



大兴安岭林区雷击火成因机理及影响因素研究进展

冯雨林¹, 刘爱柱², 郭常来¹, 王大勇³, 张格格³, 张广宇¹

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 大兴安岭林业集团公司, 黑龙江 加格达奇 165099; 3. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000

摘 要: 闪电是雷击火发生的火源, 森林雷击火给人类和生态环境带来了巨大损失。本研究从大兴安岭林区雷击火发生的时空规律、引燃机理、影响因素和预测预报等方面, 总结梳理了国内外研究进展。结合对雷击火高发区域地质背景研究分析, 认为地质要素对云-地闪电有重要影响, 地质多要素是雷击火发生的重要条件, 并对未来研究趋势进行了探讨和展望。

关键词: 雷击火; 雷暴; 云地闪; 地质要素; 大兴安岭

RESEARCH PROGRESS ON THE GENETIC MECHANISM AND INFLUENCING FACTORS OF LIGHTNING FIRE IN DAXINGANLING FOREST AREA

FENG Yu-lin¹, LIU Ai-zhu², GUO Chang-lai¹, WANG Da-yong³, ZHANG Ge-ge³, ZHANG Guang-yu¹

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 2. Daxinganling Forestry Group Co., Jiagedaqi 165099, Heilongjiang Province, China; 3. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, Hebei Province, China

Abstract: Forest lightning fire, which is ignited by lightning, brings great loss to human beings and ecological environment. The study summarizes the research progress in China and abroad in terms of the spatiotemporal rules of occurrence, ignition mechanism, influencing factors and prediction of lightning fire in Daxinganling forest area. Based on the geological background analysis of areas with frequent lightning strikes, it is concluded that geological factors have significant effects on cloud-ground lightning, and geological multi-factors are important conditions for the occurrence of lightning fire. At the end, the paper discusses the research trend in the future.

Key words: lightning fire; thunderstorm; cloud-to-ground lightning; geological factor; Daxinganling Mountains

0 前言

雷击火是由雷暴形成的闪电与地面具备燃烧条件的可燃物接触引起的火。雷击火发生需要具备 3 个基本条件: 火源、可燃物及利于火蔓延的环境。雷击火

发生不仅与雷电活动相关, 也与可燃物干燥程度和气象条件密切相关。当雷暴, 尤其是干雷暴出现时, 如果此时发生的降水少且可燃物干燥, 就容易发生雷击火^[1-2]。全世界每年有数百万公顷森林遭受火灾的侵

收稿日期: 2022-11-10; 修回日期: 2023-02-15。编辑: 黄欣。

基金项目: 中国地质调查局项目“东北地区自然资源综合调查”(DD20211383); 东北地质科技创新中心区域创新基金“大兴安岭林区雷击火成因机理地质因素研究”(QCJJ2023-43)。

作者简介: 冯雨林(1980—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事遥感地质调查与研究, 通信地址 沈阳市黄河北大街 280 号, E-mail: 68051629@qq.com

通信作者: 郭常来(1980—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事水文地质环境地质、自然资源调查与研究, 通信地址 沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail: guochanglai@126.com

害,联合国已把大面积森林火灾列为八大自然灾害之一,随着全球气候变暖,森林火灾危害可能会进一步加剧^[3]。

有学者研究认为,适度的林火有助于促进生态系统的更新和演替,维持生态系统平衡,但严重的林火将形成森林火灾,进而对森林生态系统造成重大影响^[1]。大兴安岭林区雷击引发的森林火灾损失与危害极大,常常导致成片森林被毁,危及土壤、微生物和野生动物,进而对森林生态系统及其水源涵养功能造成重大影响,对我国东北地区生态安全构成威胁。同时,持续的森林火灾可能增加温室气体排放,影响“双碳”目标的实现。随着全球气候变暖,大兴安岭针叶林区的增温幅度远大于全球平均速率^[4],今后 50 a 内全球森林火险的发生几率和严重程度将增加,加强全球变化背景下的大兴安岭林区林火研究尤为迫切。

大兴安岭是我国林区雷击火高发区和火灾危害最严重的地区,雷击火占近 40 a 发生森林火灾总数的 30% 以上。如何科学高效地掌握雷击火的分布规律和影响因素,并对其进行预测预报,最大限度的减少林火带来的损失一直是林业管理部门和科研部门十分关注的问题。国内外林草、气象、森林防护、植物学等相关领域的专家学者相继对雷击火分布规律、影响因素及预测预报模型做了大量研究,研究成果各有侧重,涉及到的因素主要有环境因子、气象因子、地形因子、植被因子和可燃物湿润度指数等。本研究对雷暴与雷击火的成因机理、影响因素、时空分布规律、危害、预测预报模型和防治措施等相关研究进展进行总结评述,结合作者的研究和认知,建议加强地质要素对云-地闪电作用机理的研究,并提出了未来研究方向,以期为我国林区雷击火防控工作提供参考。

