21 \times I^{0.33}$	$KE_V = 6.27 \times I^{0.33}$
山东济南	$KE_V = 17.10 \times (1 - 0.57 \times \exp(-0.26 \times I))$	$KE_V = 2.05 \times I^{0.99}$	$KE_V = 37.50 \times I^{-0.24}$
山西太原	$KE_V = 13.60 \times (1 - 0.53 \times \exp(-1.50 \times I))$	$KE_V = 1.92 \times I^{0.41}$	$KE_V = 49.38 \times I^{-0.42}$
上海徐家汇	$KE_V = 15.51 \times (1 - 0.53 \times \exp(-0.36 \times I))$	$KE_V = 2.07 \times I^{0.52}$	$KE_V = 5.80 \times I^{0.60}$
四川绵竹	$KE_V = 25.56 \times (1 - 0.67 \times \exp(-0.38 \times I))$	$KE_V = 6.39 \times I^{0.58}$	$KE_V = 39.12 \times I^{-0.03}$
四川温江	$KE_V = 21.23 \times (1 - 0.60 \times \exp(-1.76 \times I))$	$KE_V = 1.38 \times I^{0.46}$	$KE_V = 71.06 \times I^{-0.19}$
西藏拉萨	$KE_V = 25.92 \times (1 - 0.59 \times \exp(-0.76 \times I))$	$KE_V = 3.20 \times I^{0.39}$	$KE_V = 35.49 \times I^{0.04}$
新疆喀什	$KE_V = 22.95 \times (1 - 0.63 \times \exp(-0.27 \times I))$	$KE_V = 1.53 \times I^{0.69}$	$KE_V = 31.13 \times I^{-0.14}$
云南昆明	$KE_V = 19.63 \times (1 - 0.62 \times \exp(-0.20 \times I))$	$KE_V = 4.88 \times I^{0.61}$	$KE_V = 34.18 \times I^{-0.05}$

长春,辽宁大连)、华北地区(河北石家庄,内蒙古满都拉,山西太原)、华东地区(福建厦门,江苏苏州,上海徐家汇,山东济南)、华中地区(河南郑州,湖南娄底,湖南长沙,湖南吉首)、华南地区(海南海口)、西南地区(重庆涪陵,贵州贵阳,四川温江,四川绵竹,西藏拉萨,云南昆明)和西北地区(青海西宁,青海互助,新疆喀什,宁夏银川)。对七大地区进行雨、雪、雹的 KE_v-I 关系公式拟合得到表3,结果表明降雨、降雪、降雹的平均拟合系数分别为 0.37、0.42、0.72,与 25 个站点拟合结果(表 2)相比降雨拟合公式对地区的适用能力下降,降雪和降雹适用能力仍较强,拟合结果较好。

3.3 降水动能偏差校正

不同类型水凝物因粒子直径、下落速率等因素导致对地侵蚀能力差异大,产生的降水能量区别明显。本文利用多相态 KE_v-I 关系公式(表 2)对降水能量的重新计算,即为动能的偏差校正过程。图 6

为雨滴谱仪得到的降水实际动能、基于雪和雹模型得到的预测值、传统降雨模型计算的雪和雹动能预测值对比。结果表明,不考虑相态差异计算的相对误差明显大于用各相态拟合 KE_v-I 公式算得的校正动能相对误差,说明本研究拟合的幂函数型经验公式(表 2)能够有效降低降水动能偏差,更好地表示不同相态下 KE_v-I 关系。

表 4 为使用公式(18)~(20)计算所得的各相态降水偏差,从校正前后的相对误差可以看出降雪相对误差均为正偏差且数值较大,由于雪粒子质量轻、下落速度慢,通过 KE_v-I_{rain} 和降雪强度算得的动能结果大于实际情况,相对误差在 0.15 和 10 之间;降雹结果存在正偏差和负偏差,雹粒子普遍粒径大且粒径范围广,同体积水凝物中降雹粒子强度大,相对误差在 -0.76 和 0.07 之间。校正后的 RE 得到有效降低,降雪相对误差从 7.08 降低至 -0.05,降雹相对误差从 -0.29 降低至 0.03,表明降雨动能

