

文章编号: 1004-4353(2020)04-0339-06

延边地区季节冻土变化及其对气温变化的响应

黄义强¹, 赵晶², 佟守正³, 崔庚^{3*}, 张守志^{1*}

(1. 延边大学 地理与海洋科学学院, 吉林 延吉 133002; 2. 延边朝鲜族自治州气象局 气象服务中心, 吉林 延吉 133001; 3. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所 湿地生态组, 吉林 长春 130102)

摘要: 为研究延边地区的冻土与气温变化的响应关系, 利用1965—2018年延边地区季节冻土的逐月冻土深度、冻结初终日期、月平均气温等资料, 采用气候倾向率、小波分析、Mann-Kendall检验、Pearson相关系数等方法对其进行了分析。结果表明: ①延边地区冻土深度呈逐年变浅趋势, 冻结日数呈逐年缩短趋势, 气温呈逐年升高趋势, 三者的气候倾向率分别为 $-6.48\text{ cm}/10\text{ a}$, $-4.30\text{ d}/10\text{ a}$, $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。②冻土深度存在着17~24 a、10~16 a和3~9 a的变化周期, 其中以17~24 a为主周期。③冻土深度和冻结日数与年均气温呈显著负相关性, 即气温每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最大冻土深度减小 19.24 cm , 冻结日数缩短 10.35 d 。本研究结果可为延边地区的生态环境保护以及工程建设和农业生产等提供参考。

关键词: 延边地区; 季节冻土; 年际变化; 小波分析; 突变时间

中图分类号: P642.14

文献标识码: A

Seasonal frozen soil change and its response to temperature change in Yanbian area

HUANG Yiqiang¹, ZHAO Jing², TONG Shouzheng³, CUI Geng^{3*}, ZHANG Shouzhi^{1*}

(1. College of Geography and Marine Sciences, Yanbian University, Yanji 133002, China;
2. Meteorological Service Center of Meteorological Bureau, Yanbian Korean Autonomous Prefecture, Yanji 133001, China; 3. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences Wetland Ecological Group, Changchun 130102, China)

Abstract: In order to study the response relationship between permafrost and temperature change in Yanbian area from 1965 to 2018, the monthly frozen soil depth, freezing beginning and ending dates, monthly average temperature and other data of seasonal frozen soil in Yanbian area were used to analyze it by using climate tendency rate, wavelet analysis, Mann Kendall test and Pearson correlation coefficient. The results show that: (1) the depth of frozen soil in Yanbian area is becoming shallower, the number of freezing days is shortening, and the temperature is increasing. The climate tendency rates of the three are $-6.48\text{ cm}/10\text{ a}$, $-4.30\text{ d}/10\text{ a}$, $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$. (2) There are three types of periodic variation of frozen soil depth: 17-24 years, 10-16 years and 3-9 years, of which 17-24 years is the main period. (3) There is a significant negative correlation between the frozen soil depth and the average annual temperature in Yanbian area, that is, when the temperature increases by $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, the maximum frozen soil depth decreases by 19.24 cm , and the freezing days shorten by 10.35 days . The results of this paper can provide reference for ecological environment protection, engineering construction and agricultural production in Yanbian area.

Keywords: Yanbian region; seasonal frozen soil; interannual variation; wavelet analysis; abrupt change time

收稿日期: 2020-09-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0409103)

* 通信作者: 崔庚(1990—), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为湿地生态学; 张守志(1971—), 男, 副教授, 研究方向为区域发展与生态评价。

