

刘奇奇,王健,高帆,等.山东深秋一次暴雪过程雪水比影响因子分析[J].海洋气象学报,2024,44(1):88-96.
LIU Qiqi, WANG Jian, GAO Fan, et al. Analysis on influencing factors of snow-to-liquid ratio during a late-autumn snowstorm in Shandong[J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(1): 88-96. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20230223001. (in Chinese)

山东深秋一次暴雪过程雪水比影响因子分析

刘奇奇^{1,2}, 王健², 高帆³, 徐娟², 韩风军², 吕博²

(1. 山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南 250031; 2. 聊城市气象局, 山东 聊城 252000; 3. 济南市气象局, 山东 济南 250102)

摘要 利用地面气象观测站资料、加密地面观测资料和欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)第五代大气再分析数据(ECMWF Reanalysis v5, ERA5; 分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$)逐小时资料,对山东2021年11月6—8日极端暴雪过程雪水比影响因子进行研究。结果显示:此次暴雪过程平均雪水比分布总体呈“北大南小、西大东小”的分布特征,降雪初期产生的雪水比小,降雪中后期产生的雪水比较大;温度偏高、云内液态水含量较高的地区雪水比较小,温度偏低、云内液态水含量较低的地区雪水比较大;雪水比与地面气温、地表温度呈负相关,地面气温与雪水比的相关性最大,积雪产生之后地表温度与雪水比变化无明显相关。

关键词 积雪深度; 雪水比; 温度; 垂直运动

中图分类号: P426.63; P458.3 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2024)01-0088-09
DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20230223001

Analysis on influencing factors of snow-to-liquid ratio during a late-autumn snowstorm in Shandong

LIU Qiqi^{1,2}, WANG Jian², GAO Fan³, XU Juan², HAN Fengjun², LÜ Bo²

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Liaocheng Meteorological Bureau, Liaocheng 252000, China; 3. Jinan Meteorological Bureau, Jinan 250102, China)

Abstract The influencing factors of snow-to-liquid ratio (SLR) during a snowstorm in Shandong from 6 to 8 November 2021 are analyzed by using the data of ground meteorological observation stations, intensive ground observation data, and ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) Reanalysis v5 (ERA5) hourly data ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$). The results are as follows. The distribution of mean SLR in this snowstorm process is generally characterized by high in the north but low in the south, high in the west but low in the east. The SLR in the early period of the snowfall is relatively low, while it is relatively high in the middle and late period. The SLR is lower in the area with higher air temperature and higher specific cloud liquid water content than that in the area with lower air temperature and lower specific cloud liquid water content. The SLR is negatively correlated with the surface air temperature and surface temperature. The correlation between surface air temperature and SLR is the largest. After snow blankets the ground, the surface temperature has no significant correlation with the change of SLR.

Keywords snow depth; snow-to-liquid ratio (SLR); temperature; vertical movement

收稿日期: 2023-02-23; 修回日期: 2023-07-17

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2022MD095); 山东省气象局科研项目(2021SDYD28, 2020sdqxm20)

第一作者简介: 刘奇奇, 女, 硕士, 工程师, 主要从事中短期天气预报和技术研究, lqqi1990@163.com。

引言

暴雪是山东冬半年的一种高影响天气,其产生的积雪对农业生产、交通运输和人民生活等方面均能产生不利影响,因此积雪是雪灾的主要致灾因子^[1-2]。在实际业务中,暴雪天气预报的主要要素是降雪量,但除降雪量之外,积雪深度也是衡量暴雪灾害严重程度的重要指标。为提高暴雪天气预报预警准确率,实现积雪深度的精准预报,需对降雪量与积雪深度关系进行深入研究。目前国内外常用某时段内积雪深度的变化值与该时段内降雪量的比值来评估降雪量与积雪深度的关系,该比值称为“降雪含水比”(snow-to-liquid ratio, SLR),文中简称为“雪水比”。预报中使用的雪水比若不够精准,对降雪量预报再精确也无法准确预报出积雪深度^[3]。雪水比的大小与雪花大小、形状、结构等几何形态相关,大而蓬松的树枝状雪花雪水比最大,积雪效率最高,所形成的积雪深度也最厚^[4]。

过去常使用的雪水比经验值为 10:1^[5],但后续相关研究表明该比值具有明显的时空变化特征,使用经验值 10 虽具有一定的有效性,但对精细化预报来说还是比较粗略^[6]。我国冬季平均雪水比为 7.5,青海、吉林、山东均大于 10.0,北京为 6.3,河南和西藏仅为 4.9^[7]。杨成芳等^[8]研究了山东 1999—2018 年的雪水比统计特征,得出山东雪水比变化范围为 1.0~30.0,最大值出现在 1 月或 12 月,最小值出现在 2 月或 11 月,不同天气系统的雪水比具有不同特征。杨成芳等^[9]指出积雪深度是近地面多气象要素共同作用的结果。高留喜等^[10]研究得出低温对产生积雪和较大雪水比有利。陈双等^[11]对华北地区两次密度不同的降雪过程进行对比分析,得到大气温湿和动力垂直结构及地面过程等直接影响雪水比大小。还有研究表明,除了云内、外微物理过程的影响,近地面及地表因素也是影响雪水比非常重要的因素,但目前的数值模拟和客观预报方法都不能很好地模拟这些过程,为了有效提高积雪精细化预报能力,还需继续加强对近地面及地表融雪过程的研究以及预报技术的研发^[12-13]。由于降雪观测资料的局限性,我国对雪水比的研究起步较晚,目前对暴雪的成因和机制、雨雪相态转换的研究比较多,有学者发现影响系统的强度和位置会对降雪强度和降