表 3 全国七大地区各相态 KE_v-I 拟合公式
Tab. 3 Fitting equations of KE_v-I in different phases in seven regions of China

地区名称	KE_v-I_{rain}		KE_v-I_{snow}		KE_v-I_{hail}	
	拟合公式	R^2	拟合公式	R^2	拟合公式	R^2
东北地区	$KE_v = 24.50 \times (1 - 0.63 \times \exp(-0.39 \times I))$	0.51	$KE_v = 1.68 \times I^{0.34}$	0.40	$KE_v = 32.58 \times I^{-0.25}$	0.75
华北地区	$KE_v = 15.61 \times (1 - 0.54 \times \exp(-1.04 \times I))$	0.37	$KE_v = 2.31 \times I^{0.38}$	0.57	$KE_v = 45.33 \times I^{-0.01}$	0.57
华东地区	$KE_v = 16.91 \times (1 - 0.57 \times \exp(-0.27 \times I))$	0.50	$KE_v = 2.10 \times I^{0.45}$	0.45	$KE_v = 38.18 \times I^{-0.11}$	0.78
华中地区	$KE_v = 20.34 \times (1 - 0.63 \times \exp(-0.19 \times I))$	0.47	$KE_v = 1.92 \times I^{0.43}$	0.44	$KE_v = 37.99 \times I^{-0.07}$	0.78
华南地区	$KE_v = 16.19 \times (1 - 0.55 \times \exp(-0.60 \times I))$	0.41	$KE_v = 3.20 \times I^{0.41}$	0.42	$KE_v = 38.90 \times I^{0.08}$	0.88
西南地区	$KE_v = 23.72 \times (1 - 0.61 \times \exp(-0.42 \times I))$	0.46	$KE_v = 2.80 \times I^{0.49}$	0.41	$KE_v = 52.68 \times I^{-0.03}$	0.82
西北地区	$KE_v = 18.32 \times (1 - 0.57 \times \exp(-0.47 \times I))$	0.39	$KE_v = 1.36 \times I^{0.41}$	0.26	$KE_v = 23.49 \times I^{-0.13}$	0.47

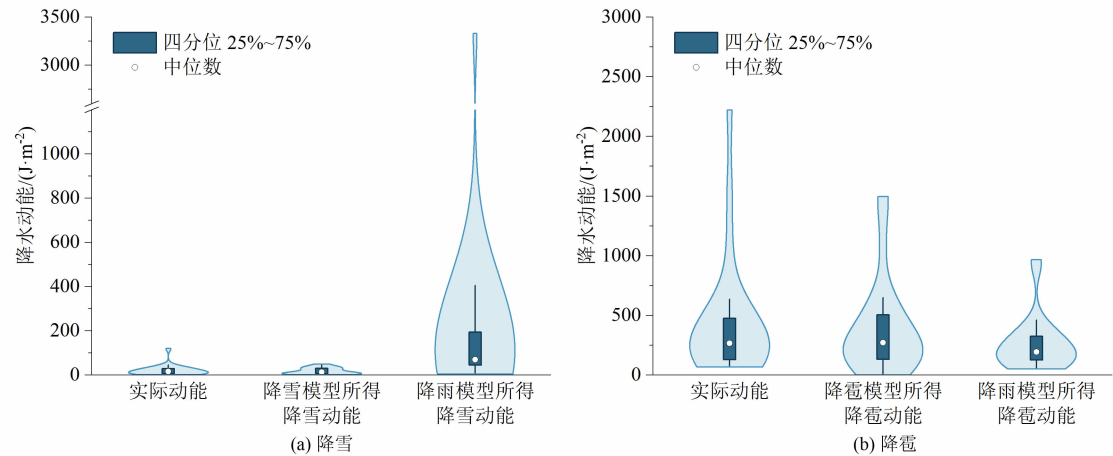


图 6 实际动能、降雪模型动能与降雨模型动能预测值比较

Fig. 6 Comparison of actual kinetic energy, snowfall modeled kinetic energy and rainfall modeled kinetic energy predictions

KE_v-I_{rain} 经验公式(式(1))并不准确适用于降雪和降雹事件。此外,降雪 MAE 、 $RMSE$ 分别为 0.004、0.03,降雹 MAE 、 $RMSE$ 分别为 0.01、0.26,说明降雹对降水动能的影响大于降雪,雹粒子误差值整体大于雪粒子。

