

黄河宁蒙河段凌汛特征及成因分析

王文东¹ 张芳华¹ 康志明¹ 罗金秀² 陈 涛¹ 杨克明¹

(1. 国家气象中心, 北京 100081; 2. 西藏自治区气象台)

提 要: 利用 NCEP $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的 6 小时分析资料、常规气象观测资料和水文观测资料, 对黄河上游宁夏和内蒙古河段封、开河期的凌汛灾害特征和成因进行了天气动力学和热力学综合分析。结果表明: 宁蒙河段凌汛灾害是特定的气象、地理和水文条件所造成的; 封河主要是在经向型、开河在纬向型的有利大尺度环流形势下, 与冷暖空气的侵入、气温剧烈降升、大气与水体对流失热和增热密切相关; 气温的变化取决于温度平流和非绝热因子的作用, 冷暖空气的强弱则取决于涡度平流的作用。

关键词: 凌汛灾害 环流特征 诊断分析

Characteristics and Causes of Ice Flood in Ningxia-Inner Mongolia Section of the Yellow River Valley

Wang Wendong¹ Zhang Fanghua¹ Kang Zhiming¹
Luo Jinxiu² Chen Tao¹ Yang Keming¹

(1. National Meteorological Center, Beijing 100081; 2. Tibet Meteorological Observatory)

Abstract: During the season when the river water freezes or the river ice melts, ice flood disaster usually occurs in Ningxia-Inner Mongolia section of the Yellow River valley. Based on the meteorological and hydrological observations and NCEP/NCAR 6h analysis dataset of $1^{\circ}\times 1^{\circ}$, the characteristics and causes of the disaster are analyzed by thermodynamic and dynamic methods. The results indicate that the disaster occurs under some meteorological, geographical and hydrological conditions. The freeze-up/break-up is related closely to the cold/warm air incursion and abrupt decreasing/increasing of temperature under advantageous large-scale circulation. The temperature advection and diabatic factor have an effect on the

temperature change, while the intensity of the cold/warm air depends on the vorticity advection.

Key Words: ice flood disaster features of the general circulation diagnostic analysis

引 言

黄河上游的宁夏和内蒙古河段(以下简称宁蒙河段)地处黄河流域最北端。由于纬度高、冬季严寒而漫长,冰情严重(最低气温为 -35°C ,冰期长达约4~5个月,冰厚一般为0.7~0.8m,最厚可达1m以上)的气象和水文条件以及上游流经崇山峻岭复杂的河道形态,故该河段在12月上中旬封河期或3月初开河期因流凌或冰雪融化汇入河流,阻塞水道断面、壅水漫滩,造成淹地、围村凌汛灾害。这不仅对水电、水运交通等影响很大^[1],而且人民生命财产和工农业生产严重受损。据统计,较大范围决堤平均两年即有一次,1933年凌期淹没磴口县两岸300km;1950和1951两年内共决口15处;平均每年卡冰结坝约20多处,最多年份达40多处,冰坝长达数十公里,最大壅水高度6m以上;冰坝一般持续15小时左右,最长达2~3天^[2]。因此,在历史上和近代黄河凌汛灾害成为威胁最大灾害之一。

每年凌汛期,气象、防汛和水电部门均想了解黄河封、开河的早晚和凌险,以便早做安排。但黄河凌汛涉及到气象、地理环境、水文以及人为工程活动的因素和条件,预测较为困难。目前凌汛预报已成为气象服务的重要内容,但对凌灾成因和预报方法的分析研究却甚少。

本文利用NCEP $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的6小时分析资料、常规气象观测资料和有关水文观测资料,运用天气动力学和热力学方法,对黄河宁蒙河段凌汛特征和凌灾成因进行综合分析研究,以探讨凌灾形成的物理条件,为冰凌