水相态转换产生影响,温度垂直结构是影响降水相态的关键因素^[14-15]。针对雪水比的研究大都是关于年平均统计类的分析,而对极端降雪个例的雪水比研究分析较少。

本文以 2021 年 11 月 6—8 日山东一次极端暴雪天气过程为例,利用地面气象观测站资料、加密地面观测资料和欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)第五代大气再分析数据(ECMWF Reanalysis v5, ERA5;分辨率为 0.25°×0.25°)逐小时资料,对此次过程雪水比的影响因子进行研究分析,以期今后提高精细化积雪预报水平提供一些参考。

1 资料与个例简介

1.1 资料来源与计算方法

使用的数据为 2021 年 11 月 6—8 日山东国家级地面气象观测站常规地面观测资料、地面加密观测资料和 ERA5 逐小时再分析资料(0.25°×0.25°)。

雪水比(SLR)为新增积雪深度与融化后等量液体深度的比值,等价于液态水密度与平均雪密度之比^[16-17]。通过公式 $V_{SLR} = V_{SD}/V_{SL}$ 计算过程平均雪水比,分析此次极端降雪过程雪水比的分布和影响因子。式中: V_{SLR} 表示雪水比; V_{SD} 表示降雪过程内最大积雪深度,单位为 cm,计算时转换为 mm; V_{SL} 表示各站过程降雪量,单位为 mm。

1.2 降雪实况

2021 年 11 月 6—8 日,山东出现一次全省范围的极端暴雪天气,此次过程降水强度大,初雪时间早,其中聊城、德州、济南、淄博等地还出现了“雷打雪”现象。11 月 6 日傍晚开始,山东由西向东出现明显降雨,鲁西北部分地区 7 日 01 时(北京时,下同)开始出现雨转雨夹雪,03 时由雨夹雪转雪;05 时之后全省大部分地区由西北向东南转雪。整个过程中出现积雪的站点降水相态转换主要为雨转雨夹雪再转雪,部分站点为雨转雪;未出现明显积雪的站点相态转换复杂,经历多次雨雪之间的转换。全省主要降雪时段为 7 日 05—20 时,强降雪落区主要在鲁西北和鲁中地区;鲁南地区降雪量偏少,没有产生明显积雪(图 1a)。全省平均降雪量为 12.0 mm,有 47 站降雪量达到暴雪,部分站达到特大暴雪,过程最大降雪量为

41.6 mm,出现在德州平原。强积雪主要分布在聊城、德州、济南和滨州等地,超过 10 cm 的站点有 23 个,有4 站最大积雪深度突破其历史极值,其中积雪深度最大达到 20 cm,出现在济南和德州。由济南站逐时

降水量及相态演变(图 1b)可看出,6 日 20 时济南开始降水,先后经历了雨转雨夹雪转雪的相态转换,降雪时段为 7 日 09—15 时,最大小时降雪量达到 7.4 mm,过程最大积雪深度为 20 cm。

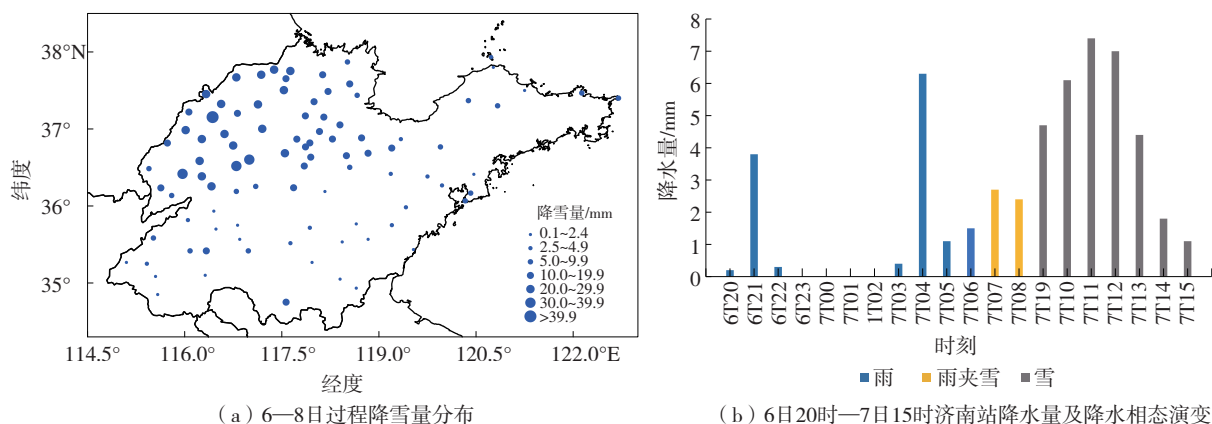


图1 山东 2021 年 11 月 6—8 日降雪过程气象要素分布

Fig.1 Distribution of meteorological elements in Shandong in the snowfall process from 6 to 8 November 2021

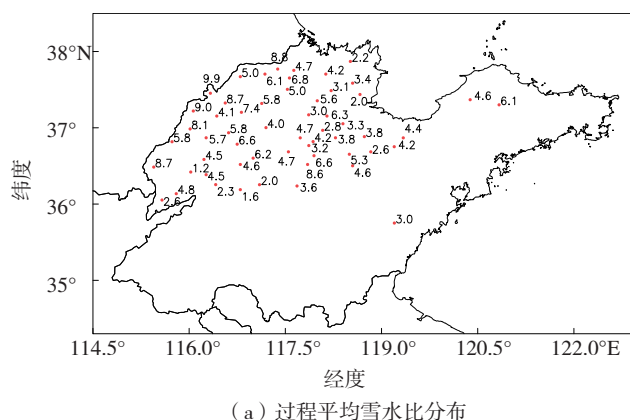
2 雪水比分布及变化特征

图 2a 给出整个过程平均雪水比分布情况,聊城、德州等偏西的地区平均雪水比为 5.6,淄博、潍坊等偏东的地区平均雪水比为 4.4,西部雪水比大于东部。滨州、东营等偏北的地区平均雪水比为 5.4,越往南越小,济南、泰安等偏南的地区平均雪水比为 4.4,北部雪水比值大于南部。平均雪水比水平分布总体呈“北大南小、西大东小”的特征。此次过程平均雪水比约为 4.8,与山东大部地区的年平均雪水比 9.0^[8] 相比明显偏小。此次降雪发生在 11 月初,较山东以往初雪时间早,降雪前基础温度偏高,使得降雪初期地面不易形成积雪,同时温度偏高能使雪花在下落过程中雪密度增大,造成雪水比偏小。此外,