4 讨论

针对目前降水动能计算过程中存在考虑要素单一且经验关系固定的问题,本文提出了一种基于多相态 $KE-I$ 关系的降水动能计算方法。此方法在区分雨、雪、雹粒子的情况下,能够有效降低多相态水

凝物动能估算误差。目前在没有雨滴谱仪装置的情况下,通常使用经验公式估算降水动能^[7]。本研究根据实验总结,采用指数型和幂函数型公式对中国 25 个站点进行经验关系拟合。结果表明,不同类型水凝物 KE_v-I 关系差异性较大,降水强度从雹粒子到雨粒子到雪粒子逐步减弱,使用单一相态的 KE_v-I 关系不能准确表达降水动能。此外,地理位置和环境条件是关系公式的重要影响因素,相似性越高, KE_v-I 关系就越为接近。

结合各站点所在的地理条件,前文提及的正负偏差与地理环境具有一定的相关性。对于降雪事件而言,各地偏差数值差异较大。降雹事件中,动能被

表 4 全国 25 个站点雪、雹相态 2018 年降水能量 RE 、 MAE 和 $RMSE$
Tab. 4 RE , MAE and $RMSE$ of precipitation kinetic energy for snow and hail phases at 25 stations of China in 2018

站点名称	原 $RE/\%$			校正后 $RE/\%$		MAE		$RMSE$	
	降雪	降雹	总和	降雪	降雹	降雪	降雹	降雪	降雹
重庆涪陵	1079.13	-48.85	-1.92	-1.99	-0.68	0.0008	0.0287	0.0091	0.2968
福建厦门	568.74	-56.28	-0.69	7.77	0.21	0.0002	0.0024	0.0036	0.1708
贵州贵阳	360.89	-63.33	-0.55	0.55	1.28	0.0009	0.0077	0.0028	0.1171
海南海口	227.62	-45.83	-0.95	-42.67	2.40	0.0002	0.0053	0.0100	0.2137
河北石家庄	424.20	-49.91	-0.60	-1.05	2.75	0.0020	0.0150	0.0050	0.1254
河南郑州	373.81	-65.93	-4.77	1.26	4.40	0.0010	0.0099	0.0105	0.2533
黑龙江哈尔滨	1442.61	-57.01	-1.54	24.86	0.92	0.0123	0.0913	0.0204	0.4913
湖南长沙	522.86	-39.22	-0.04	7.58	18.52	0.0023	0.0214	0.0041	0.1447
湖南吉首	593.35	-45.19	-0.29	12.39	9.85	0.0025	0.0238	0.0024	0.0982
湖南娄底	386.27	-47.48	-0.38	4.32	1.26	0.0018	0.0168	0.0054	0.1306
吉林长春	616.20	-40.35	-2.60	-2.54	-3.09	0.0141	0.0655	0.0488	1.2261
江苏苏州	399.08	-46.16	-0.34	-1.04	27.34	0.0037	0.0191	0.0053	0.2051
辽宁大连	569.26	-47.94	-0.58	1.31	-6.11	0.0096	0.0477	0.0182	0.3360
内蒙古满都拉	527.52	40.97	5.92	6.14	2.46	0.0126	0.1040	0.0235	0.3285
宁夏银川	1778.19	27.27	2.56	-0.34	-9.29	0.0043	0.0374	0.0064	0.5163
青海互助	2672.75	33.91	31.40	-58.95	25.66	0.0075	0.0430	0.0026	0.1212
青海西宁	1203.94	30.05	24.95	2.50	-6.89	0.0121	0.0628	0.0013	0.0640
山东济南	455.67	3.45	0.56	0.00	-8.73	0.0023	0.0152	0.0072	0.2281
山西太原	549.23	-15.94	0.60	3.71	-0.55	0.0018	0.0191	0.0020	0.0795
上海徐家汇	153.34	132.51	8.92	-81.81	0.00	0.0013	0.0112	0.0000	0.0007
四川绵竹	261.36	-56.45	-2.00	4.39	-32.83	0.0007	0.0068	0.0303	0.5369
四川温江	1012.29	-47.25	-0.43	0.66	16.02	0.0030	0.0596	0.0078	0.2147
西藏拉萨	526.30	-33.23	1.50	3.81	1.37	0.0061	0.0474	0.0072	0.2165
新疆喀什	799.11	11.38	4.40	-7.03	7.79	0.0058	0.0312	0.0093	0.1958
云南昆明	204.25	-22.26	-0.33	2.96	10.73	0.0004	0.0053	0.0045	0.1488
平均值	708.32	-29.49	2.18	-4.53	2.59	0.0044	0.0319	0.0099	0.2584

