

文章编号:1005-0930(2024)06-1707-013 中图分类号:P341 文献标识码:A
doi:10.16058/j.issn.1005-0930.2024.06.013

河冰系统混沌特征演变分析

邢若飞^{1,2}, 陈泽峰¹, 郝洁³, 刘文斌⁴, 鞠琴¹

(1.河海大学水灾害防御国家重点实验室,江苏 南京 210029;2.河海大学商学院,江苏 南京 210029;3.南京水利科学研究院,江苏 南京 210098;4.松辽委水文局(信息中心),吉林 长春 130021)

摘要:河冰生长消融机理对冰凌灾害预警具有重要的指导作用,明确河冰是否存在混沌特性对理解河冰生长消融物理机理具有理论意义.为了全面解析河冰内部能量分布特征,选取黑龙江干流上游漠河断面作为研究对象,对2014~2018年江边层温和江心层压以及气温进行原型观测,采用混沌学理论,对河冰系统进行混沌特性演变分析,结合原型观测确定河冰系统线性和非线性转变时间.研究表明:河冰层温/层压在封冻期呈有序状态,而在融冰状态呈明显的无序状态;在封冻期最大Lyapunov指数大多小于0,部分大于0的时段主要集中于14~16时,在河冰融冰阶段均由负转正,呈现混沌特性;最大Lyapunov指数转正日期与平均气温转正日期较为接近,即当平均气温大于0°C时,河冰由线性热传导转为非线性热传导.该研究揭示了河冰生消融期层温的混沌特征及演变规律,为寒区水资源管理提供理论支撑.

关键词:黑龙江干流;漠河;河冰;层温;最大Lyapunov指数;混沌特性

河冰是冰冻圈^[1-2]重要的组成部分之一^[3-5],主要分布于中高纬度和高海拔地区^[6],我国北纬30°以北大部分河流在冬季均存在封冻情况^[7].河冰主要受热力因素控制^[8],随着春季气温升高,持续的热量交换会改变河冰内部结构进而导致河冰消融^[9],加之水位的雍高^[10],从而引发冰凌洪水这一自然灾害.由此可见,尽管河冰的形成成为某些地区两岸人民在冬季的通航提供了一定的便利,但与之相关的冰凌洪水仍然会对两岸人民的生命财产安全造成巨大的威胁.因此,研究河冰内部演变规律对提高河冰消融物理机理的理解以及冰凌洪水预测的准确性都具有重要的理论价值和现实意义.

河冰演变过程的本质主要是气-水(气-冰-水)热量交换的过程^[11],是河冰内部能量变化引起的河冰状态的改变^[12].河冰层温是河冰内部能量的直接体现^[13],对于冰层温度的研究目前国内外有所报道.卢志明等^[14]以石佛寺水库的河冰和乌梁素海的湖冰为例,对观测期的冰温剖面进行了统计,并分析了各情形发生下的气候条件. Benjamin等^[15]测量了格兰陵岛冰盖的三维冰温走向,对比分析了纵/横向的冰温差异以及热量对其影响.这些研究主要侧重冰层温度的分布形式以及气候条件的影响,鲜少存在层温状态是否有

序以及混沌程度的报道.河冰层温是否有序也意味着此刻河冰是否存在混沌特性.熵增现象在自然界中是普遍存在的^[16-17],系统是否存在混沌特性表明此刻是否呈非线性状态.在河冰生长消融过程中,河冰、大气与冰下水形成一个以河冰为主体的动力系统^[18].在生长过程中河冰系统的状态并不总是线性或非线性状态,系统状态决定了在数值模拟中采用的方法,因此准确判定河冰系统的类型无疑是河冰数值模拟领域的关键科学问题.

黑龙江干流是中俄两国的界河,每年冬天都有河冰现象发生^[19-20].然而,设备和环境的限制无疑增大了对黑龙江干流河冰冰情开展长期观测的难度.此外,黑龙江干流上游人烟稀少,受人类活动影响较小^[21],选取黑龙江干流上游作为研究对象可以更好地观测到河冰的自然生长.鉴于上述的研究背景和空白,选取黑龙江上游漠河断面作为研究对象,基于2014~2018年河冰和气象观测资料,采用混沌学理论对河冰进行混沌特性分析,并对比混沌指数与河冰消融时间以及气温发生时间,解析河冰的混沌特性在时间尺度上的演变特征以及其与气温的相关关系,以揭示消融期河冰内部的演变规律.

1 区域概况及研究方法

1.1 研究区域

黑龙江干流(阿穆尔河)是世界上最大的国际界河^[22],位于北纬 50° 以上,流经蒙古国、中国和俄罗斯.黑龙江水系是东亚流域面积最广阔的水系,流域面积为 $184.3 \times 10^4 \text{ km}^2$.黑龙江干流上游自洛古河村至黑河附近的结雅河口,全长为900km,整个上游流域面积为 $72.5 \times 10^4 \text{ km}^2$.黑龙江干流上游河床崎岖多变,河道狭窄曲折,比降变化较大,水流流态沿程分布不均^[23].黑龙江干流上游漠河段由于特殊的河流地貌,使得其成为历史上春季凌汛灾害发生频率较高、受灾较为严重的地区.在2000~2020年发生过严重的凌汛灾害,这些灾害事件平均持续时间为2~3d,对黑龙江干流上游漠河段周边地区的农业、经济和人民生命安全造成了严重的威胁^[24].

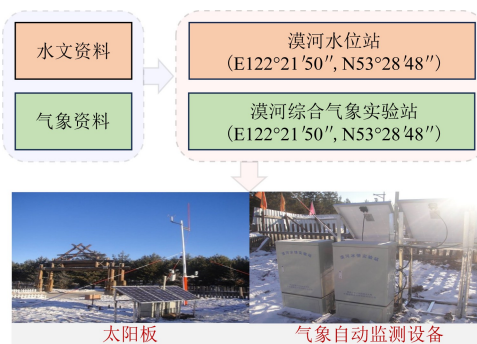


图1 黑龙江干流研究河段站点分布

Fig.1 Distribution of sites in the study area

基于黑龙江干流上游漠河水位站观测数据开展了河冰生长消融过程的内部物理机理研究.漠河水位站为我国最北端的测站(图1),位于黑龙江省漠河县北极村($E122^{\circ}21'50''$, $N53^{\circ}28'48''$),设立于1957年5月,该测站断面位于额尔木尔河河口下游,水流平稳.漠河站多年平均封冻日期为11月11日,平均封冻天数为171d,平均最大冰厚为1.08m^[25],主要为温寒带大陆性季风气候,平均气温为 -2.1°C ,年平均降水量保持在约460mm^[26-27].