积雪深度的观测误差也会对该比值产生一定的影响。

此次降雪过程山东启动积雪深度加密观测为 11 月 7 日 13 时,根据各站降雪开始时间,选取垦利、寿光作为代表站分析逐时雪水比变化情况。由图 2b、c 可以看出,在整个降雪过程中,雪水比随时间呈增大趋势,降雪初期的雪水比小于降雪强盛和结束时期,即降雪云系前部所产生的雪水比较主体云系中后部所产生的雪水比小,降雪初期雪密度较大,降雪强盛和结束阶段雪密度较小。

根据此次过程全省降雪量、积雪特点以及雪水比分布特点(表 1),分别选取聊城、德州、利津、济南 4 站作为主要研究对象,分析此次过程雪水比的影响因子。



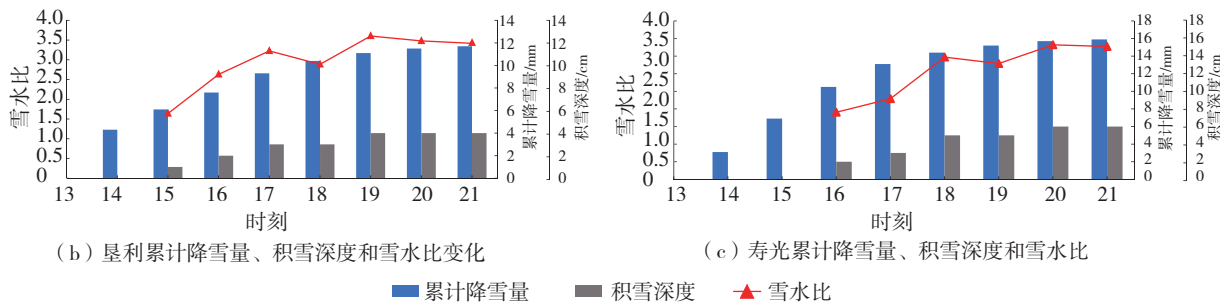


图 2 山东 2021 年 11 月 6—8 日降雪过程平均雪水比分布以及 7 日 14—21 时垦利、寿光气象要素逐时变化
Fig.2 Distribution of mean SLR in Shandong in the snowfall process from 6 to 8 November and hourly variation of meteorological elements in Kenli and Shouguang from 14:00 BJT to 21:00 BJT 7 November 2021

表 1 6 个代表站的降雪量、最大积雪深度和雪水比

Table 1 Snowfall, the maximum snow depth, and SLR at 6 representative stations

站点	降雪量/mm	积雪深度/cm	雪水比
聊城	32.7	4	1.2
德州	20.3	20	9.9
济南	32.5	20	6.2
利津	15.9	5	3.1
垦利	11.7	4	3.4
寿光	15.9	6	3.8

3 天气形势分析

此次过程主要影响系统为高空西风槽、西南急流、中低层切变线以及地面冷锋。11 月 4—5 日, 500 hPa 贝加尔湖上空极涡有横槽发展加强, 冷空气堆积。6 日 20 时, 横槽转竖南压, 槽持续发展加深, 在河套地区形成切断低涡, 与 500 hPa 的 $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷中心配合。同时鲁西北地区 700 hPa 西南急流建立, 低空急流强度超过 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。850 hPa 和 925 hPa 的东南风与 700 hPa 西南风急流形成两条水汽输送带, 为此次降水提供了充足的水汽。850 hPa 切变线上有低涡环流生成并东移, 为降水提供了动力条件。由图 3 可以看出, 7 日 08 时, 随着西风槽东移, 500 hPa 槽前高空西南急流加强, 强度可达到 $35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 700 hPa

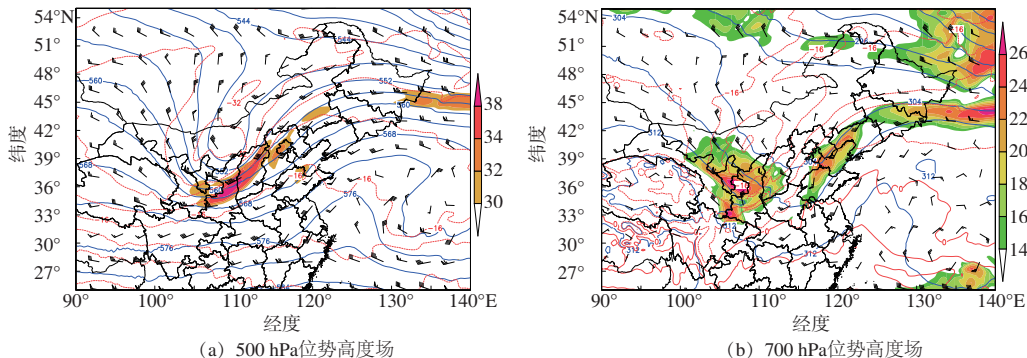
低空急流强盛, 850 hPa 低涡东移影响山东。同时, 地面有明显的倒槽系统配合, 全省出现大范围降雪。此次天气系统存在明显的后倾结构, 伴随冷锋南移气温下降, 降水相态由雨转为雨夹雪或雪, 主要降雪区位于地面冷锋后部和 700 hPa 槽前。8 日 16 时, 500 hPa 山东受槽后西北气流控制, 降雪结束。