冻土是土壤的一种重要形态. 研究表明, 冻土的冻融过程不仅能够影响地面与大气的热交换过程^[1-2], 而且还能够影响到土壤性质和地下水循环等^[3-4]. 近些年来, 随着全球气候变暖, 高寒地区的冻土出现了持续退化的趋势, 进而使得高寒地区的生态变得越来越脆弱^[5-6]; 因此, 研究冻土变化以及其对气温变化的响应对保护生态环境具有重要意义. 近年来, 许多学者对我国东北地区的冻土进行了研究. 例如: 张明等研究了长春市 1981—2010 年的冻土变化特征^[7], 张菁等研究了沈阳地区冬春季冻土深度特征对气候变化的响应^[8], 李佳等研究了松花江流域最大冻土深度的时空分布及对气温变化的响应^[9], 任景全等研究了吉林省季节冻土的冻结深度变化及其对气候的响应^[10]. 这些研究显示, 各个地区冻土的变化趋势虽然存在差异, 但整体呈退化趋势. 目前, 针对延边地区的季节冻土变化及其对气温变化的响应研究得较少, 相关文献虽有涉及但缺乏系统性研究. 为此, 本文利用延边地区 1965—2018 年季节冻土的逐月冻土深度、冻结初终日期、月平均气温等数据, 以小波分析、Mann-Kendall (M-K) 突变检验等方法分析冻土与气温的变化趋势及相关关系, 以为延边地区的农业生产、工程建筑以及生态环境保护等提供参考.

1 研究区概况

延边朝鲜族自治州位于吉林省东部, 地处中、朝、俄三国交界的长白山地区(北纬 $41^{\circ}59'47''\sim 44^{\circ}30'42''$, 东经 $127^{\circ}27'43''\sim 131^{\circ}18'33''$). 延边朝鲜族自治州的总面积为 $43\,300\text{ km}^2$, 其下辖 6 个县级市、2 个县, 分别为延吉市、图们市、敦化市、珲春市、龙井市、和龙市、汪清县、安图县. 延边地区的地貌呈山地、丘陵、盆地 3 个梯度, 水系发达, 其中山地面积占总面积的 54.8%. 该区域气候属中温带湿润季风气候, 春季干燥, 夏秋季多雨, 冬季漫长寒冷, 冻土冻结日期主要集中于 10 月中下旬至次年 4 月或 5 月^[11-12].

2 数据与方法

2.1 数据来源

原始气象数据来源于延边朝鲜族自治州气象

局 1965—2018 年的 8 个县市的逐月冻土观测数据和逐月气温数据. 对原始数据进行处理后, 得到延边地区 1965—2018 年的最大冻土深度、冻结开始时间与化通时间、主要冻结时期的持续天数、年平均气温等数据.

2.2 研究方法

分析冻土的变化周期性, 传统的方法通常是采用傅里叶变换法, 但该方法因只能提取频率而无法确定具体时刻, 因此对数据的分析缺少时间要素. 近年来, 一些学者采用小波分析方法对冻土的变化周期性进行研究表明, 小波分析不仅能够克服传统傅里叶变换方法的上述缺点^[13], 而且还具有很好的局部性(通过尺度伸缩能够发现信号细节的变化, 以此为判断异常信息提供依据)^[14]. 因此, 本文采用小波分析方法对冻土的变化周期性进行表征. 目前, 小波分析方法主要包括离散小波、正交小波、实小波和复小波等方法. 因复小波同时具有实部与虚部, 所以该方法不仅能够给出时间序列的变化强度及其变化位相^[15], 而且还具有较好的准确性^[16-17]. 因此, 本文采用连续复小波变换的分析方法分析延边地区季节冻土的多时间尺度特征.

本文采用气候倾向率分析冻土及气温的逐年变化. 气候倾向率的表达为 $y=a+bx$, 式中 y 为气象要素, x 为时间, a 为常数项, b 为气候倾向率. 因 b 值较小, 因此通常用 $b\times 10$ 表示气候倾向率, 其单位为 $^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 或 $\text{cm}/10\text{ a}$. 采用 M-K 突变检验法分析延边地区的季节冻土和气温的变化趋势以及可能出现的突变, 采用 Pearson 相关系数法研究季节冻土与气温之间的相互关系.

3 结果与分析

3.1 延边地区季节冻土的变化特征

3.1.1 冻土深度和冻结日数的年际变化特征

图 1 为延边地区最大冻土深度的历年变化. 由图 1 可以看出, 延边地区年冻土深度的年际变化呈以下特征: 从 20 世纪 60 年代中期到 20 世纪 80 年代末, 年冻土深度呈明显减少趋势; 从 20 世纪 90 年代初至今, 年冻土深度相对较为平稳. 1965—2018 年延边地区的年最大冻土深度的平均值为 160 cm , 其中在 1989 年以前的大部分年

份的最大冻土深度都高于该平均值,而在1989年以后的大部分年份的最大冻土深度都低于该平均值,这说明最大冻土深度总体呈逐渐下降趋势(倾向率为 $-6.481\text{ cm}/10\text{ a}$,即每10 a冻土深度减少 6.481 cm , $R^2=0.3387$).