1 研究区地质概况

研究区位于大兴安岭北段,中国兴蒙造山带的东北部,位于古亚洲洋构造域和环太平洋中生代构造域 2 个构造带上,主要由额尔古纳地块和大兴安岭地块组成,地质演化历史漫长,地质构造十分复杂,沉积作用、岩浆作用、变质作用及成矿作用十分发育。地层主要为漠河盆地及其周边地质体,盆地基底为隐伏的额尔古纳岛弧,为河流-滨湖相碎屑岩建造,晚侏罗世—早白垩世为北北东向展布的中基性-酸性火山岩带,

与火山岩带相关的浅成、超浅成的小侵入岩体发育。中生代火山岩规模宏大,伴生有丰富的多金属矿产资源。中生代北东、北西向区域性断裂控制了花岗岩的侵入和火山喷发,为后期金多金属成矿提供了矿源层^[5]。同时,不同的岩石具有不同的磁化率。不同侵入岩岩石组合的磁化率均值随着岩石的基性增强而增大,以超基性和基性岩磁性为最强,其次为中性酸性侵入岩,具有中等磁性;火山岩多具有磁性,并且依照酸性火山岩→中性火山岩→基性→超基性火山岩的次序,呈由弱到强的变化规律;由外动力地质作用生成的碎屑沉积岩一般磁性弱,但元古宙地层较古生代地层磁性强;变质岩(特别是热动力接触变质岩)有较强的磁性。

2 前人研究概述

2.1 雷击火引燃机理

大兴安岭林区是我国重要原始生态林区之一,狭长高耸的山脉是东北平原与内蒙古高原的分界线,属寒温带大陆性季风气候,春秋两季风大干旱,春夏之交常有冷锋过境,易形成干雷暴,可燃物载量大,地表干枯,极易发生雷击火情。雷击引起森林火灾的可能性与气象条件、植被可燃物、环境因素等状况有关。可燃物包括树叶、树干、枯枝落叶、林下草本、腐殖质等有机物质,大兴安岭林区分布有落叶松林、樟子松林、桦木林、次生柞木林、沟塘草甸、采伐迹地多种可燃物类型,林下经年累月堆集巨厚的草本腐殖层。树下的枯落物层和腐木更容易发生雷击火,土壤有机质含量对阴燃的影响也非常大^[6]。

闪电是雷击火发生的火源,如何定量描述闪电的影响因素,是准确预测、预报雷击火发生的重要条件之一。云地闪回击电流强度、中和的电荷量和到达地面的能量是云地闪引燃森林可燃物的直接因素^[7]。Fuquay 等提出了引燃模式的概念^[8],阐述了雷击火引燃的过程和影响因素,但笔者认为,如果能够考虑地质因素对云-地闪电的影响,雷击火的预测预报将会更加精准。

雷击火主要与干雷暴(仅有雷电出现,没有或少量降水伴随)的活动密切相连。干雷暴形成于大气对流过程,是引发森林雷击火的重要因素。雷暴是一种强对流天气过程,需要地表受热、地形(迎风面)的抬升作用或外来强气团的干扰等共同作用,大气温度垂直

递减率是衡量其稳定性的重要参数^[9-11]。雷暴有地方性雷暴和锋面雷暴。地方性雷暴由于地形作用,只局限于一定的区域^[2]。锋面雷暴由于冷暖气团的交互作用,会导致局部环境中产生上升的暖湿气团和下降的干冷气团,形成对流云,二者对流摩擦,产生并聚集大量电荷,易击穿空气,产生对地放电现象。湿雷暴发生时大气下垫面暖湿,有利于降雨的形成,不易引发林火。而干雷暴降水少,地面增温,相对湿度降低,可燃物干燥,一旦落雷就很容易起火并蔓延成灾,蔓延速度与森林类型、气象条件及地形条件等相关。例如,在美国北方针叶林区干雷暴只占有所有雷暴的20%,但引发的火灾面积却占到火灾总面积的40%^[12];当带电云层与地面电场达到一定强度时(10^5 V/m),空气被击穿形成云地闪电^[13];云地闪连续放电过程超过40 ms才有可能引发雷击火^[8];正地闪在干雷暴中出现的概率极大,并且引燃概率更高^[14]。