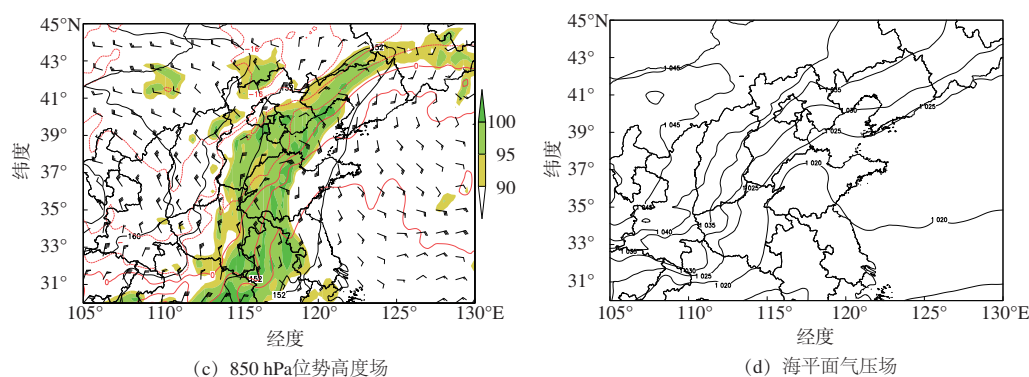
4 高空气象条件对雪水比的影响分析

4.1 微物理特征分析

4.1.1 垂直运动与温、湿特征

高空环境温度、相对湿度和垂直运动均能对雪花结构产生影响, 进而影响雪水比的值。当云中环境温度为 $-4\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时冰晶结构主要为片状, $-10\sim -4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时主要为针状、棱状, $-20\sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时主要为树枝状、厚片状、扇状, 低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时主要为空心柱状^[6]。相对湿度影响冰晶的增长率和雪花的特定类型, 若过饱和程度高, 则冰晶增长较快^[18-19]。垂直运动则影响降雪量和过饱和状态的维持程度及时间, 并且在上升运动最大层附近的温度和相对湿度共同决定了雪花的类型^[20]。所选 4 个代表站雪水比从小到依次是聊城、利津、济南、德州。





a、b中蓝色和c中黑色等值线—位势高度, 单位: dagpm; a、b、c中红色等值线—所在位势高度层的温度, 单位: $^{\circ}\text{C}$;
a、b中色阶—急流, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; c中色阶—相对湿度, 单位: %; d中黑色等值线—气压, 单位: hPa。

图3 2021年11月7日08时天气形势场

Fig.3 Synoptic charts at 08:00 BJT 7 November 2021

4站上空湿度层深厚,相对湿度在90%以上的湿区从1000 hPa延伸至200 hPa附近(图4a—d)。降雪时段内,聊城上空600~300 hPa之间有一个垂直运动大值中心,温度为 $-40 \sim -8^{\circ}\text{C}$,粒子相态主要为冰晶;925~700 hPa温度明显偏高,上升运动较弱,相对湿度饱和,但不利于大冰晶生成和维持,而对小冰晶生长更有利;在 0°C 附近冰晶会有明显的融化作用,导致雪密度增大,产生较小的雪水比(图4a)。利津上空存在2个上升运动大值区:一个大值区位于650~400 hPa,温度为 $-25 \sim -4^{\circ}\text{C}$;另一个大值区位于800~900 hPa,温度为 $-4 \sim 0^{\circ}\text{C}$,主要利于针状、柱状小冰晶生长,不利于高层大冰晶的维持,则产生小的雪水比(图4c)。济南和德州上升运动层深厚,850~300 hPa均存在上升运动大值区,对应温度最低可至 -40°C ,配合饱和水汽层的环境条件,2站均有利于树枝状、扇状等大冰晶形成增长,低层温度也较聊城和利津低,能够更好维持大冰晶的结构和形态,故济南和德州2站雪水比更大,积雪也更深(图4b、d)。

4.1.2 云内冰、水含量特征

雪水比受云内冰相粒子和液态水含量影响,雪花在下降过程中若经过含有过冷水滴的云,易与过冷水滴碰撞发生淞附增长^[18],会使雪密度增大,雪水比减小。

所选站点云内均存在大量过冷水滴,且过冷水滴大值中心位于700 hPa以下,最大值为 $40 \times 10^{-5} \sim 50 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,对应温度高于 -10°C ,即在降雪之前和降雪初期云内含有大量液态水。云中冰相粒子