1.2 数据

漠河河冰观测位于黑龙江干流漠河断面,采用R-T-O全天候冰雪监测设备(图2),在河冰稳封期将传感器放置于江面同一断面上,分别在江边和江心布设两处监测点.其中,在江边采集的是冰层温度数据,在江心采集的是电压数据.层温设备自空气到冰层、从上

到下一共采集了 200 个逐时数据,梯度间隔为 1cm,75cm 处为空气与冰的界面;层压设备在空气与水之间,采用水、冰、空气电压的不同对三者进行区分;采集时间一般从每年 12 月到次年 3 月末.此外,监测点安装了自动气象监测设备,主要监测雪深、辐射、2m 高的温度等逐时气象数据,监测时间为 2013~2018 年.主要采用河冰逐时层温/层压数据及逐时气温数据.

1.3 研究方法

自然复杂系统的发展规律研究一般采用混沌理论,以混沌理论为核心的非线性成为水文时间序列研究的主要方向.混沌理论在 1987 年由 Hense^[28] 将其引入到水文领域,随后在洪水系统混沌识别以及降雨混沌特性识别方面都得到了进一步的发展^[29-33].在传统的混沌特性分析方法中,最大 Lyapunov 指数应用最为广泛.

由于河冰在生长消融中并不总是处在一个稳定的线性状态,可能具有混沌现象.为了探究其是否存在混沌特性,采用最大 Lyapunov 指数方法对自稳封期至融冰初期垂直长度为 200 的层温/层压数据进行逐时逐日混沌指数计算,基于逐时逐日最大 Lyapunov 指数分析河冰内部混沌特性随时间的变化规律.此外,根据原型观测对河冰层温/层压的最大 Lyapunov 指数转负时间与各气温(河冰稳封期至融冰初期内平均气温、最高气温和最低气温)出现时间和气温转正时间、河冰达到最大冰厚时间以及开始融冰时间(基于河冰厚度变化)进行对比分析,最终得到河冰混沌特性演变特征、融冰时间与气温发生时间之间的相关规律,从而得到生长消融过程中河冰内部物理机理特征.

1.4 河冰层温/层压空间重构及混沌特征识别

1.4.1 C-C 法重构空间 混沌时间序列需要在相构空间中进行研究,相构空间重构是混沌系统分析中最重要的一步,C-C 法通过嵌入时间序列的关联积分来构造统计量,可以节省计算时间^[34].根据 $\bar{s}(\tau)$ 、 $\Delta\bar{s}(\tau)$ 和 $s_{cor}(\tau)$ 这 3 个统计量^[35] 和延迟时间 τ 来确定最佳

延迟时间 τ 和嵌入窗口 τ_w ,最后根据 $m = \text{int}\left(\frac{\tau_w}{\tau} + 1\right)$ 计算出的数值向下取整得到嵌入维数 m .其中, $\bar{s}(\tau)$ 、 $\Delta\bar{s}(\tau)$ 和 $s_{cor}(\tau)$ 反映的是时间序列自相关性,则当 $\bar{s}(\tau)$ 第 1 次过 0 或 $\Delta\bar{s}(\tau)$ 的第 1 个局部极小值时,取二者对应的最小 τ 值为最佳延迟时间,当 $s_{cor}(\tau)$ 的全局最小值对应的 τ 为最佳嵌入窗宽.

1.4.2 最大 Lyapunov 指数 在一维动力系统 $x_{n+1} = F(x_n)$ 中,初始两点迭代后互相分

离还是靠拢,关键取决于导数 $\left|\frac{dF}{dx}\right|$ 的值.若 $\left|\frac{dF}{dx}\right| > 1$,则迭代使得两点分开;若 $\left|\frac{dF}{dx}\right| < 1$,则

迭代使得两点靠拢.在不断的迭代过程中, $\left|\frac{dF}{dx}\right| < 1$ 的值也随之而变化,呈现出时而分离时

而靠拢的变化趋势.为了表示从整体上看相邻两个状态反而情况,必须对时间(或迭代次数)取平均.不妨设平均每次迭代所引起的指数分离中的指数为 λ ,于是原来相距为 ε 的两点经过再次迭代后距离为

$$\varepsilon e^{n\lambda(x_0)} = |F^n(x_0 + \varepsilon) - F^n(x_0)| \quad (1)$$

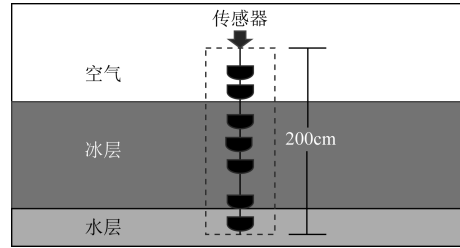


图2 R-T-O 全天候冰雪监测设备安置示意

Fig.2 R-T-O equipment placement

取极限 $\varepsilon \rightarrow 0, n \rightarrow \infty$, 则变为^[36]

$$\lambda(x_0) = \lim_{n \rightarrow \infty} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{n} \ln \left| \frac{F^n(x_0 + \varepsilon) - F^n(x_0)}{\varepsilon} \right| = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \ln \left| \frac{dF^n(x_0)}{dx} \right|_{x=x_0} \quad (2)$$

简化为

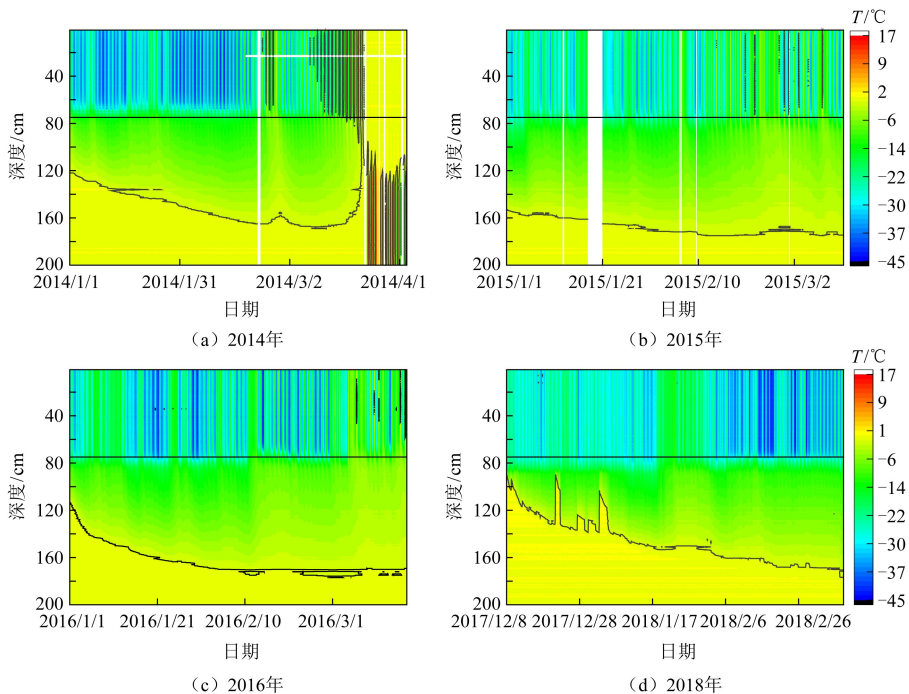
$$\lambda(x_0) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \ln \left| \frac{dF^n(x_0)}{dx} \right|_{x=x_0} \quad (3)$$