预报提供参考依据。

1 宁蒙河段凌汛的特征

宁蒙河段的凌汛和伏秋大汛均是一种涨水现象,但形成原因和涨水过程并不相同。凌汛是河道封冻之后阻拦一部分上游来水,使河槽蓄水水位上涨,开河时这部分蓄水急剧释放,向下推移,沿程冰水越积越多形成凌洪,凌洪流量向下传播是一递增过程。在产生冰凌的河道里,冰凌施加给水流的阻力作用,在流量相同时水位比无冰期时高得多,有时流量虽比无冰期小得多,但水位却比无冰期高,这就是凌洪威胁大于伏汛期的原因之一。

我国北方河流冬季会出现封冻,黄河宁蒙河段在多数年份均要封河并产生凌汛。产生凌汛的自然条件是:

1.1 上段河道气温较下段高

黄河上游河道自甘肃兰州附近(36.03°N)转向东北流动后,沿程纬度不断增高,最北端内蒙古临河地处 40.45°N ,北进了将近4.5个纬距。由于纬度差异,上段河道气温明显高于下段河道。例如,1971~2000年11月~3月兰州月平均气温分别比包头高 4.3°C 、 4.1°C 、 5.8°C 、 5.8°C 和 4.7°C 。从而使黄河宁蒙段冰凌产生和消融过程有三个特征:(1)封河时,下段河道早于上段,通常宁蒙河段流凌封冻比兰州早20多天。(2)开河时,下段河道晚于上段,宁蒙河段开河比兰州晚一个多月。(3)冰盖厚度,一般下段河道大于上段。

冬季,纬度较高的下段河道首先封河,

因冰凌的阻水作用,河道泄流不畅,使上游来水蓄存河槽中。翌年春季开河,通常上段河道首先开河,下段尚未解冻河段水位上涨,增强开河的水力作用,解冻开河的速度加快,河槽中冰水释放速度亦加快,水力作用更强,这样持续反复使冰水越聚越多,流速越来越快,最终形成来势凶猛的凌洪;若下段河道气温低,冰厚和冰的强度大,水力作用不能使之解冻开河,极易卡塞流冰,阻碍上游大量冰水下泄,迫使河道水位急剧上升,出现严重的凌汛威胁。

1.2 上段河道地形比降较下段大

黄河源于巴颜喀拉山,上游从源头到青铜峡 2604km 河道中,比降 $>1.27\%$;中游从青铜峡至桃花峪 2092km 河道中,比降为 0.5% 左右^[3]。黄河凌汛最危险的内蒙古磴口到托克托,河段长 504km,落差 63m,比降 0.12% ,是黄河比降最小的河段之一。但位置最北,气温最低,河道开阔,比降小和流速小,河水易于冻结,是最先封冻和最后开河的河段,为开河卡冰结坝形成了有利条件,历年凌汛极为严重。

1.3 上游来水的不稳定

黄河上游凌汛期,上游来水经常是一个从小到大的过程,是加重汛情之原因。主要表现:(1)在相同气温条件下,凌汛初期流量小便会早封河,而且冰盖低,冰下过水能力小,后期来水渲泄不畅,增大河槽蓄水量,易造成冰凌卡塞。(2)小流量通过后,上游来水逐渐增大,水位上升会使尚未封河河段的大块岸冰脱岸,易在河势不顺的河段卡塞,形成封河。(3)河道稳定封河后,当上游来水有较大幅度增长,在气温尚低、冰质较强的情况下导致被迫开河的严重凌汛。冰凌不能畅通下移,卡塞在未开通河段,造成严重阻水;当流量又减小时,冰凌将再从

卡塞段继续向上游延伸,几经反复,形成严重凌汛威胁。此外,河套地区为古湖盆冲积平原^[4],土堤是黄河岸边唯一保护屏障。当发生凌情时,具有很大冲击力的冰水会漫堤决口,酿成凌灾。

2 宁蒙河段封、开河凌汛气象条件分析

凌洪灾害在每年封河初期和解冻开河时期都会发生。虽影响开、封河因素较多,但气温的变化则是关键因素。经对 1995~2004 年共 10 年宁蒙河段封、开河期引起温度剧变的环流形势普查分型,从中各选取 3 个典型相似个例进行合成分析,环流特征概述如下:

2.1 封河期环流特征

每年初冬,当河流水体温度稍低于 0°C ,即出现岸冰、水内冰和流凌,是水体与大气对流失热所致,与冷空气入侵、气温陡降相关。封河期欧亚中高纬有两种不同环流形势。

(1) 经向型,该型占 75.9% 。封河前 4~5 天(图 1a),欧亚中高纬为两槽一脊经向环流型。长波脊(阻高)位于乌拉尔山,长波槽分别在西伯利亚中东部和欧洲;中低纬块状副热带高压在台湾以东洋面,南支槽位于印度半岛到孟加拉湾。黑海一带暖平流使乌拉尔山高压脊经向发展,在高压脊东北部或东西伯利亚冷涡中有小槽沿脊前偏北或东北气流向东南或西南移动,移至中西伯利亚即成一深厚的大槽;700hPa 上中纬锋区达 5 个纬距,温差 13°C ;地面图上蒙古冷高压迅速增强至 1050hPa 以上,在高压前部常生成蒙古气旋。高压前部冷锋侵入我国北方,较强冷空气给黄河中上游地区带来大风降温天气。

(2) 纬向型,该型占 24.1% 。封河前 4

~5 天，欧洲西部以西为一 NW—SE 向的高压脊，东欧至亚洲出现一 W—E 向的低压带（图 1b），其中有 3~4 个低压中心，低压带南部的纬向锋区上不断有短波槽东

移，带来一股股冷空气连续沿河套及以东地区南下，使内蒙古河段的气温持续下降并自下而上逐级封冻，极易在河道中卡冰结坝，造成凌灾。

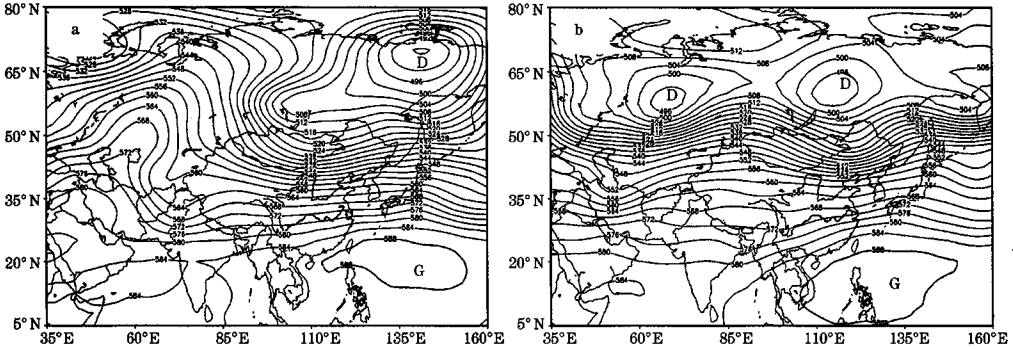


图 1 黄河宁蒙河段封河期 500hPa 经向 (a) 和纬向 (b) 环流形势

2.2 开河期环流特征

翌年开春，当气温升至 0℃ 以上，冰层融消，是暖空气活动起主要作用。开河前，欧亚中高纬环流也有两种类型。

(1) 纬向型，此型占 63%。开河前 4~5 天，500hPa 上（图 2a）欧亚大陆环流呈纬向形势。在高纬带状低槽中有 3~4 个低压中心，中纬度盛行西风或西南偏南气流。带状副高在 22°N 以南的南海到菲律宾以东洋

面；孟加拉湾南支槽较深厚，槽前到副高西北侧有一支强西南气流向北输送，促使我国中东部形成一暖性高压脊，在中低层常有暖性低涡或低压环流相伴。这股干暖气流的持续作用使黄河中上游大陆暖性高压稳定少动，对开河极为重要。东西伯利亚低槽后部偏北气流与东亚大槽后部西北气流在 130°E 以东形成一宽槽，这对大尺度环流形势稳定起了积极作用，同时高空偏北气流下沉增温也利于宁蒙河段冰的融化。里海和咸海附近