较大高估的站点包括宁夏银川、内蒙古满都拉、青海西宁、青海互助和新疆喀什。银川位于宁夏平原中部,属于中温带大陆性气候,而宁夏地势南高北低,热力性质差异大,受太阳辐射不同导致增温不同,产生对流而引起冰雹天气的形成与发展^[27];内蒙古自治区是华北地区最大的降雹中心^[28],而包头作为人口密集的工业城市,人类活动密集,对气候干扰较强,属于包头的满都拉为温带大陆性季风气候,位于多雹带区域内,因而冰雹多发^[29];青海西宁与海东的互助均位于青海的东部农业区内,为高原大陆性气候,该区域内单次冰雹直径很大、持续时间较长,且能量较大^[30];喀什地区的冰雹多出现在戈壁、绿洲、人口相对密集的交界带^[31],同样由于复杂的地形,易诱发冰雹等强对流天气^[32]。

与此同时,地区天气的变化偶尔具有特殊情况。除前文中所述的五个大陆性地区外,由于偶然的极端天气,位于沿海季风气候区的山东济南与上海降雹偏差也为正。据数据记载,2018年6月13日,山东部分地区出现强对流天气袭击,冰雹直径可达40 mm;2018年8月6日,上海部分地区同样受到了强对流影响,带来了较大的冰雹。

本研究只针对2018年全国25个站点降水数据,由于雨滴谱仪的单点测量特性、极端天气状况和研究数据的限制,普适性公式有待进一步研究。前文提及的降雹正偏差问题,可能与降雹粒径范围广有关,故粒径较大的雹粒子 KE_v-I_{hail} 关系模型有待进一步优化。为实现大规模动能的预估与计算,一方面可扩大雨滴谱仪研究数量及数据质量,另一方面可与卫星反演结果相融合,为降水研究提供更好的理论支撑作用。

5 结论

降水动能对地表各要素发展演变、土壤侵蚀研究和地表形态塑造具有重要价值,而 KE_v-I 拟合关系及其在不同地区的异同性特点为降水动能研究提供了理论基础。本文针对降水动能计算中的偏差问题,基于中国25个雨滴谱仪站点的降水数据,提出了多相态 KE_v-I 关系降水动能计算方法,并估算传统研究方法下降水动能与真实降水动能的偏差。

(1) 比较 KE_v-I_{rain} 计算的降雪和降雹动能结果

发现:多数站点降雹事件使用 KE_v-I_{hail} 计算的动能高于 KE_v-I_{rain} 计算的动能,而降雪事件使用 KE_v-I_{rain} 计算的动能低于实际观测的结果。证明降雨公式并不适用各类型水凝物动能研究,且本实验拟合的各相态 KE_v-I 关系模型准确性更高。

(2) 25个站点的 MAE 均值为降雪0.004、降雹0.01; $RMSE$ 均值为降雪0.03、降雹0.26。雹和雪的占比越高,动能偏差越大。降雪的误差整体小于降雹,降雹对降水动能的影响更大。

(3) 降雪和降雹动能适合使用幂函数型 KE_v-I 进行推导,拟合结果平均拟合系数 R^2 为降雪0.41,降雹0.76。根据拟合的经验公式有效降低了相对误差,降雪相对误差从7.08降低至-0.05,降雹相对误差从-0.29降低至0.03。因此,融合多相态 KE_v-I 关系的降水动能与传统 KE_v-I_{rain} 计算结果相比,更接近真实降水动能。