式中: λ 与初始值的选取没有关系, 称为原动力系统的 Lyapunov 指数, 其表示系统在多次迭代中平均每次迭代所引起的指数分离中的指数. 当 $\lambda < 0$, 表示相邻点最终会运动到一点, 此时系统是稳定的不动点和周期运动; 当 $\lambda > 0$, 则表示相邻点最终要分离, 此时产生轨道的局部不稳定, 如果轨道还有整体的稳定因素 (如整体有界、耗散、存在捕捉区域等), 系统要在有限的几何对象上实现指数分离, 必须无穷次折叠, 因此 $\lambda > 0$ 可以作为是否产生混沌行为的依据. 在 1983 年, 格里波基证明只要最大 Lyapunov 指数大于 0 就可以肯定系统混沌性的存在. 因此实际问题中, 只需要计算最大 Lyapunov 指数, 即当最大 Lyapunov 指数大于 0 时, 则系统会产生混沌行为.

2 结果

2.1 河冰层温/层压分布特征

图 3 展示了 2014~2018 年河冰层温分布特征. 2014 年河冰层温数据是从稳封期到融



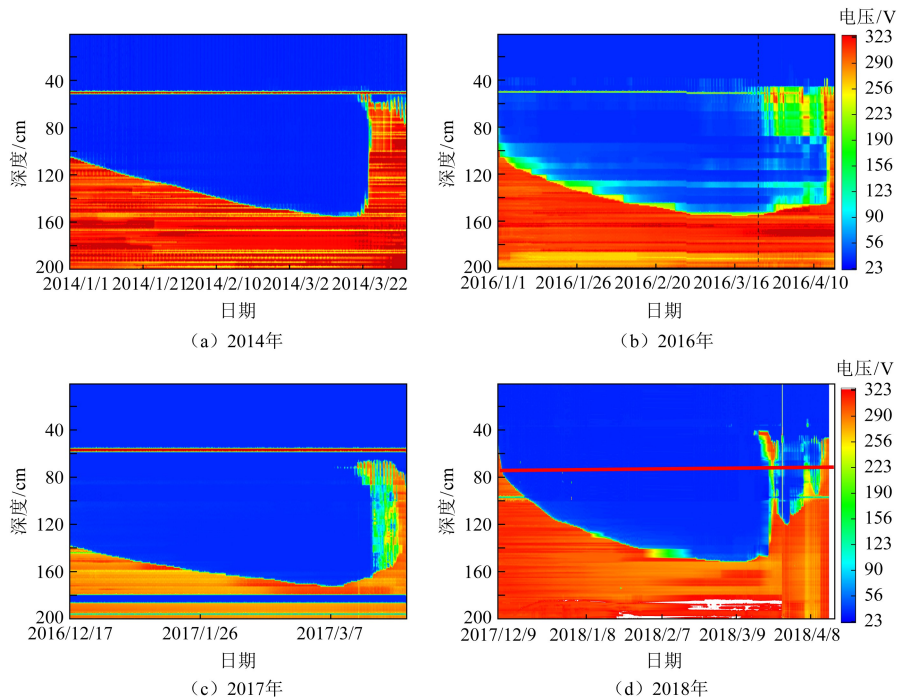
注: 75cm处黑色实线为气-冰的交界线; 75cm以下绿色部分为河冰, 黄色部分为水; 75cm以上为空气.

图 3 黑龙江干流漠河断面 2014~2018 年河冰层温分布

Fig.3 Layer temperature of the Mohe section from 2014 to 2018

冰期(图 3(a)),其余年份由于仪器及环境问题只有封冻期的层温(图 3(b)~图 3(d)).层温/层压随时间的分布呈现出河冰的生长过程,冰下的 0℃ 温度线在 3 月中旬前均呈下降趋势,这表明江边河冰在大概 3 月初开始停止生长,最大冰厚达到 100cm 以上;直到 3 月中旬之前均处于稳定阶段;随后在 3 月下旬后急剧上升,3 月末、4 月初的层温变化非常剧烈,这表明此时河冰内部的分子运动强烈,热量流向复杂,呈现出明显的混沌特征;观测数据显示在河冰生长消融过程中,冰-水分界处出现 2~3cm 厚的冰水混合物层.此外可以看到,在 2014 年 2 月下旬(图 3(a))以及 2015 年 3 月上旬(图 3(b))气温出现了突然升高的情况,几日后层温也出现相应的升高,这意味着尽管河冰对气温的响应存在着时间差,但是滞后时间较短,总体上河水对气温较为敏感.

图 4 展示了 2014~2018 年江心电压的变化过程.收集到 2014 年、2016 年、2017 年以及 2018 年从稳封期到融冰期的数据.与江边层温展示的河冰过程一致,江心河冰在 3 月初之前几乎呈匀速生长,在 3 月初时停止生长或以极为缓慢的速率生长,直至停止生长,到 3 月下旬开始融冰.电压的变化很好地展示了融冰后期河冰内部开始紊乱的情况.从层压分布图(图 4)中也可以看到,冰体与水体之间存在着冰水混合物层,这与江边层温的结果一致;不同的是,江心冰厚比江边冰厚略薄,约为 90cm.



注:在60~80cm处的彩色带为气-冰的交界处;红色实线以上的蓝色部分为空气;实线以下的蓝色部分为河冰;大面积的红色部分为水体;在3月末、4月初的彩色部分为水冰混合体.(d)为数据由于仪器问题没有识别出河冰与空气的界限,该界限则根据仪器传感器与河冰安装距离(75cm处)进行人工确定;在打孔初期仪器不稳定,因此会出现水高于冰的现象.