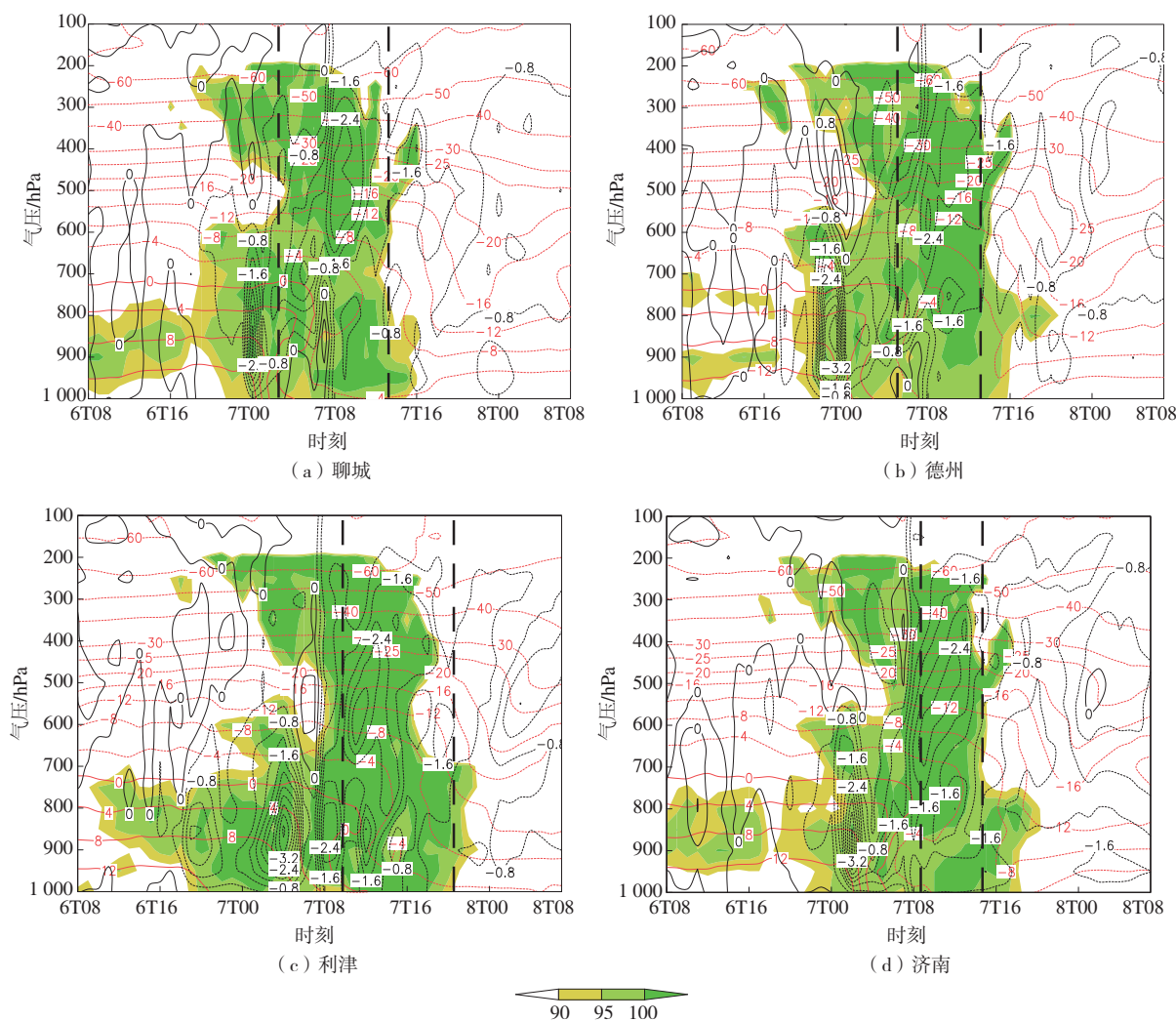
大值中心位于400~500 hPa附近,主要对应 $-40 \sim -10^{\circ}\text{C}$ 的温度层,降雪时段与冰相粒子大值区对应(图5a—d)。所选站点聊城上空冰相粒子大值中心达到 $22 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其余3站冰相粒子最大值约为 $18 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。降雪时段内聊城、利津的过冷水滴含量较济南、德州高,雪花在下降过程中会与更多的过冷水滴发生碰并,淞附作用比济南和德州处更为显著,易使雪花密度增大,产生小的雪水比。在降雪中后期云中过冷水含量降低,使降雪过程中淞附作用减小,雪水比增大。降雪时段一般对应冰相粒子的大值区,但冰相粒子含量不能决定雪水比的大小,还需关注降雪过程中云内过冷水含量和变化,过冷水含量会影响降雪密度的大小,降雪时段内过冷水滴含量较高的地区,雪水比会更小。

4.2 降雪温度特征

聊城、济南此次过程降雪量均达到30 mm以上,但二者积雪深度和雪水比相差较大(表1),选取聊城和济南作为代表站,研究2站云下温度特征差异。代表站的雨雪相态变化均为雨转雨夹雪再转雪。11月6日降雨阶段,云下温度均较高,受冷空气影响,温度出现明显下降, $t_{925 \text{ hPa}}$ 下降最为显著。由图6a、b看出,在雨夹雪阶段,济南站降温幅度明显大于聊城站,聊城站 $t_{925 \text{ hPa}}$ 为 $-2 \sim -7.8^{\circ}\text{C}$, $t_{1000 \text{ hPa}}$ 为 $1 \sim 7.3^{\circ}\text{C}$;济南站 $t_{925 \text{ hPa}}$ 、 $t_{1000 \text{ hPa}}$ 分别为 $-5.6 \sim -4^{\circ}\text{C}$ 和 $-3.7 \sim -2.1^{\circ}\text{C}$ 。纯雪阶段,聊城站 $t_{925 \text{ hPa}}$ 与 $t_{1000 \text{ hPa}}$ 降至 $-5.3 \sim -2^{\circ}\text{C}$ 和 $-2.2 \sim 1^{\circ}\text{C}$;济南站 $t_{925 \text{ hPa}}$ 和 $t_{1000 \text{ hPa}}$ 降至 $-6.4 \sim -4^{\circ}\text{C}$ 和 $-5.4 \sim 3.7^{\circ}\text{C}$ 。根据地面观测资料(图6c、d)可知,雨夹雪阶段,聊城站和济南站的 $t_{2 \text{ m}}$ 分别为 $6 \sim 7^{\circ}\text{C}$ 和

0~0.5℃;纯雪阶段的 t_{2m} 分别为-0.5~3℃和-3~-0.1℃。综上可知,在雨夹雪和纯雪阶段,聊城站云下温度明显偏高,均高于济南站。雪水比受云下温度影响,降雪量大且积雪深度较浅的站云下温度偏高,较高的云下温度会使雪花下降过程会发生融化,导致

雪密度增大,产生较小的雪水比和较浅积雪;降雪量大且积雪深度较深的站云下温度偏低,较低的云下温度能够让雪花下降过程中不易融化,利于维持雪花原有的形态,雪密度不易发生较大变化,产生的较大的雪水比和较深的积雪。