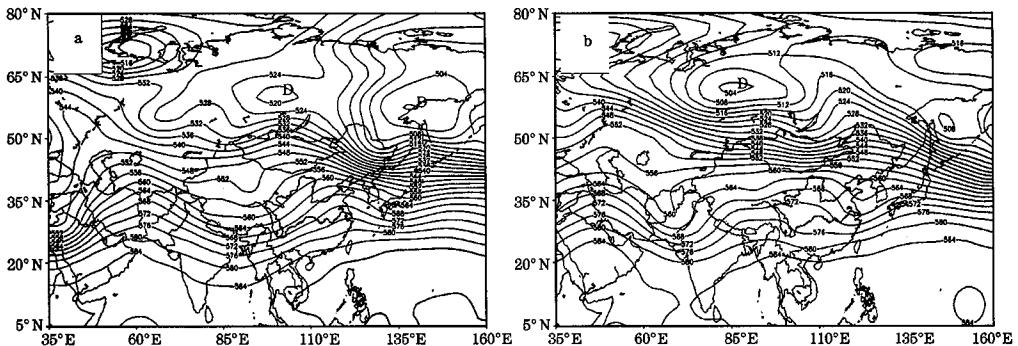


图 2 黄河宁蒙河段开河期 500hPa 纬向 (a) 和经向 (b) 环流形势

高压脊前的西北气流与南支槽后的西北气流汇合, 出现强冷平流, 与槽前强暖平流共同作用, 促使南支槽发展并稳定, 有利于槽前暖平流维持和向北输送。

(2) 经向型, 此型占 37%。开河前 4~5 天, 欧亚中高纬多为一槽两脊经向环流。长波槽位于乌拉尔山到贝加尔湖 (图 2b), 长波槽中有一部分气流沿里海、咸海高压脊前流向低纬, 同副热带高压西北侧西南气流在孟加拉湾形成南支槽。槽前的干暖西南气流持续向北涌进黄河上中游, 引起该地气温剧升, 在热力和水力因素作用下, 河道中冰盖破裂, 形成流冰, 即解冻开河。

3 宁蒙河段凌汛气象物理成因分析

利用 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 的 6 小时资料计算典型个例 1998 年 12 月上中旬封河和 1991 年 3 月上旬开河与温度相关的几个物理参数, 用以分析诊断凌汛的气象物理成因。

3.1 封河期热力学诊断分析

3.1.1 温度平流

温度平流的作用主导气温变化。从 1998 年 12 月 9~16 日宁蒙河段平均温度平

流时间-高度剖面图 (图 3a) 可看出, 在内蒙古乌拉特前旗等河段 14 日封河前 5 天, 对应着偏心于亚洲北部的极涡在 300hPa 以上层有 3 个冷温度平流中心, 以 13 日 20 时 200hPa 上的中心值 $-34.5 \times 10^{-5} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$ 最强, 高层强冷平流下传至中低层也形成冷平流中心。揭示了从中西伯利亚低涡中相继有 3 股冷空气连续入侵宁蒙黄河流域。与高层温度平流中心对应应有 3 个负涡度平流中心 (图 3b), 14 日 08 时 250hPa 附近的中心最强, 达 $-39.3 \times 10^{-10} \text{s}^{-2}$, 强负涡度平流的作用促使高层偏北风加大, 冷温度平流加强, 低涡发展。从平均垂直速度场 (图略) 可看到, 除低层有小范围的弱上升运动外, 几乎整层都为下沉运动区, 偏北下沉气流把高层极涡中的冷空气带到中低层, 引起近地层气温持续下降。

3.1.2 热源分析

非绝热因子作用也主导气温变化。视热源 Q_1 的计算方案^[5]为:

$$Q_1 = C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T + \left(\frac{p}{p_0} \right)^{R/C_p} \omega \frac{\partial \theta}{\partial p} \right]$$