图 4 黑龙江干流漠河断面 2014~2018 年河冰层压分布

Fig.4 Layer voltage of the Mohe section from 2014 to 2018

2.2 层温/层压最大 Lyapunov 指数分布特征

为了进一步解构在河冰生长消融中实验观测结果展示的秩序性,基于观测的层温/层压数据以及混沌学理论和熵增定律,采用最大 Lyapunov 指数解析河冰内部层温/层压在生长消融过程中的混沌特征.图 5 展示了 2014 年、2015 年、2016 年以及 2018 年的最大 Lyapunov 指数随时间的演变特征.由于数据采集问题,除了 2014 年采集到完整的消融过程的数据外,其余年份均只采集到了结果,表明这 4 年在 3 月中旬之前最大 Lyapunov 指数几乎小于 0,这表明河冰系统在 3 月中旬(即处于河冰生长阶段)大部分呈现出有序状态,只有在少数时间显示混沌特征.值得注意的是,3 月中旬之前最大 Lyapunov 指数随着时间变化而不断趋近于 0.2014 年最大 Lyapunov 指数在 3 月 23 日 7:00 之后全部大于 0 (图 5(a)),此时河冰已经进入到融冰阶段,并且河冰系统已经完全处于混沌状态,分子运动不再有序,与层温分布特征一致.

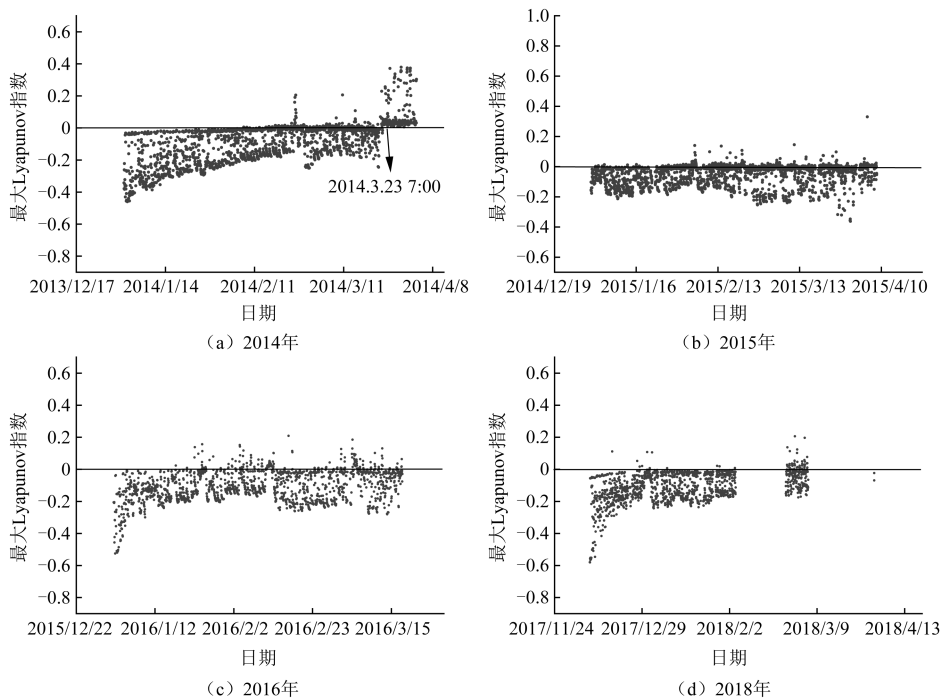


图 5 2014~2018 年江边层温逐时最大 Lyapunov 指数过程

Fig.5 The hourly largest Lyapunov exponent of riverside from 2014 to 2018

图 6 展示了江心逐时最大 Lyapunov 指数过程.计算结果表明在 2014 年 3 月 23 日 15:00(图 6(a))、2016 年 3 月 31 日 13:00(图 6(b))、2017 年 3 月 15 日 20:00(图 6(c))以及 2018 年 3 月 28 日 12:00(图 6(d))4 个时间节点后最大 Lyapunov 指数完全大于 0,表现出明显的混沌特征,在此之前则大部分小于 0,这些与观测到的层压分布特征一致.由此可得,江心河冰系统在这些时间节点之前以线性为主,而在该时间节点后完全呈非线性状态.结果表明,在河冰生长阶段大部分时间河冰系统处于稳定状态,而在河冰消融阶段,河冰系统则表现出明显的混沌特性.

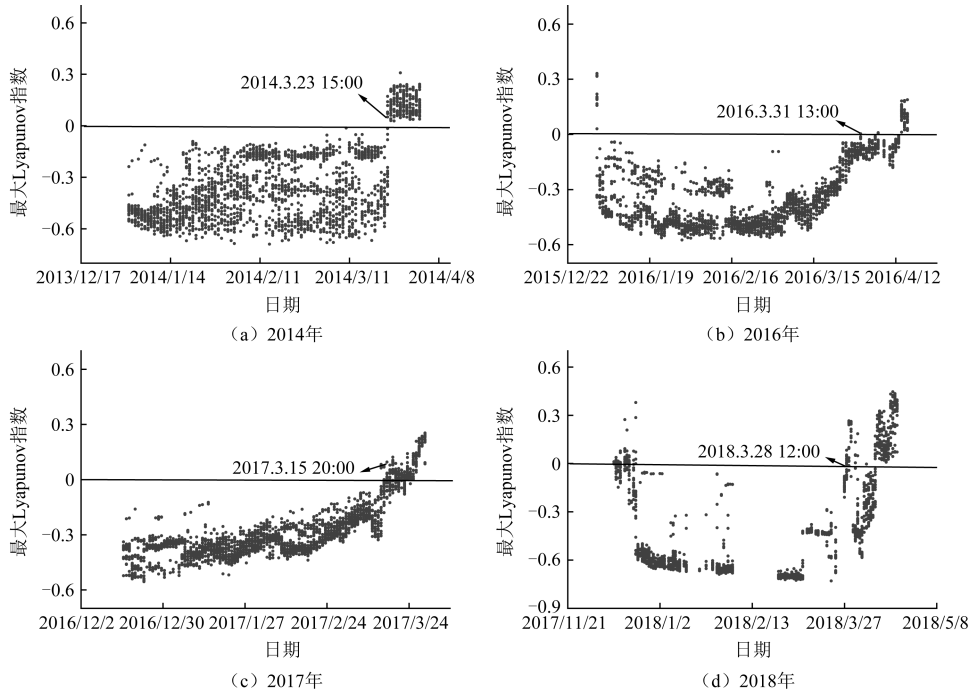


图6 2014~2018年江心层压逐时最大Lyapunov指数过程

Fig.6 The hourly largest Lyapunov exponent of the middle of river from 2014 to 2018

2.3 原型观测统计规律

为了观测河冰冰层逐日混沌特性变化过程,对逐日最大Lyapunov指数进行统计分析.如图7所示,只有2014年的最大Lyapunov指数在3月23日之后完全大于0(图7(a)),表明河冰内部已经存在混沌性;而其他年份最大Lyapunov指数尽管有几日大于0,但是总体上没有完全大于0的部分,表明在数据截止时河冰系统并未存在混沌或混沌特性不明显.