黑色等值线—垂直运动,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$; 红色等值线—温度,单位: $^{\circ}\text{C}$; 色阶—相对湿度,单位: %; 黑色虚线区域—降雪时段。

图4 垂直运动以及温度、相对湿度垂直剖面

Fig.4 Vertical profile of vertical velocity, temperature, and relative humidity

5 近地面气象条件的影响

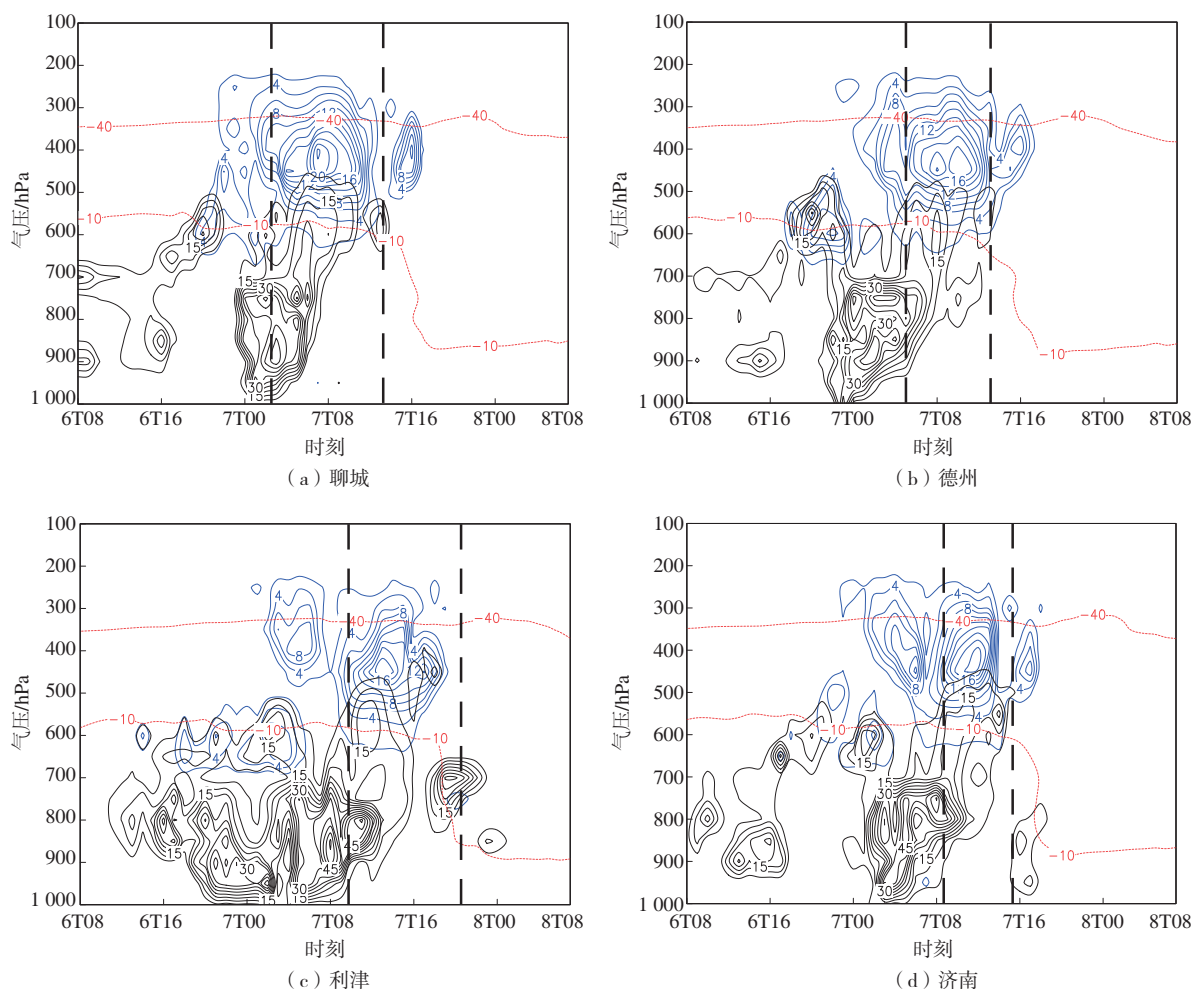
近地面气象条件能够影响地面积雪深度,雪花下降过程中若近地面温度偏高,则会发生融化,不利于地面产生积雪^[10,21]。大风容易导致树枝状和空心柱状这类易碎结构的雪花解体,或使地面上的积雪移动,使地面雪压增大,雪密度变大^[21-22],从而使得雪水比变小。

5.1 地面2 m气温和0 cm地温的影响

此次过程有积雪的站所对应的地面2 m气温范围为-3.7~1.5℃,其中90%的站2 m气温低于0.1℃,雪水比最大值对应的2 m气温为0.3℃(图7a)。各站雪水比对应0 cm地温范围为-0.4~2.9℃,低于1.0℃的站达到90%,雪水比最大值对应的0 cm地温为0.1℃(图7b)。分别对2 m气温和0 cm地温做相关性分析,相关系数分别为-0.4和-0.3,通过了95%置信度检验,可知2 m气温和

0 cm 地温与雪水比呈负相关,雪水比随温度降低呈增大趋势,2 m 气温与雪水比的相关性大于 0 cm 地温。当 0 cm 地温越低,与雪水比的相关系数急剧减小(图略),说明在积雪产生之后,0 cm 地温