计算结果表明: 温度局地变化项表征气温日变化规律, 温度水平平流项已讨论, 故着重分析其第三项垂直输送项的作用。

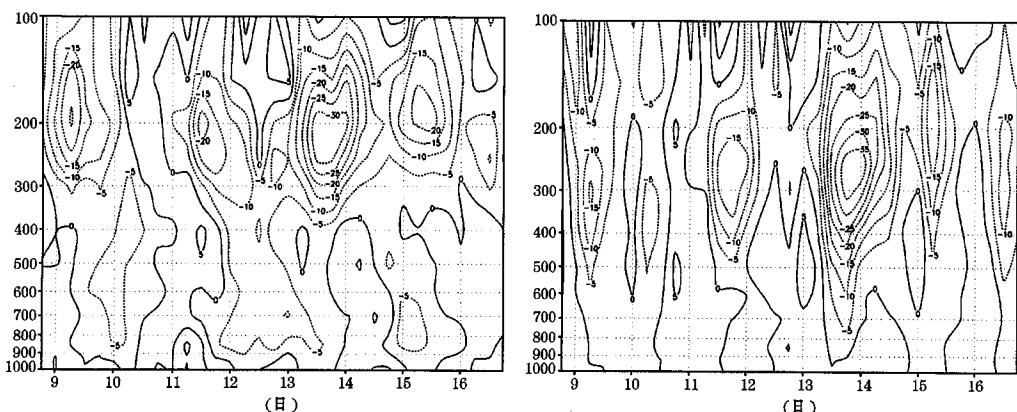


图 3 1998 年 12 月 9~16 日宁蒙河段封河前后区域平均温度平流 (a, 单位: $10^{-5} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$) 和涡度平流 (b, 单位: 10^{-10}s^{-2}) 时间-高度垂直剖面图

在封河前5天，伴随高层冷空气向中低层侵入，整层出现降温区（图4），相应3次冷空气有3个降温中心均位于700hPa上，以14日08时的中心值 $-3.1\text{K}\cdot(6\text{h})^{-1}$ 最强，中低层气温不断降低，使河段水体温度

降至 0°C 以下封河。

3.2 开河期热力学诊断分析

3.2.1 温度平流

从1991年3月2~9日宁蒙河段平均温度平流时间-高度垂直剖面图（图5a）可见，内蒙古磴口等河段7日开河前5天，除2~5日在400hPa以上高层为冷温度平流外，400hPa以下均为暖平流并向高层输送，5日08时开始，整层都为强暖平流，有两个中心分别在500hPa和200hPa上，数值分别为 $11.7\times 10^{-10}\text{s}^{-2}$ 和 $26.7\times 10^{-10}\text{s}^{-2}$ 。对应5~7日200hPa以下的正涡度平流（图5b），有利于南支槽发展和槽前偏南风加大及暖平流加强，并有强上升运动区配合，500hPa上的垂直速度极值为 $-0.3\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ （图略）。这反映了南支槽前的暖空气强而持续，不断往北向宁蒙河段及从低层向高层输送。

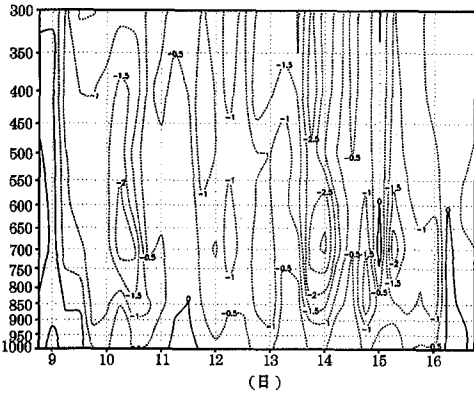


图4 1998年12月9~16日宁蒙河段封河前后区域平均视热源加热垂直输送项（单位： $\text{K}\cdot(6\text{h})^{-1}$ ）时间-高度垂直剖面图