如图8所示,2014年、2016年、2017年和2018年的最大Lyapunov指数分别在3月24日(图8(a))、4月14日(图8(b))、3月19日(图8(c))和3月29日(图8(d))之后大于0,出现了明显的混沌特征,而在此之前最大Lyapunov指数日均值小于0,整体上呈现出线性状态,随着温度升高,最大Lyapunov指数则越大,直到最大Lyapunov指数完全大于0,系统完全呈现混沌特征.

为了进一步了解河冰内部对气温的响应机制,统计了特殊的气温时间点及河冰内部特征变化的时间点(表1).由表1可以得到,气温达到最低值的日期后大概2~3个月河冰达到最大冰厚,除了2017年,在最高气温达到 0°C 前3~4d和平均气温到达 0°C 之前约15d河冰停止增长,但此时河冰并未开始融化,保持最大冰厚十几天后,在平均气温达到 0°C 之前一两天开始融化;融冰前几天的最大Lyapunov指数仍为负值,表明此时河冰整体上处于线性状态;之后当平均气温大于 0°C 时河冰的最大Lyapunov指数转为正值,河冰由线性转为非线性.由此可见,河冰在稳封内为线性状态,在融冰初期仍为线性状态,而在平均气温大于 0°C 后呈现出混沌特征,即为非线性状态.