(4) 25个站点计算的降水动能以及校正后的降水动能偏差都具有区域性和相态差异性。低纬度及降雨比重高的地区动能偏差小,大陆性气候的高海拔内陆地区及部分高山与高原地区冰雹频发,使得整体动能计算误差较大。降雪多引起正偏差,即高估降雪动能,降雹多引起负偏差,即低估降雹动能。

致谢

感谢国家科技资源共享服务平台-国家地球系统科学数据中心-长江三角洲分中心 (<http://nnu.geodata.cn:8008>) 提供数据支撑。

参考文献 (References)

- [1] BERGHUIJS W R, WOODS R A, HRACHOWITZ M. A precipitation shift from snow towards rain leads to a decrease in streamflow [J]. *Nature Climate Change*, 2018, 4(7): 583–586. DOI: 10.1038/NCLIMATE2246
- [2] FORNIS R L, VERMEULEN H R, NIEUWENHUIS J D. Kinetic energy-rainfall intensity relationship for Central Cebu, Philippines for soil erosion studies [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 300: 20–32. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.04.027
- [3] VAN DIJK A I J M, BRUIJNZEEL L A, ROSEWELL C J. Rainfall intensity-kinetic energy relationships: A critical literature appraisal [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 261(14): 1–23. DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00020-3
- [4] BROWN T M, POGORZELSKI W H, GIAMMANCO I M. Evaluating hail damage using property insurance claims data [J].