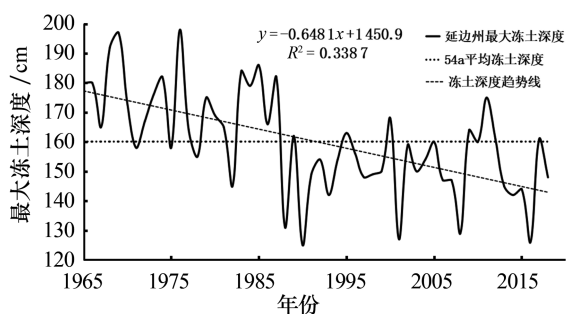


图1 最大年冻土深度的历年变化

图2为延边地区的土壤冻结初终日期的历年变化.由图2可以看出,季节冻土的冻结日期主要集中在10月下旬,且整体呈推迟趋势,而冻土化通日期则整体呈提前趋势.

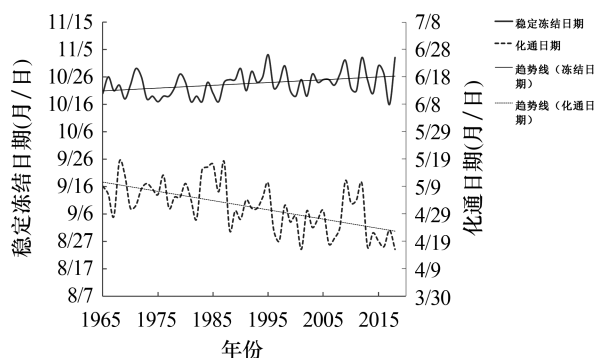


图2 土壤冻结初终日期的历年变化

图3为1965—2018年延边地区冻结日数的历年变化.由图3可以看出,冻结日数呈逐年下降趋势,倾向率为 $-4.307\text{ d}/10\text{ a}$.冻结日数的平均值为191 d,其中1988年以前的大部分年份的冻结日数高于191 d,而1988年以后的部分年份的冻结日数低于191 d.该结果与最大冻土深度的变化趋势相似.

3.1.2 冻土深度和冻结日数的周期性变化

复小波的模(实部和虚部平方和的开方)的大小可以反映变化周期的强度随时间的变化.图4为延边地区季节冻土深度的小波系数实部等值线图.图4中,实线表示小波系数的实部值为正,冻土较厚;虚线表示小波系数的实部为负,冻土较

浅.由图4可以看出,冻土深度存在17~24 a、10~16 a以及3~9 a 3类尺度的周期变化规律.其中:在17~24 a尺度上出现了浅-厚交替的准4次震荡,且各震荡周期较为稳定和具有全域性;在10~16 a尺度上出现了准6次震荡,各震荡周期也较为稳定和具有全域性;在3~9 a尺度上出现了准5次震荡,但震荡周期仅在1985年以前表现的较为稳定.另外,从图4中还可以看出,在26~32 a尺度上也可能存在周期变化(因本文的数据不足,所以难以给出准确判断).