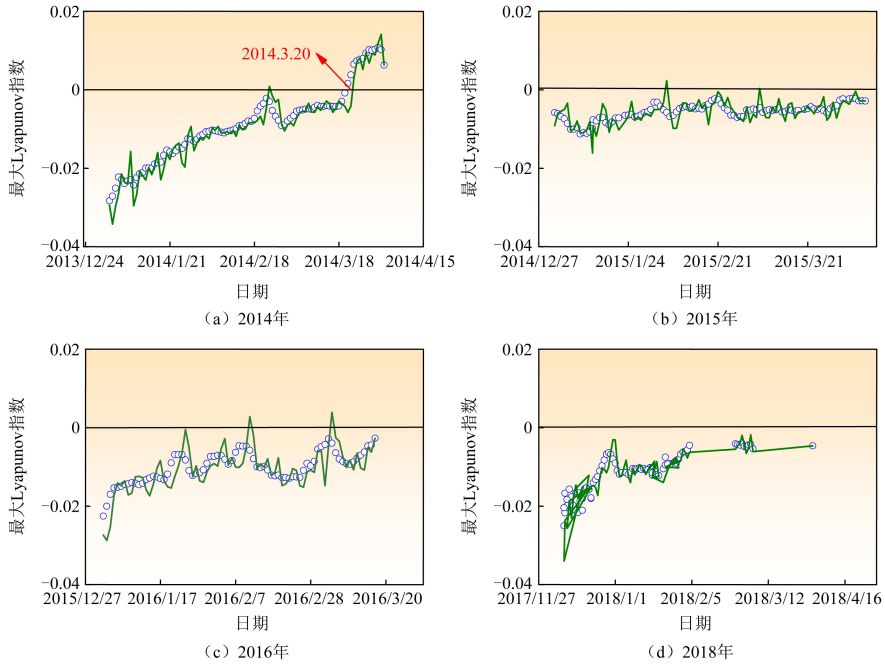


图 7 2014~2018 年江边层温逐日最大 Lyapunov 指数过程

Fig.7 The daily lagrest Lyapunov exponent of temperature from 2014 to 2018

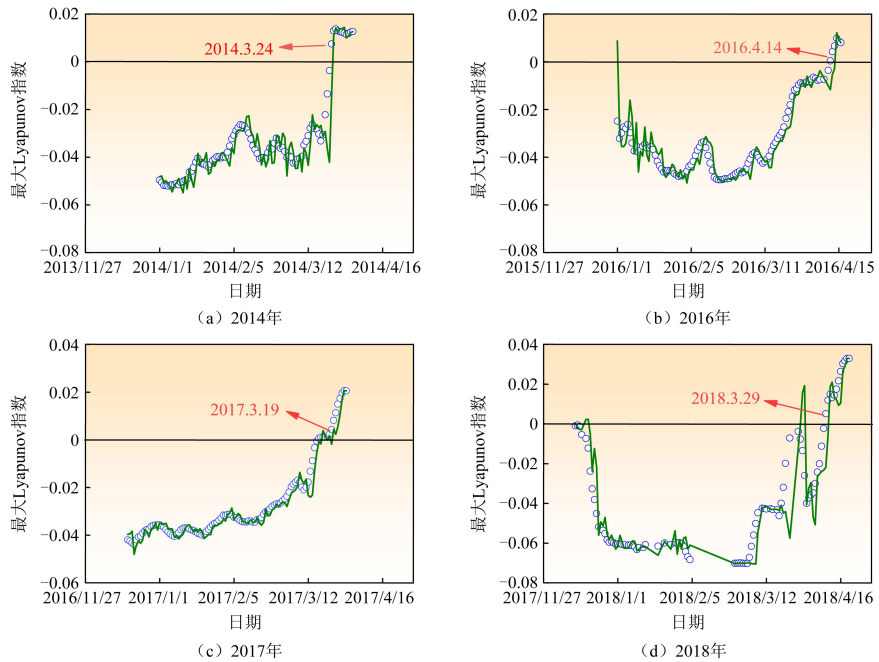


图 8 2014~2018 年江心层电压逐日最大 Lyapunov 指数过程

Fig.8 The daily lagrest Lyapunov exponent of vlotage from 2014 to 2018

表 1 2014~2018 漠河实验站观测结果统计

Table 1 Statistics of observation results from 2014 to 2018 in the Mohe Station

类别		2013~2014 年	2014~2015 年	2015~2016 年	2016~2017 年	2017~2018 年
最低气温		2013/12/12	2014/12/01	2015/12/25		2018/01/25
最高气温>0℃		2014/03/13	2015/03/12	2016/03/18	2017/03/16	2018/03/12
平均气温>0℃		2014/03/24	2015/03/25	2016/03/29	2017/03/26	2018/03/21
最大冰厚到达日期	江边	2014/03/6				2018/03/09
	江心	2014/03/10		2016/03/15	2017/03/08	2018/03/08
开始融冰	江边	2014/03/20				
	江心	2014/03/21		2016/03/28	2017/03/22	2018/03/22
逐时最大 Lyapunov	江边	2014/03/23 7:00				
	江心	2014/03/23 15:00		2016/03/31 13:00	2017/03/15 15:00	2018/03/28 12:00
逐日最大 Lyapunov	江边	2014/03/23				
	江心	2014/03/24		2016/04/14	2017/03/19	2018/03/29

3 讨论

熵增现象在自然界中普遍存在,自然界中很多事物是从有序走向无序的,实验观测结果也证实河冰从稳封期到消融期层温从有序转变为无序的状态.实验观测到河冰春季消融前的规律为:3月初停止生长,3月中、下旬开始迅速融冰,此刻河冰层温呈紊乱状态.袁正国^[37]对黑龙江及松花江流冰期的冰温研究表明,冰温随时间波动呈复杂变化的趋势;黄文峰等^[38]和程培峰等^[39]针对湖冰过程和温度也做了一系列研究,结果表明湖冰冰温在融冰期分布与封冻期相比较为紊乱,这与该研究结论一致.此外,分析河冰最大 Lyapunov 指数得到,在气温接近 0℃ 时完全由负转为正,表明河冰在接近 0℃ 时出现了混沌特征,这也与观测结论一致.

在混沌分析过程中发现,在河冰未完全呈现混沌特性之前,仍然有部分最大 Lyapunov 指数大于 0,通过对这些最大 Lyapunov 指数进行密度统计分析(图 9)发现,最大 Lyapunov 指数大于 0 的情况在江边主要存在于 10~16 时,而江心主要存在于 14~16 时,此时是一天中气温最高的时段,在该时间段内河冰内部内能增大,分子运动剧烈,能量流向变得复杂,使得河冰短暂地出现混沌特征.卢志明等^[14]在对石佛寺水库的河冰和乌梁素海的湖冰稳封期层温剖面进行统计时也发现,河(湖)冰在一天的剖面是线性状态与非线性交替混合,这佐证了河冰在稳封期也会短暂地表现出混沌特征.

根据克劳修斯^[40]提出的熵增定律,热量从高温流向低温且不可逆,一个系统不可能朝低熵发展.在融冰阶段,随着平均气温大于 0℃,河冰内部温度低于气温,底部水温大于河冰内部温度,河冰内部能量流动方向复杂,河冰系统呈现出明显的熵增现象,也由线性状态转变为非线性状态.通过统计规律得到河冰系统的线性与非线性状态的时间点,尽管河冰在平均气温还未转正时就已经出现融冰情况,但是这个时间差较短,因此在模型建立时也可以忽略时间差,将平均气温转正作为河冰融冰的起点,以及作为划分线性和非线性热传导类型的转折点.

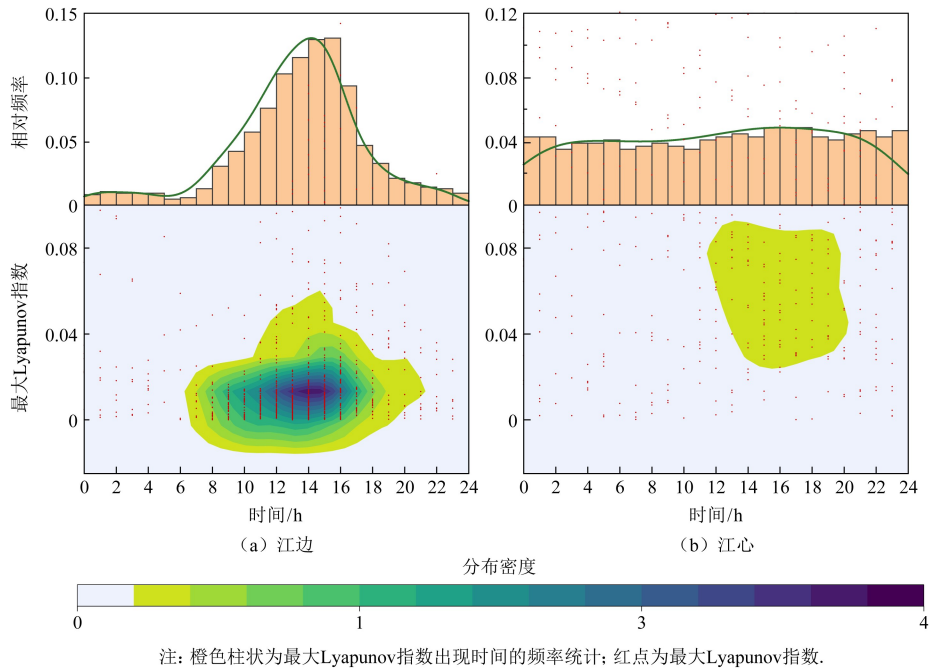


图9 封冻期最大 Lyapunov 指数大于 0 统计分析

Fig.9 The Lyapunov exponent above 0 during freezing period

4 结论

以黑龙江干流上游漠河断面 2014~2018 年的实测资料为依据,结合原型观测,在层温数据分布的基础上采用最大 Lyapunov 指数法分析判断河冰的混沌特性演变规律,对河冰系统的混沌特性演变进行了定量分析.从层温/层压分布特征可以明显观测到,融冰阶段发生了较为剧烈的无序变化,表现出明显的混沌特征.通过分析计算纵向河冰层温和层电压在封冻期和融冰期最大 Lyapunov 指数的演变过程,得到逐时和逐日的最大 Lyapunov 指数在融冰期时完全由负转正,河冰系统完全转为非线性;逐时最大 Lyapunov 指数在封冻期时大部分小于 0,少数一天内温度最高的时间段存在大于 0 的情况,整体仍为线性系统;基于原型观测可知,当平均气温大于 0°C 时河冰开始融解,并且整体由线性系统转为非线性系统,因此基于最大 Lyapunov 指数的方法在判断河冰系统的混沌特性上具有适用性.这些发现不仅有助于生长消融过程中河冰内部能量演变机理的理解,也为建立河冰模拟模型提供了理论基础,最终为寒区水资源适应策略提供参考.在未来研究中,对河冰内部能量变化机理以及能量传递速度和方向等方面应深化探索与研究,以提高河冰数值模拟精度,并结合现有河冰预测模型提高河冰灾害预报精度.