2.2 雷击火时空分布规律

雷击火受到气象条件、地形、海拔等多重因素影响,具有一定的时空分布规律。大兴安岭林区雷击火的发生,具有一定的周期性,周期约2~4年^[2]。对1968—2020年雷击火数据统计分析发现,78%的雷击火分布在北纬51°以北地区,高发区集中分布在漠河、阿木尔、呼中、塔河、松岭、新林地区。大兴安岭雷击火发生次数呈波动分布,但是呈增长趋势,尤其是2000年以后进入了雷击火的高发期。雷击火主要发生在5—8月份,其中6月份发生次数最多。雷击火的最大过火面积出现在5月和6月,约占全年过火总面积的85%。每日13:00—17:00是雷击火高发时段,又以15:00—16:00为最高时段。这与众多专家的研究结果基本一致^[15-17]。

2.3 雷击火影响因素

众多研究成果认为,雷击火的发生与气候气象条件、雷暴发生、可燃物状况、地形等因素密切相关,其中雷暴是雷击火发生的必要条件,气象条件和可燃物属于充分条件。本研究认为地质多要素(高程、坡度、地表覆盖物、构造密集区、成矿带-矿集区、高磁性地质单元)也是雷击火发生的重要条件。

森林火灾的发生与气候条件的变化密切相关。年尺度上,降水量与雷击火次数呈显著负相关,气温与过火面积显著正相关;月尺度上,气温与过火次数显著

相关,风速、相对湿度与过火面积显著相关。日尺度上,最高气温与过火次数显著相关,相对湿度与过火面积显著相关^[18]。总体上大兴安岭地区雷击火与平均降水、相对湿度、平均风速成负相关,与夏季平均温度在一定条件下成正相关^[2]。雷击火的发生受年降水量影响最大,降水量越大,雷击火发生的概率越小。当年降水量在600 mm以上时,雷击火较少;降水量在350~580 mm时,雷击火较多^[1]。倪长虹则认为当降水在400 mm以下时雷击火频繁发生,当降水超过500 mm时,雷击火发生很少^[2]。

大兴安岭地区月尺度的雷击火与闪电具有较好的相关性^[1]。雷击火的高发期出现在每年5—8月,雷暴日的最高峰出现在7—8月,但由于此时降水也较多,使雷击火发生概率降低。同时,月尺度的雷击火与气温显著相关。闪电和降水经常同时发生,雷击火与闪电的关系受降水影响较大,只有在日降水量小于5 mm时,雷击火与闪电次数呈正相关^[1,9]。研究表明,闪电与对流性天气中的降水有较好的相关性,且随着纬度的增加,气候由潮湿趋向相对干旱,地闪活动与地表降水在时空分布上的线性关系增强。倪长虹认为温度是影响雷击火发生的关键因子,当夏季温度在14℃以下发生雷击火的几率是很小的,而气温在14~20℃之间是雷击火高发段^[2]。当湿润指数大于或等于2.60时,雷击火发生的可能性几乎为0^[6]。

2.4 雷击火预警与防治措施

森林雷击火的预报主要有火险指数法和数学模型法。早期通常只采用气象因子评价火险天气指标。后来的评价因子发展到每日最高气温、每日最小相对湿度、每日最大风速、日降雨量和可燃物等指标。随着闪电定位仪的出现,云地闪因子也被纳入进来。但这些因子构建的模型仅能定性描述雷击火发生与各环境因子的关系^[19]。

孙瑜等采用MAXNET模型进行森林雷击火的火险预测,认为日降雨量、云地闪电数量及云地闪回击电流强度是影响森林雷击火发生的3个最重要因素,日平均风速和坡向的影响较小^[19]。李帅认为,大兴安岭地区雷暴的发生受地形的影响明显,且具有热对流性和夜发性的特点^[20]。闪电定位系统能够自动记录每次闪电回击发生的时间、地理位置、雷电流强度、闪电极性和能量等数据。雷小丽等基于闪电定位仪数据的火

险指数算法^[1],预报大兴安岭地区雷击火的火险程度。王岩等基于电子信息技术和电场数字化技术设计雷击火预警系统^[21]。高永刚等采用权重分析法,建立森林雷击火综合指标模型^[7]。郭福涛等运用二项 Logistic 回归模型模拟了塔河地区雷击火空间概率分布^[22]。彭欢等利用 Logistic 回归模型对大兴安岭地区雷击火进行预测,总体预测正确率能达到 30%以上^[23]。