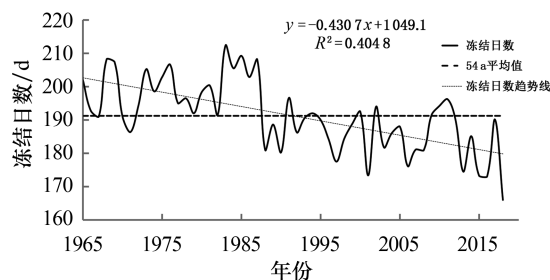


图3 冻结日数的历年变化

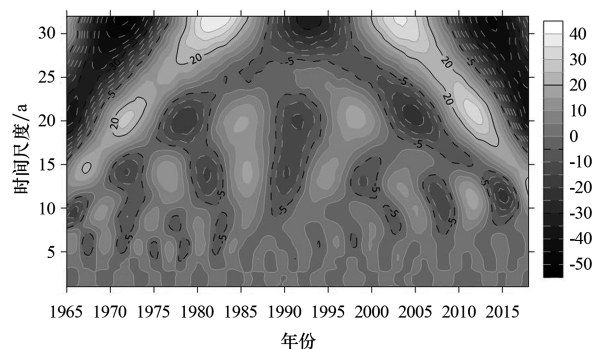


图4 冻土深度的小波系数实部等值线图

小波系数的模平方能够反映不同周期的震荡能量.由图5可以看出:17~24 a时间尺度的能量较强,其周期变化贯穿整个时间序列(1965—2018年);10~16 a时间尺度的能量较弱,其周期分布具有局部性(1995—2005年无震荡能量).3~9 a时间尺度的能量最弱,其同期分布仅存在于1965—1970年和2005—2018年.

图6为1965—2018年延边地区冻土深度的小波方差图.小波方差图能够反映冻土时间序列的波动能量随尺度 a 的分布情况,可用来确定径流演化过程中存在的周期.由图6可以看出,图中存在4个较为明显的峰值,说明冻土深度的变化特征主要表现为4个周期.其中:最大峰值对应的

是 21 a 的时间尺度,说明 21 a 的周期震荡最强,为冻土变化的第 1 主周期;14 a 的时间尺度对应的是第 2 峰值,为冻土变化的第 2 周期;6 a 和 3 a 的时间尺度分别对应的是第 3 和第 4 峰值,它们依次为冻土深度的第 3 和第 4 周期。

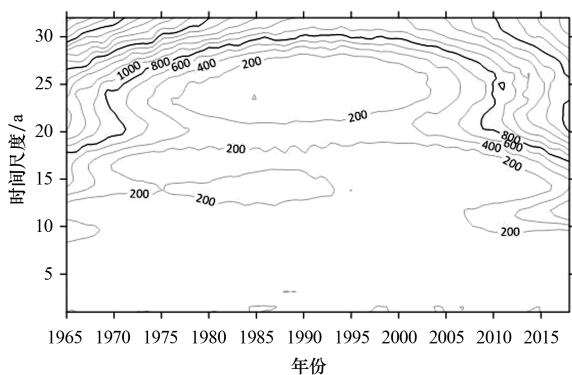


图 5 冻土深度的小波系数模平方图

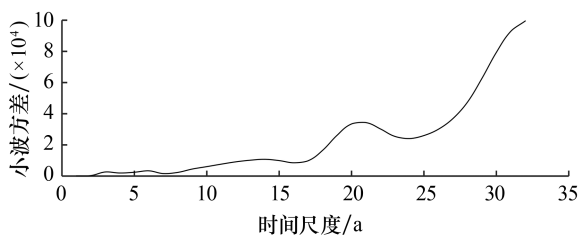


图 6 冻土深度的小波方差

3.1.3 冻土深度和冻结日数的突变及分析

对延边地区年最大冻土深度和平均冻土日期进行 M-K 突变检验的结果如图 7 所示. 图 7 显示,年最大冻土深度的标准正态分布序列(UF)和反序列(UB)在 1980—1985 年存在多个交点(交点在临界线之内),并且 UF 统计量在 1990 年后达到显著水平,由此可以判断 1986 年为冻土深度突变开始的时间. 由 UF 曲线可以看出,20 世纪 90 年代中期到 2018 年,冻土的变浅趋势均超过 0.05 显著性水平线. 这表明,延边地区年最大冻土深度的变浅趋势较为显著.

图 8 为延边地区冻土年平均冻结日数的 M-K 检验结果. 图 8 显示,UF 曲线和 UB 曲线在 1994 年存在交点,且在信度范围内,这说明 1994 年为冻结日数突变时间. 另外,UF 曲线从 20 世纪 90 年代中期开始超过 0.05 显著水平线,说明延边地区冻土的年平均冻结日数从 20 世纪 90 年代中期开始存在明显的缩短趋势.