参考文献

- [1] 丁永健,张世强,吴锦奎,等.中国冰冻圈水文过程变化研究新进展[J].水科学进展,2020,31(5):690-702
Ding Yongjian, Zhang Shiqiang, Wu Jinkui, et al. Recent progress on studies on cryospheric hydrological processes changes in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 690-702

- [2] 丁永建,效存德.冰冻圈变化及其影响研究的主要科学问题概论[J].地球科学进展,2013,28(10):1067-1076
Ding Yongjian,Xiao Cunde.Challenges in the study of cryospheric changes and their impacts[J].Advances in Earth Science,2013,28(10):1067-1076
- [3] 秦大河,周波涛,效存德.冰冻圈变化及其对中国气候的影响[J].气象学报,2014,72(5):869-879
Qin Dahe,Zhou Botao,Xiao Cunde.Progress in studies of cryospheric changes and their impacts on climate of China [J].Acta Meteorologica Sinica,2014,72(5):869-879
- [4] 苏勃,高学杰,效存德.IPCC《全球1.5℃增暖特别报告》冰冻圈变化及其影响解读[J].气候变化研究进展,2019,15(4):395-404
Su Bo,Gao Xuejie,Xiao Cunde.Interpretation of IPCC SR1.5 on cryosphere change and its impacts [J].Climate Change Research,2019,15(4):395-404
- [5] Vaughan D,Comiso J,Allison I,et al.Observations:Cryosphere[M].Cambridge University Press,2013
- [6] Monitoring T,Programme A.Snow,water,ice and permafrost in the Arctic(SWIPA):Climate change and the cryosphere [M].Arctic Monitoring and Assessment Programme,AMAP,2011
- [7] 高霏生,靳国厚.中国北方寒冷地区河冰灾害调查与分析[J].中国水利水电科学研究院学报,2003,1(2):159-164
Gao Peisheng,Jin Guohou.Investigation and analysis of river ice disaster in cold regions of North China[J].Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2003,1(2):159-164
- [8] Prowse T,Beltaos S.Climatic control of river-ice hydrology:A review[J].Hydrology Process,2002,16(4):805-822
- [9] Han H,Li Y,Li W,et al.The influence of the internal properties of river ice on ground penetrating radar propagation [J].Water,2023,15(5):889
- [10] Rokaya P,Budhathoki S,Lindenschmidt K.Ice-jam flood research:A scoping review[J].Natural Hazards,2018,94:1439-1457
- [11] Wazney L,Clark S,Malenchak J,et al.Numerical simulation of river ice cover formation and consolidation at freeze-up [J].Cold Regions Science and Technology,2019,168:10288
- [12] Shen H.Mathematical modeling of river ice processes[J].Cold Regions Science and Technology,2010,62(1):3-13
- [13] Ashton G.River and lake ice thickening,thinning,and snow ice formation[J].Cold Regions Science and Technology,2011,68(1-2):3-19
- [14] 卢志明,李志军,于贺海,等.石佛寺水库和乌梁素海冰温剖面类型的统计分析[J].水利科学与寒区工程,2019,2(5):10-15
Lu Zhiming,Li Zhijun,Yu Hehai,et al.Statistical analysis of the ice temperature profile types of reservoirs and lakes in Northern China[J].Hydro Science and Cold Zone Engineering,2019,2(5):10-15
- [15] Hills B,Harper J,Humphrey N.Measured horizontal temperature gradients constrain heat transfer mechanisms in greenland ice[J].Geophysical Research Letters,2017,44(19):9778-9785
- [16] 赵腾飞.基于熵增原理及耗散结构理论的管理熵能力评价标准[J].中国质量,2023,(4):116-120
Zhao Tengfei.The maturity entropy of quality management system based on "Entropy" and dissipative structure theor [J].China Quality,2023,(4):116-120
- [17] Tomé T,Oliveira J.Entropy production in nonequilibrium systems at stationary states[J].Physical Review Letters,2012,108(2):020601
- [18] Karnopp D,Rosenberg C.System dynamics:A unified approach[M].Hoboken:John Wiley & Sons,Inc,1990
- [19] Jia H,Pan D,Zhang W.Health assessment of wetland ecosystems in the Heilongjiang River Basin,China[J].Wetlands,2015,35:1185-1200
- [20] 丛大钧,戴长雷,李洋,等.黑龙江流域水文地理耦合区划与分析[J].水利科学与寒区工程,2018,1(9):39-43
Cong Dajun,Dai Changlei,Li Yang,et al.Division and analysis of hydrology coupling in Heilongjiang River Basin[J].Hydro Science and Cold Zone Engineering,2018,1(9):39-43
- [21] Song C,Li X,He H,et al.Centennial analysis of human activity intensity and associated historical events in the Heilongjiang River Sino-Russo Watershed[J].Chinese Geographical Science,2023;1-14
- [22] 戴长雷,李梦玲,张兆廷.黑龙江(阿穆尔河)流域水文地质区划研究[J].黑龙江大学学报,2021,12(3):209-216
Dai Changlei,Li Mengling,Zhang Zhaoting.Study on hydrogeological regionalization of Heilongjiang (Amur River) Basin[J].Journal of Engineering of Heilongjiang University,2021,12(3):209-216