- Weather, Climate and Society, 2015, **7**(3): 197–210. DOI: 10.1175/WCAS-D-15-0011.1
- [5] LOFTUS A M, COTTON W R, CARRIO G G. A triple-moment hail bulk microphysics scheme. Part I: Description and initial evaluation [J]. Atmospheric Research, 2014, **149**: 35–37. DOI: 10.1016/j.atmosres.2014.05.013
- [6] MINEO C, RIDOLFI E, BERTINI C, et al. Kinetic energy and rainfall intensity relationships: A review [G]// AIP Conference Proceedings. Proceedings of International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics. Rhodes: AIP Publishing, 2019: 210005–1–210005–4. DOI: 10.1063/1.5114216
- [7] ANGULO-MARTÍNEZ M, BEGUERÍA S, KYSELÝ J. Use of disdrometer data to evaluate the relationship of rainfall kinetic energy and intensity ($KE-I$) [J]. Science of the Total Environment, 2016, **568**: 83–94. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.223
- [8] JAYAWARDENA A W, REZAUR R B. Drop size distribution and kinetic energy load of rainstorms in Hong Kong [J]. Hydrological Processes, 2000, **14**(6): 1069–1082. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(20000430)14:6<1069::AID-HYP997>3.0.CO;2-Q
- [9] SALLES C, POESEN J, SEMPERE-TORRES D. Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity [J]. Journal of Hydrology, 2002, **257**: 256–270. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00555-8
- [10] LIM Y S, KIM J K, KIM J W, et al. Analysis of the relationship between the kinetic energy and intensity of rainfall in Daejeon, Korea [J]. Quaternary International, 2015, **384**: 107–117. DOI: 10.1016/j.quaint.2015.03.021
- [11] USÓN A, RAMOS M C. An improved rainfall erosivity index obtained from experimental interrill soil losses in soils with a Mediterranean climate [J]. Catena, 2001, **43**(4): 293–305. DOI: 10.1016/S0341-8162(00)00150-8
- [12] PETAN S, RUSJAN S, VIDMAR A, et al. The rainfall kinetic energy-intensity relationship for rainfall erosivity estimation in the mediterranean part of Slovenia [J]. Journal of Hydrology, 2010, **391**(3–4): 314–321. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.031
- [13] NEARING M A, YIN S Q, BORRELLI P, et al. Rainfall erosivity: An historical review [J]. Catena, 2017, **157**: 357–362. DOI: 10.1016/j.catena.2017.06.004
- [14] 陈洁, 刘玉洁, 潘韬, 等. 1961—2010 年中国降水时空变化特征及对地表干湿状况影响 [J]. 自然资源学报, 2019, **34**(11): 2440–2453. [CHEN Jie, LIU Yujie, PAN Tao, et al. Spatiotemporal variation of precipitation in China and its impact on surface dry-wet conditions during 1961–2010 [J]. Journal of Natural Resources, 2019, **34**(11): 2440–2453] DOI: 10.31497/zrzyxb.20191115
- [15] 李林, 孙赫敏, 仰美霖, 等. 基于速度和数量阈值的雨滴谱质量控制方法 [J]. 气象, 2022, **48**(7): 891–898. [LI Lin, SUN Hemin, YANG Meilin, et al. Disdrometer's data quality control method based on speed and quantity threshold [J]. Meteorological Monthly, 2022, **48**(7): 891–898] DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.041201
- [16] GOU Yabin, CHEN Haonan, ZHU Hong, et al. Microphysical processes of super typhoon Lekima (2019) and their impacts on polarimetric radar remote sensing of precipitation [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2023, **23**(4): 2439–2463. DOI: 10.5194/acp-23-2439-2023
- [17] LÖFFLER-MANG M, JOSS J. An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2000, **17**(2): 130–139. DOI: 10.1175/1520-0426(2000)017<0130:AODFMS>2.0.CO;2
- [18] ATLAS D, SRIVASTAVA R C, SEKHON R S. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence [J]. Reviews of Geophysics and Space Physics, 1973, **11**(1): 1–35. DOI: 10.1029/RG011i001p00001
- [19] FRIEDRICH K, KALINA E A, MASTERS F J, et al. Drop-size distributions in thunderstorms measured by optical disdrometers during VORTEX2 [J]. Monthly Weather Review, 2013, **141**(4): 1182–1203. DOI: 10.1175/MWR-D-12-00116.1
- [20] 陶然亭. 基于二维视频雨滴谱仪和双偏振雷达研究中国东部地区降雪微物理特征与降雪估计 [D]. 南京: 南京大学, 2020: 1–73. [TAO Ranting. Snow microphysical characteristics and snow fall estimation in East China based on a 2D video disdrometer and dual polarization radar [D]. Nanjing: Nanjing University, 2020: 1–73] DOI: 10.27235/d.cnki.gnjj.2020.002509
- [21] GRIESER J, HILL M. How to express hail intensity—modeling the hailstone size distribution [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2019, **58**(10): 2329–2345. DOI: 10.1175/JAMC-D-18-0334.1
- [22] DAI Qiang, ZHU Jingxuan, ZHANG Shuliang, et al. Estimation of rainfall erosivity based on WRF-derived raindrop size distributions [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, **24**(11): 5407–5422. DOI: 10.5194/hess-24-5407-2020
- [23] KIM J, HAN H, KIM B, et al. Use of a high-resolution-satellite-based precipitation product in mapping continental-scale rainfall erosivity: A case study of the United States [J]. Catena, 2020, **193**: 104602. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104602
- [24] MONTERO-MARTÍNEZ G, GARCÍA-GARCÍA F, ARENAL-CASAS S. The change of rainfall kinetic energy content with altitude [J]. Journal of Hydrology, 2020, **584**: 124685. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.124685
- [25] CHEN Hao, ZHANG Xiaoping, ABLA M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2018, **170**: 141–149. DOI: 10.1016/j.catena.2018.06.006