关于雷击火的防治与规避前人也做了诸多研究。陈宁^[24]研究认为,通过人工引雷技术建立闪电通道可以将自然闪电引导到安全地带,使自然闪电在时空上变为可控的闪电,进而减少雷击火发生次数,主动地保护林产资源。李迪飞等^[25-26]认为采用火箭拖带细金属导线的方法人工触发闪电,将形成闪电的云电荷在发展成雷电之前提前引导释放到地面,瓦解自然闪电形成的基础,引导闪电以可控的速率“释放”到指定地点,改变云-地放电的随机性、突发性和分散性,可以减少闪电引发林火的威胁;还可以建立引雷拦截带,将一定范围内的大部分云地闪电控制在拦截区,降低雷击火的发生几率。吴树森等^[27]总结可采用飞机撒播硫化银,破坏雷雨云的起电机;采用高速运动物体诱发云内闪电,破坏雷雨云的起电机;使用次声(16 Hz)或超声(2×10^4 Hz)的地、空干扰机影响或抑制闪电过程;还可以在雷击易发地带设置避雷装置,将雷电引入地下。目前,人工引雷的成功率一般可达到 60%以上^[28]。

防范雷击火灾害除了要加强闪电的预测拦截,还要关注降雨量和可燃物等关键指标,例如前一年冬季降雪较少的次年春季会使返青期延后,连续干旱的春夏季也会提高地表的干燥度,会为干雷暴的形成提供有利条件^[9],这样的年份要提前防范雷击火的发生。

3 技术展望与建议

前大量的研究主要集中在火源、植被可燃物(环境因素)、降雨和湿润度(气象因素)以及利于林火蔓延的环境(地形因子)等方面,且多以统计分析方式对其形成原因和规律进行阐述,而关于发生云-地闪电的内在作用机理,即地质要素对“引雷”、对雷击火的影响则鲜有报道。

作者研究认为,雷击火点高密度区域内,地质单元以古生代—中生代的二长花岗岩、花岗闪长岩和中酸

性火山岩为主,同时该区域内构造发育,分布有铜-金、铅-锌-钼等金属矿产。此外,区内分布有前寒武纪区域变质岩,中基性火山岩和玄武岩等高磁性地质体。据此作者提出基于“地质多要素对雷击火影响”的思路,以拓展雷击火研究的广度。同时就未来研究方向提出几点建议。

1)加强雷击火尤其是云-地闪电的发生与地质要素关系的研究。雷击火的发生与岩性、构造、成矿带、岩石的物性特征(磁化率和电阻率)等因素关系密切。

2)在干雷暴多发林区建立高空气象探测站,为预测预报获取第一手数据,雷暴是林火发生的必要条件,对其监测能够掌握数据链条顶端信息。

3)研制地面电场监测仪,监测云-地闪电在地面的分布与走势规律,进一步研究分析与地质要素的关系。结合闪电定位系统的实时数据,预测雷电的发生,预警雷击火的发生。

4)建议在防范林火的重要时间节点开展无人机定时巡查,实时监控火情。瞭望塔虽然 24 小时有人值守,但人力资源耗费大,观察半径有限,且容易误判漏判。开展无人机搭载热红外遥感系统巡逻,技术可行,且高效准确;

5)厄尔尼诺事件发生的年份,易造成干暖气候,易产生干雷暴,要引起足够的重视,提前预警。

参考文献(References):

- [1]雷小丽,周广胜,贾丙瑞,等.大兴安岭地区森林雷击火与闪电的关系[J].应用生态学报,2012,23(7):1743-1750.
Lei X L, Zhou G S, Jia B R, et al. Relationships of forest fire with lightning in Daxing'anling Mountains, Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(7): 1743-1750.
- [2]倪长虹.大兴安岭雷击火发生规律及预防对策的研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2008:1-48.
Ni C H. Study on occurrence and prevention of lightning fire in Daxing'anling region[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2008: 1-48.
- [3]杜春英,于成龙,刘丹.大兴安岭地区雷击火发生环境分析[J].中国农业气象,2010,31(4):596-599.
Du C Y, Yu C L, Liu D. Environmental analysis on lightning forest fires in Daxing'an Mountain[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(4): 596-599.
- [4]王宇,周广胜,贾丙瑞,等.1954—2005年中国北方针叶林分布区的气候变化特征[J].应用生态学报,2008,19(5):942-948.