- [23] 张凯文,戴长雷,丛大军.黑龙江(阿穆尔河)流域水文地理特征比较分析[J].山西水利,2019,35(5):4-7
Zhang Kaiwen,Dai Changlei,Cong Dajun.Comparative analysis of hydrological and geographical characteristics of the Heilongjiang River(Amur River)[J].Shanxi Water Resources,2019,35(5):4-7
- [24] 戴长雷,王思聪,李治军,等.黑龙江流域水文地理研究综述[J].地理学报,2015,70(11):1823-1834
Dai Changlei,Wang Sicong,Li Zhijun,et al.Review on hydrological geography in Heilongjiang River Basin[J].Acta Geographica Sinica,2015,70(11):1823-1834
- [25] 邢若飞,郝振纯,鞠琴,等.黑龙江干流凌情特征及影响因素分析[J].水电能源科学,2016,34(4):15-18
Xing Ruofei,Hao Zhenchun,Ju Qin,et al.Influencing factors and melting ice characteristics analysis of Heilongjiang River[J].Water Resources and Power,2016,34(4):15-18
- [26] 王涛,刘之平,郭新蕾,等.基于神经网络理论的开合期冰坝预报研究[J].水利学报,2017,48(11):1355-1362
Wang Tao,Liu Zhiping,Guo Xinlei,et al.Prediction of breakup ice jam with artificial neural networks[J].Journal of Hydraulic Engineering,2017,48(11):1355-1362
- [27] 徐鸿勋,李昱,肖兴涛,等.基于灰色关联度-突变理论模型的黑龙江上游凌汛灾害风险评估[J].中国农村水利水电,2024,(6):105-113
Xu Hongxun,Li Yu,Xiao Xingtao,et al.Risk evaluation of ice flood disaster in the upper Heilongjiang River based on gray relational analysis-catastrophe theory model[J].China Rural Water and Hydropower,2024,(6):105-113
- [28] Hense A.On the possible existence of a strange attractor for the Southern Oscillation[J].Beitr.Physical Atmosphere,1987,60(1):34-47
- [29] 于国荣,夏自强.混沌时间序列支持向量机模型及其在径流预测中应用[J].水科学进展,2008,(1):116-122
Yu Guorong,Xia Ziqiang.Prediction model of chaotic time series based on support vector machine and its application to runoff[J].Advances in Water Science,2008,(1):116-122
- [30] 肖章玲,梁忠民,李彬权,等.一种基于混沌理论的“量”-“型”相似预测模型[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(5):894-899+929
Xiao Zhangling,Liang Zhongmin,Li Binqun,et al.A quantitative pattern similarity prediction model based on chaos theory[J].South-to-North water transfers and Water Science & Technology,2021,19(5):894-899+929
- [31] Saad M,Safieddine A,Sultan R,et al.Revisited chaos in a diffusion-precipitation-redissolution liesegang system[J].Journal of Physical Chemistry a Molecules Spectroscopy Kinetics Environment & General Theory,2018
- [32] Yildirim H,Altinsoy H.Chaos and trend analysis of monthly precipitation over Arabian Peninsula and Eastern Mediterranean[J].Arabian Journal of Geosciences,2017,10(2):21
- [33] 许振浩,范永辉,王文扬,等.一种改进的算术优化算法及其在水文地质参数智能反演中的应用[J].应用基础与工程科学学报,2024,32(3):721-739
Xu Zhenhao,Fan Yonghui,Wang Wenyang,et al.An improved arithmetic optimization algorithm and its application to the intelligent inversion of hydrogeological parameters[J].Journal of Basic Science and Engineering,2024,32(3):721-739
- [34] Kim H,Eykholt R,Salas J.Nonlinear dynamics, delay times, and embedding windows[J].Physica D Nonlinear Phenomena,1999,127(1-2):48-60
- [35] 舒涛,路昊天,曹景轩,等.基于混沌理论的降水量预测方法研究[J].灌溉排水学报,2022,41(3):83-91
Shu Tao,Lu Haotian,Cao Jingxuan,et al.Predicting monthly precipitation using chaotic model[J].Journal of Irrigation and Drainage,2022,41(3):83-91
- [36] 周金勇.混沌时间序列预测模型研究[D].武汉:武汉理工大学,2009
Zhou Jinyong.Research on predictive model of chaotic times series[D].Wuhan:Wuhan University of Technology,2009
- [37] 袁正国.内河冰凌力学性能及其对桥墩撞击力作用的研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2010
Yuan Zhengguo.Research on inland river ice mechanical property and ice impact force on bridge pier[D].Harbin:Northeast Forest University,2010
- [38] 黄文峰,韩红卫,牛富俊,等.季节性冰封热融浅湖水温原位观测及其分层特征[J].水科学进展,2016,27(2):280-289
Huang Wenfeng,Han Hongwei,Niu Fujun,et al.Field observations on water temperature and stratification in a seasonally ice-covered shallow thermokarst lake[J].Advances in Water Science,2016,27(2):280-289
- [39] 程培峰,李吉庭,宇德忠,等.新疆阿尔泰山喀纳斯湖冰层温度变化规律试验研究[J].冰川冻土,2016,38(3):692-698

- Cheng Peifeng, Li Jiting, Yu Dezhong, et al. Study of the ice cover temperature variation of the Kanas Lake[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(3): 692-698
- [40] 李阳, 薛提微, 过增元. 克劳修斯熵表达式适用于实际气体的分子动力学验证[J]. 科学通报, 2022, 67(9): 888-895
- Li Yang, Xue Tiwei, Guo Zengyuan. Verification of Clausius entropy expression for real gases based on molecular dynamics[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(9): 888-895

Analysis of Chaotic Characteristics and Their Evolution of River Ice System

XING Ruofei^{1,2}, CHEN Zefeng¹, HAO Jie³, LIU Wenbin⁴, JU Qin¹

(1. The National State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Business School of Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. Bureau of Hydrology, Songliao Water Resources of Commission, Changchun 130021, China)

Abstract

River ice growth and melting conditions are of highly relevance for ice flood disaster warning system. Understanding the physical mechanism of river ice growth and melting is vital to determine the potential existence of chaotic characteristics within river ice. To fully understand the characteristics of intrinsic energy distribution in river ice, we selected the Mohe Station in the upper reaches of the Heilongjiang upstream as research area, and performed in-situ observations of river ice temperature and voltage and air temperature from 2014 to 2018. Chaos theory was used to analyze the chaotic characteristics and their evolution of this river ice system, and the linear and nonlinear transition times of the river ice system were determined based on combinations of chaos theory-based results with long-term observations. Our results show layer temperature/voltage exhibits a well-organized during growth period, but shows an obvious disorder during the melting period. Most of the maximum Lyapunov index are less than 0 during the freezing period, and a few of the maximum Lyapunov index larger than 0 mainly concentrated on between 14 and 16 at pm, which changed from negative to positive during the melting period of river ice, showing chaotic characteristics. The maximum Lyapunov index turning positive date is found to be closely associated with the average above 0°C date, indicating a transition from linear to nonlinear heat conduction in river ice when the average temperature exceeds 0°C. The study reveals the temporal evolution of layer temperature during river ice formation and melting, thereby offering support for water resources management in cold regions.

Keywords: Heilongjiang River; the Mohe station; river ice; layer temperature; the maximum Lyapunov exponent; chaotic characteristics