- [26] ZHU Jingxuan, ZHANG Shuliang, YANG Qiqi, et al. Comparison of rainfall microphysics characteristics derived by numerical weather prediction modelling and dual-frequency precipitation radar [J]. *Meteorological Applications*, 2021, **28** (3): e2000. DOI: 10.1002/met.2000
- [27] WILLMOTT C J, MATSUURA K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance [J]. *Climate Research*, 2005, **30** (1): 79–82. DOI: 10.3354/cr030079
- [28] 于水燕, 毕力格, 苏立娟, 等. 内蒙古巴彦淖尔市冰雹云移动路径及其特征[J]. *干旱区研究*, 2022, **39** (4): 1047–1055. [YU Shuiyan, BI Lige, SU Lijuan, et al. Movement paths and characteristics of hail clouds in Bayannur, Inner Mongolia [J]. *Arid Zone Research*, 2022, **39** (4): 1047–1055] DOI: 10.13866/j.azr.2022.04.06
- [29] 韩经纬, 王海梅, 乌兰, 等. 内蒙古雷暴、冰雹灾害的评估分析与防御对策研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, **23** (7): 31–38. [HAN Jingwei, WANG Haimei, WU Lan, et al. The analysis and assessment on thunderstorm and hail disasters and the countermeasures in Inner Mongolia [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, **23** (7): 31–38] DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2009.07.008
- [30] 冯晓莉, 马占良, 管琴, 等. 1980—2018 年青海高原冰雹分布特征及其关键影响因素分析 [J]. *气象*, 2021, **47** (6): 717–726. [FENG Xiaoli, MA Zhanliang, GUAN Qin, et al. Spatio-temporal characteristics of hail and its influence factors in Qinghai Plateau during 1980–2018 [J]. *Meteorological Monthly*, 2021, **47** (6): 717–726] DOI: 10.7519/j.issn.1000–0526.2021.06.007
- [31] 黄艳, 裴江文. 新疆喀什地区冰雹气候特征及大气环境背景分析[J]. *干旱区研究*, 2015, **32** (3): 526–532. [HUANG Yan, PEI Jiangwen. Hail climate characteristics and atmospheric environment background in Kashi region, Xinjiang [J]. *Arid Zone Research*, 2015, **32** (3): 526–532] DOI: 10.13866/j.azr.2015.03.17
- [32] 王昀, 卢品睿, 王旭. 天山南侧喀什地区冰雹潜势预报及预警指标的研究[J]. *干旱区地理*, 2018, **41** (5): 937–944. [WANG Yun, LU Pinrui, WANG Xu. Nowcasting indicators of radar of hail cloud in southern Tianshan Mountains [J]. *Arid Land Geography*, 2018, **41** (5): 937–944] DOI: 10.12118/j.issn.1000–6060.2018.05.05

Calculation of Precipitation Kinetic Energy Based on Multi-Phase $KE-I$ Relationship

SUN Chenyue¹, DAI Qiang^{1*}, JI Duanyang¹, GU Yu¹, LIU Chaonan¹, LI Yanpeng²

(1. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

2. Public Meteorological Service Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Precipitation kinetic energy, which describes the magnitude of the kinetic energy of hydrometeor reaching earth surface, is one of the important parameters for calculating surface physicochemical processes such as soil particle separation and soil erosion. Rainfall characteristics were often considered in the calculation of precipitation kinetic energy, but precipitation in other phases was ignored.

In this study, it started from a primitive phase classification of hydro-condensate, followed by an analysis of the correlation between kinetic energy per unit volume of precipitation (KE_V) and precipitation intensity (I); based on meteorological observations at 25 raindrop spectrometer stations nationwide in 2018, it further classified hydrometeor into phases by examining velocity (V)-diameter (D) correlation of hydrometeor; after fitting empirical equations of KE_V-I for precipitation in different phases, it introduced a series of precipitation kinetic energy estimation models applicable to rainfall, snowfall, and hailfall. The statistical significance of KE_V-I fitting was carefully justified by field observations in terms of Relative Error (RE), Mean Absolute Error (MAE), and Root Mean Square Error ($RMSE$).

It found that (1) the KE_v-I exponential type formula was applied to the calculation of rainfall kinetic energy, and the KE_v-I power function type formula was applied to the calculation of snowfall and hailfall kinetic energy. (2) The deviation of calculating precipitation kinetic energy was positively correlated with non-liquid fraction of total precipitation. Supposing that the kinetic energy of all phases of precipitation were estimated entirely by the KE_v-I fitting of rainfall, it would significantly overestimated snowfall kinetic energy but underestimated the hailfall kinetic energy, with a deviation of -0.05 to 0.31 in extent from an overall precipitation estimate. (3) By establishing separate KE_v-I calculation model for respective phase of precipitation, the overall estimation error of precipitation was effectively reduced. The snowfall deviation was reduced from 7.08 to -0.05 , and the hailfall deviation was reduced from -0.29 to 0.03 .

The method proposed in this paper effectively improved the accuracy of precipitation kinetic energy estimation, providing better support for the calculation of regional soil hydraulic erosion.

Key words: precipitation kinetic energy; raindrop spectrometer; $KE-I$; precipitation intensity; phase classification; deviation calculation

(责任编辑 钟雨倩)