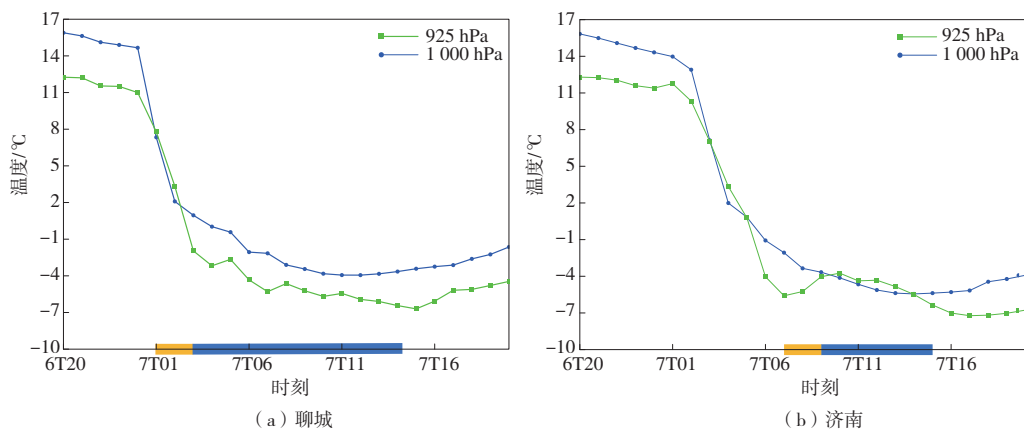
与雪水比变化无明显相关。杨成芳等^[23]也有研究结果表明,积雪产生后地表温度对之后的积雪深度不再有影响。



蓝色等值线—冰相粒子, 单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 黑色等值线—液态水粒子, 单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$;
红色虚等值线—温度, 单位: $^{\circ}\text{C}$; 黑色虚线区域—降雪时段。

图5 云中冰相粒子和液态水粒子垂直分布

Fig.5 Vertical distribution of specific cloud ice water content and specific cloud liquid water content



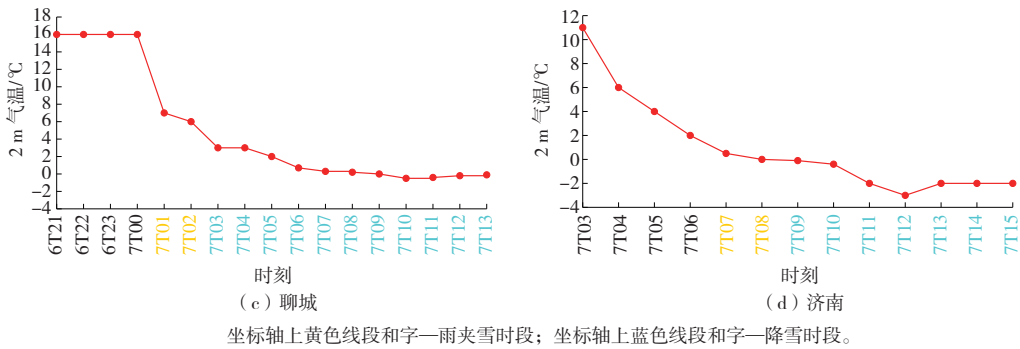


图 6 925 hPa、1 000 hPa 以及 2 m 气温逐时分布
Fig.6 Hourly distribution of temperature at 925 hPa, 1 000 hPa, and 2 m

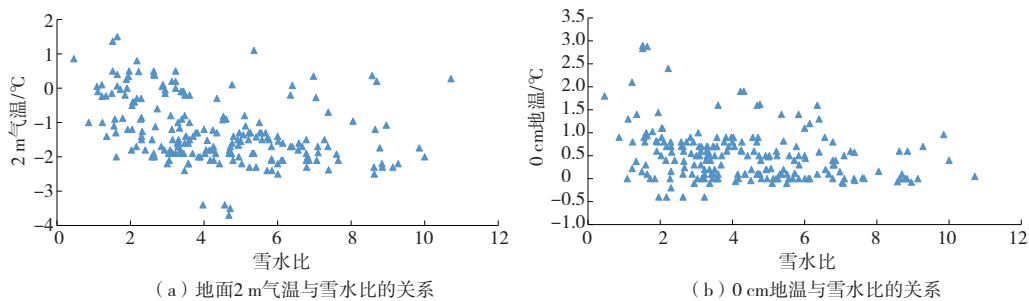


图 7 近地面温度与雪水比关系
Fig.7 Relationship between temperature near the surface and SLR

5.2 平均风速和极大风速的影响

分析降雪过程中雪水比对应的平均风速和极大风速(图 8)可知,94%的站对应平均风速在 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内,雪水比最大值出现在平均风速 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近;94%的站对应极大风速在 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内,雪水比最大值出现在极大风速 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近。平均风速和极

大风速最大值处都对应较小的雪水比值,大于 8 的雪水比发生在平均风速 $2 \sim 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和极大风速 $6 \sim 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内。对雪水比与平均风速、极大风速同时进行相关性分析,发现其相关系数远小于地面 2 m 气温和 0 cm 地温,呈极弱相关或无相关,随着风速增大其相关性呈先减小后增大的变化趋势。

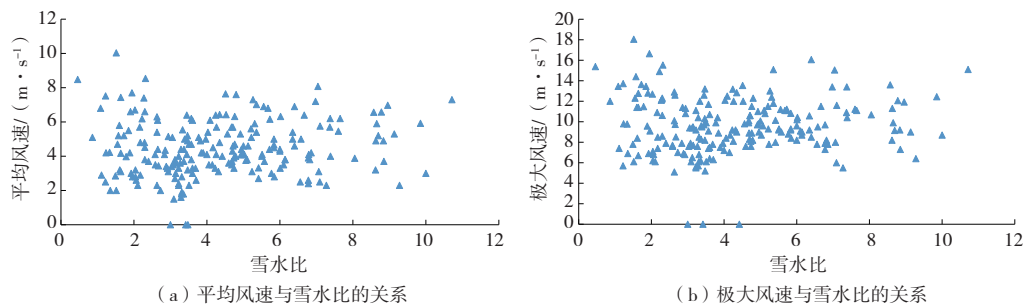


图 8 风速与雪水比关系
Fig.8 Relationship between wind speed and SLR

6 结论

通过研究 2021 年 11 月 6—8 日山东极端暴雪过程雪水比的分布特征和影响因子,得到以下主要结论:

- (1)此次过程平均雪水比总体呈“北大南小、西大东小”的水平分布;整个降雪过程的雪水比随时间呈增大趋势,降雪初期雪密度较大,产生小的雪水比,降雪中后期雪密度较小,产生大的雪水比。
- (2)雪水比小的站点温度偏高,环境配置利于

针状、片状等小冰晶的形成和增长,产生的积雪较浅;雪水比大的站点温度偏低,环境配置利于枝状、扇状等大冰晶生长,能够更好地维持大冰晶的结构和形态,产生的积雪较深。雪水比受云内冰、水含量共同影响,在此次降雪过程中,云内冰相粒子含量均较高,但云内液态水含量高的地区雪水比较小,云内液态水含量低的地区雪水比较大。

(3) 云下温度偏高的观测站,雪花下降过程会发生融化,导致雪密度增大,产生的雪水比小,积雪深度较浅;云下温度偏低的观测站,雪花下降过程中不易融化,利于维持雪花原有的形态,雪密度不易发生较大变化,产生的雪水比更大,积雪深度较深。

(4) 地面 2 m 气温、0 cm 地温与雪水比呈负相关,其中地面 2 m 气温与雪水比的相关系数最大;积雪产生之后,0 cm 地温与雪水比变化无明显相关。风速与雪水比呈极弱相关或无相关,随着风速增大其相关性呈先减小后增大的变化趋势。

致谢:感谢山东省气象台杨成芳研究员级高级工程师在研究方法上给予的指导与帮助。

参考文献:

- [1] 时兴合,王振宇,戴升,等.青海南部冬春季雪灾的气候诊断与预测[J].冰川冻土,2012,34(6):1441-1448.
- [2] 李红梅,李林,高歌,等.青海高原雪灾风险区划及对策建议[J].冰川冻土,2013,35(3):656-661.
- [3] 魏凌翔,童金,邱学兴.安徽省积雪效率和积雪密度特征分析[J].气象与环境科学,2021,44(3):24-30.
- [4] 姜有山,束宇,李力,等.基于湿位涡和积雪效率的降雪预报技术探讨[J].气象科学,2017,37(5):659-665.
- [5] POTTER J G. Water content of freshly fallen snow: CIR-4232, TEC-569[R]. Toronto, ON, Canada: Meteorology Branch, Department of Transport, 1965.
- [6] ROEBBER P J, BRUENING S L, SCHULTZ D M, et al. Improving snowfall forecasting by diagnosing snow density[J]. Wea Forecasting, 2003, 18(2): 264-287.
- [7] 杨琨,薛建军.使用加密降雪资料分析降雪量和积雪深度关系[J].应用气象学报,2013,24(3):349-355.
- [8] 杨成芳,朱晓清.山东降雪含水比统计特征分析[J].海洋气象学报,2020,40(1):47-56.
- [9] 杨成芳,刘畅.一次江淮气旋暴雪的积雪特征及气象影响因子分析[J].气象,2019,45(2):191-202.
- [10] 高留喜,杨成芳,刘畅.山东一次极端雨雪过程积雪特征分析及模式产品检验[J].海洋气象学报,2022,42(4):58-66.
- [11] 陈双,符娇兰.华北地区雪密度不同的两次降雪过程对比分析[J].气象,2021,47(1):36-48.
- [12] 张亚妮,符娇兰,胡宁,等.华北中部平原地区一次降雪过程雪水比变化特征及成因分析[J].气象,2022,48(2):216-228.
- [13] 崔锦,周晓珊,阎琦,等.降雪含水比研究进展[J].气象,2017,43(6):735-744.
- [14] 郑丽娜,李恬,孙骞,等.2021年2月黄河中下游两次暴雪的相态转换特征及成因[J].海洋气象学报,2022,42(3):48-56.
- [15] 李燕,赛瀚,刘晓初,等.辽宁东南部一次强降雪天气的成因分析[J].海洋气象学报,2021,41(3):84-93.
- [16] ALCOTT T I, STEENBURGH W J. Snow-to-liquid ratio variability and prediction at a high-elevation site in Utah's Wasatch Mountains[J]. Wea Forecasting, 2010, 25(1):323-337.
- [17] MILBRANDT J A, GLAZER A, JACOB D. Predicting the snow-to-liquid ratio of surface precipitation using a bulk microphysics scheme[J]. Mon Wea Rev, 2012, 140(8):2461-2476.
- [18] FUKUTA N, TAKAHASHI T. The growth of atmospheric ice crystals: a summary of findings in vertical supercooled cloud tunnel studies[J]. J Atmos Sci, 1999, 56(12):1963-1979.
- [19] DUBÈ I. From mm to cm: study of snow/liquid water ratios in Quebec [EB/OL]. Quebec region: Meteorological Services of Canada, 2003. https://www.meted.ucar.edu/norlat/snowdensity/from_mm_to_cm.pdf.
- [20] LIBBRECHT K G. Ken Libbrecht's field guide to snowflakes[M]. Minnesota: Voyageur Press, 2006.
- [21] GRAY D M, MALE D H. Handbook of snow: principles, processes, management and use[M]. Toronto: Pergamon Press, 1981.
- [22] RAUBER R M. Characteristics of cloud ice and precipitation during wintertime storms over the mountains of northern Colorado[J]. J Climate Appl Meteor, 1987, 26(4):488-524.
- [23] 杨成芳,赵宇.基于加密观测的一次极端雨雪过程积雪特征分析[J].高原气象,2021,40(4):853-865.