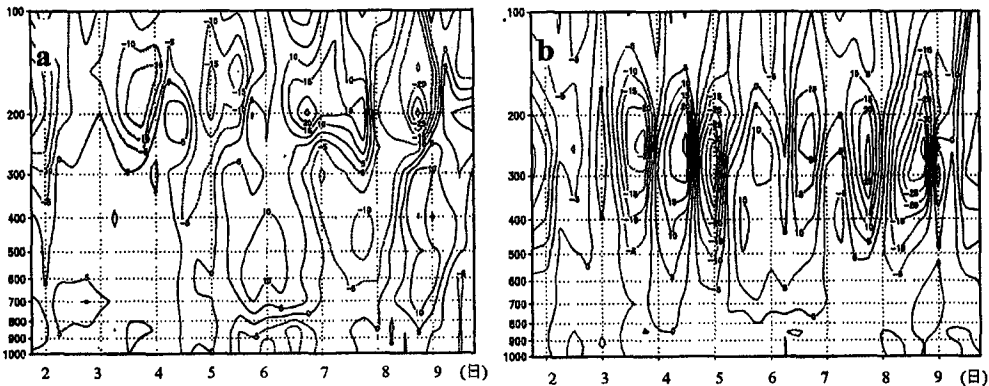


图5 1991年3月2~9日宁蒙河段开河前后区域平均温度平流（a，单位： $10^{-8}\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ ）和涡度平流（b，单位： 10^{-10}s^{-2} ）时间-高度垂直剖面图

3.2.2 热源分析

开河期，大气视热源 Q_1 垂直输送项计算结果如图6显示。2~5日，受弱冷空气影响，有3个减温区，除2日近地层降温不足 $1\text{K}\cdot(6\text{h})^{-1}$ 外，其余2次无降温，因

400hPa以下受弱暖平流控制。5日14时至7日，南支槽前干暖西南气流加强，不断向黄河上游推进，较强上升运动（图略）把移至宁蒙河段中低层的干暖空气抬升到高层，造成整层明显增温，加热中心在600hPa

上, 极值达 $4.9\text{K} \cdot (6\text{h})^{-1}$, 连日持续升温造成宁蒙河段解冻开河。

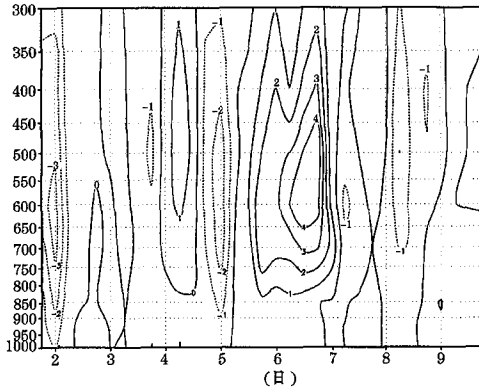


图 6 1991 年 3 月 2~9 日宁蒙河段开河前后区域平均视热源加热垂直输送项 (单位: $\text{K} \cdot (6\text{h})^{-1}$) 时间-高度垂直剖面图

4 结 论

(1) 黄河宁蒙河段的凌汛灾害是黄河上游的上段河道气温比下段高, 地形比降较下段大和上游来水不稳定性的特定气象、地理及水文条件所造成的。

(2) 宁蒙河段凌汛灾害发生在历年封河

和开河期间, 与高纬冷空气频繁入侵及低纬强暖空气向北涌进, 引起气温剧烈升降, 大气和水体对流失热和增热密切相关。封河期欧亚大尺度环流以经向型为主, 占 75.9%; 开河期以纬向型为主, 占 63.0%。

(3) 影响宁蒙河段开、封河的关键因子是气温的变化, 与冷暖空气活动的频次和强度有密切关系, 气温变化取决于温度平流的性质和强度及其非绝热因子的作用; 冷暖空气的强弱决定于涡度平流的作用。

参考文献

- 1 王玉玺, 陈凡凡. 松花江流凌预报方法. 气象, 1995, 21 (2): 32~35.
- 2 张遂业. 黄河上游河段冰凌预报模型. 甘肃水利水电技术, 1997, (4): 18~26.
- 3 宫德吉, 白美兰, 王秋晨. 黄河凌汛及其研究. 气象, 2001, 27 (5): 28.
- 4 张有实. 黄土高原地区综合治理开发. 自然杂志, 1990, (10): 3~30.
- 5 Luo H B, Yanai M. The large-scale circulation and heat sources over the Tibetan plateau and surrounding areas during the early summer of 1979. Part II. Heat and moisture budgets. Mon Wea Rev, 1983, 111: 966~989.