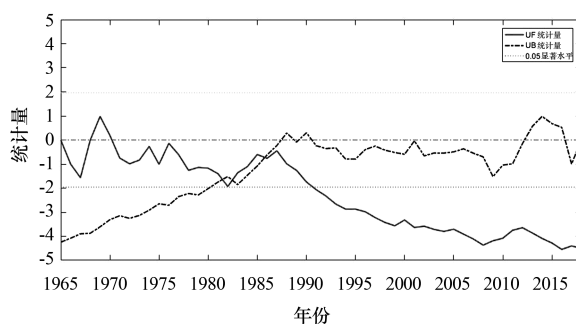


图 7 延边地区年最大冻土深度的 M-K 检验结果

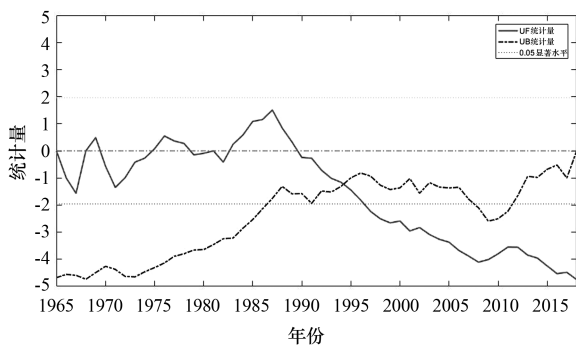


图 8 延边地区冻土年平均冻结日数的 M-K 检验结果

3.2 延边地区的气温变化特征

由于年平均气温能够反映地表辐射和热量变化的特点^[18],因此本文对 1965—2018 年延边地区的平均气温数据进行分析,以探究气温在冻土发展过程中所以起到的作用.

3.2.1 气温的年际变化特征

延边地区 1965—2018 年的年均气温数据如图 9 所示. 由图 9 可以看出,年均气温整体呈升高趋势,倾向率为 $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$. 1965—2018 年的平均气温为 $5.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,其中 1988 年以前的年均气温大都低于该平均气温,而 1988 年以后的年均气温大都高于该平均气温. 最高的年均气温出现在 2007 年,为 $6.2\text{ }^{\circ}\text{C}$;最低的年均气温出现在 1969 年,为 $3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

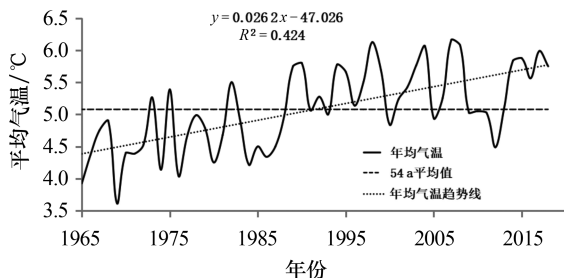


图 9 年均气温变化

3.2.2 气温突变分析

对延边地区年平均气温进行 M-K 检验的结果如图 10 所示. 由图 10 可以看出, UF 曲线和 UB 曲线在 1987 年存在明显的交点, 且交点在临界线之内, 说明延边地区的年平均气温在 1987 年开始突变. 由 UF 曲线可以看出, 1990 年到 1994 年的 UF 值超过显著性水平 0.05 临界线, 1994 年后的 UF 值超过 0.001 显著性水平临界线 ($U_{0.001} = 2.56$), 这表明延边地区的年平均气温从 20 世纪 90 年代开始逐渐呈升高趋势.

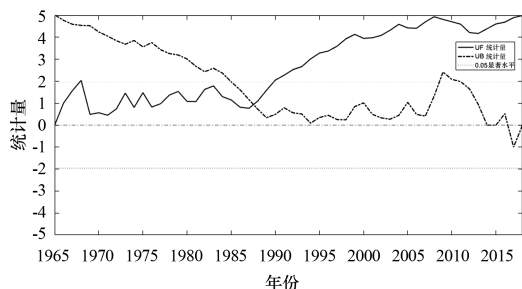


图 10 延边地区年平均气温的 M-K 检验结果

3.3 季节冻土对气温变化的响应

为了进一步研究季节冻土与气温之间的相关性, 采用 Pearson 相关系数分析了延边地区的年最大冻土深度和冻结日数与年均气温的关系, 并运用 SPSS 软件对两者相关性的显著性水平进行了检验. 检验结果显示, 二者的显著性系数 (P 值) 为 0.000, 说明最大冻土深度与年均气温呈显著相关性. 图 11 为冻土深度与年均气温的散点图. 由图 11 可知, 冻土深度与年均气温的一元线性回归方程为 $y = -19.24x + 257.83$, 即气温每升高 1°C , 冻土深度减少 19.24 cm. 综上表明, 随着年均气温的升高, 冻土深度变浅, 且两者呈显著相关性.

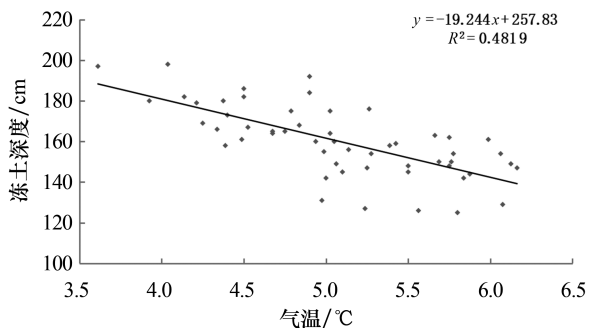


图 11 冻土深度与年均气温的散点图

图 12 为冻结日数 y 与年均气温 x 之间的散点图. 冻结日数与年均气温的一元线性回归方程为 $y = -10.35x + 243.8$, $R^2 = 0.3773$ (通过信度 0.001 的检验), 即气温每升高 1°C , 冻结日数减少 10.35 d. 由图 12 可以看出, 随着平均气温的升高, 冻结日数逐渐缩短, 且两者呈显著相关性. 该结果进一步验证了延边地区的冻土退化与气温变化密切相关.

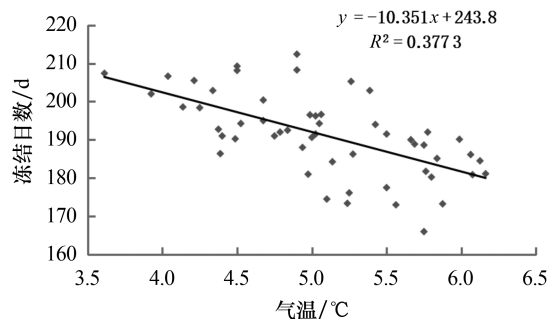


图 12 冻结日数与平均气温的散点图

4 结论

对延边地区 1965—2018 年的季节冻土变化及其对气温变化的响应进行研究表明: ① 延边地区的气温呈上升趋势, 升幅为 $0.26^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$; 冻土深度呈变浅趋势, 变化幅度为 $-6.48^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$; 冻结开始日期推迟, 冻土化通日期提前, 冻结日数呈缩短趋势, 倾向率为 $-4.30\text{ d}/10\text{ a}$. 该结果表明 1965—2018 年延边地区的气候变暖和冻土退化的趋势较为明显. ② 延边地区冻土深度存在着 17~24 a, 10~16 a 以及 3~9 a 3 类尺度的周期变化规律, 其中 17~24 a 尺度的周期变化最为显著, 且具有全局性. ③ 冻土深度、冻结日数、年均气温均存在突变, 三者的突变时间分别是 1986 年、1994 年和 1987 年, 且自 20 世纪 90 年代中期至今, 冻土深度变浅、冻结日数缩短、年均气温升高的趋势较为显著. ④ 延边地区的冻土特征同年均气温存在显著的负相关性, 温度每升高 1°C , 最大冻土深度减小 19.24 cm, 冻结日数缩短 10.35 d. 综上结果表明, 延边地区的冻土对气候的响应呈明显的退化趋势. 本文研究结果可为延边地区的生态保护及施工建设和农业生产提供参考.

(下转第 374 页)

参考文献:

- [1] 马文星. 液力传动理论与设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [2] 马文星, 刘春宝, 雷雨龙. 工程机械液力变矩器现代设计方法及应用[J]. 液压气动与密封, 2012, 10: 71-76.
- [3] 马文星, 王佳欣, 刘春宝. 液力变矩器流动数值模拟的发展与应用[J]. 液压与气动, 2019, 5: 1-8.
- [4] 郑恒玉. 基于 CFD 的叶片参数对液力变矩器的性能影响分析[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [5] 闫清东, 李新毅, 魏巍. 基于多目标优化的液力变矩器叶形角度设计[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(9): 69-75.
- [6] 石祥钟, 荣琼艳, 董雪, 等. YJSW315 双涡轮液力变矩器优化改型研究[J]. 机械设计与制造, 2020(2): 117-120.
- [7] 刘春宝, 刘长锁, 马文星, 等. 基于鱼体结构的仿生型液力变矩器叶片换量分配规律[J]. 北京理工大学学报(自然科学版), 2016, 36(9): 887-892.
- [8] 杨化龙. 液力变矩器叶片仿生非光滑表面减阻研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [9] 卜卫羊. 仿生超疏水叶片的制备及其表面流体运动形态的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.

~~~~~  
(上接第 343 页)

## 参考文献:

- [1] 朱春鹏, 张喜发, 张冬青, 等. 季节性冻土地区道路冻深的研究[J]. 辽宁交通科技, 2004, 27(4): 16-18.
- [2] 吴青柏, 董献付, 刘永智. 青藏公路沿线多年冻土对气候变化和工程影响的响应分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(1): 50-54.
- [3] HAISEY L A, VITT D H, ZOITAI S C. Disequilibrium response of permafrost in boreal continental western Canada to climate change [J]. Climatic Change, 1995, 30(5): 57-73.
- [4] 陈博, 李建平. 近 50 年来中国季节冻土与短时冻土的时空变化特征[J]. 大气科学, 2008, 33(3): 432-443.
- [5] 张森琦, 王永贵, 赵永真, 等. 黄河源区多年冻土退化及其环境反映[J]. 冰川冻土, 2004, 26(1): 1-6.
- [6] 罗栋梁, 金会军, 林琳, 等. 青海高原中、东部多年冻土及寒区环境退化[J]. 冰川冻土, 2012, 34(3): 538-546.
- [7] 张明, 刘吉洁, 肖鸿志. 长春市近 50 年冻土变化特征分析[J]. 吉林农业, 2015, 27(2): 90.
- [8] 张菁, 宋晓巍, 李石, 等. 沈阳地区冬春季冻土深度特征对气候变化的响应[C]//第 35 届中国气象学会年会 S6 应对气候变化、低碳发展与生态文明建设. 安徽: 中国气象学会, 2018: 538.
- [9] 李佳, 周祖昊, 王浩, 等. 松花江流域最大冻土深度的时空分布及对气温变化的响应[J]. 资源科学, 2017, 39(1): 147-156.
- [10] 任景全, 刘玉汐, 王冬妮, 等. 吉林省季节冻土冻结深度变化及对气候的响应[J]. 冰川冻土, 2019, 41(5): 1098-1106.
- [11] 延边朝鲜族自治州地方志编纂委员会. 延边年鉴 2015[M]. 延吉: 延边人民出版社, 2015: 21-22.
- [12] 延边朝鲜族自治州地方志编纂委员会. 延边年鉴 2007[M]. 长春: 吉林人民出版社, 2009: 9-10.
- [13] 高成, 董长虹, 郭磊, 等. 小波分析与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 1-28.
- [14] 陈彦光. 基于 MATLAB 的地理数据分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 180-192.
- [15] 王文圣, 丁晶, 向红莲. 水文时间序列多时间尺度分析的小波变换法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2002, 34(6): 14-17.
- [16] 刘东, 付强. 基于小波变换的三江平原低湿地井灌区年降水序列变化趋势分析[J]. 地理科学, 2008, 28(3): 380-384.
- [17] LIU D L, LIU X Z, LI B C, et al. Multiple time scale analysis of river runoff using wavelet transform for Dagujia Riverbasin, Yantai, China [J]. Chinese Geographical Science, 2009, 19(2): 158-167.
- [18] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 9-19.