- Wang Y, Zhou G S, Jia B R, et al. Climate change characteristics in Chinese boreal forest region from 1954 to 2005[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(5): 942-948.
- [5]王洪波,杨晓平. 大兴安岭北段新一轮国土资源大调查以来的主要基础地质成果与进展[J].地质通报, 2013, 32(2/3): 525-532.
- Wang H b, Yang X P. Main geological achievements and progress of the new round of national land and resources survey in North Daxinganling[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(2/3): 525-532.
- [6]于诗文,王秋华. 近年雷击火研究进展综述[J]. 林业调查规划, 2020, 45(2): 71-76, 112.
- Yu S W, Wang Q H. Review on research progress of lightning fire in recent years[J]. Forest Inventory and Planning, 2020, 45(2): 71-76, 112.
- [7]高永刚,顾红,张广英. 大兴安岭森林雷击火综合指标研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(6): 87-92.
- Gao Y G, Gu H, Zhang G Y. Integrated index study on forest lightning fire for Daxinganling Mountains [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(6): 87-92.
- [8]Fuquay D M, Baughman R G, Latham D J. A model for predicting lightning-fire ignition in wildland fuels [EB/OL]. United States Department of Agriculture, 1979. [2024-09-19] https://digitalcommons.usu.edu/govdocs_wfires/5/
- [9]黄艳,张吉利,张明远,等. 干雷暴与森林火险关系研究进展[J]. 世界林业研究, 2015, 28(6): 40-45.
- Huang Y, Zhang J L, Zhang M Y, et al. Research advances in relation between dry thunderstorm and forest fire weather[J]. World Forestry Research, 2015, 28(6): 40-45.
- [10]俞小鼎,周小刚,王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报, 2012, 70(3): 311-337.
- Yu X D, Zhou X G, Wang X M. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection [J]. Acta meteorologica Sinica, 2012, 70(3): 311-337.
- [11]许爱华,詹丰兴,刘晓晖,等. 强垂直温度梯度条件下强对流天气分析与潜势预报[J]. 气象科技, 2006, 34(4): 376-380.
- Xu A H, Zhan F X, Liu X H, et al. Influence analysis of strong vertical temperature gradient on severe convective storms and application in potential prediction [J]. Meteorological Science and Technology, 2006, 34(4): 376-380.
- [12]Peterson D, Wang J, Ichoku C, et al. Effects of lightning and other meteorological factors on fire activity in the North American boreal forest: Implications for fire weather forecasting [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10(14): 6873-6888.
- [13]张吉利,毕武,王晓红,等. 雷击火发生的影响因子与预测研究进展[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2674-2684.
- Zhang J L, Bi W, Wang X H, et al. Lightning-caused fire, its affecting factors and prediction: A review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(9): 2674-2684.
- [14]Uman M A. The lightning discharge[M]. San Diego: Dover Publications, 2001.
- [15]贾丙瑞,周广胜,于文颖,等. 1972—2005年大兴安岭林区雷击火特征及其与干旱指数的关系[J]. 林业科学, 2011, 47(11): 99-105.
- Jia B R, Zhou G S, Yu W Y, et al. Characteristics of lightning fire in Daxing'anling forest region from 1972 to 2005 and its relationships with drought index[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(11): 99-105.
- [16]张恒,张鑫,赵鹏武,等. 内蒙古森林草原雷击火火灾时空分布特征[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(12): 46-51.
- Zhang H, Zhang X, Zhao P W, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of lightning fires in forests and grasslands in Inner Mongolia [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(12): 46-51.
- [17]杜春英,李帅,刘丹,等. 大兴安岭地区森林雷击火发生的时空分布[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(3): 72-76.
- Du C Y, Li S, Liu D, et al. Spatiotemporal distribution of lightning-caused forest fires in Daxinganling area[J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(3): 72-76.
- [18]于文颖,周广胜,赵先丽,等. 大兴安岭林区火灾特征及影响因子[J]. 气象与环境学报, 2009, 25(4): 1-5.
- Yu W Y, Zhou G S, Zhao X L, et al. Characteristics of forest fire and its controls in Daxing'anling Mountains, Heilongjiang Province [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2009, 25(4): 1-5.
- [19]孙瑜,史明昌,彭欢,等. 基于MAXENT模型的黑龙大大兴安岭森林雷击火火险预测[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1100-1106.
- Sun Y, Shi M C, Peng H, et al. Forest lighting fire forecasting for Daxing'anling Mountains based on MAXENT model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(4): 1100-1106.
- [20]李帅,陈莉,周永吉. 大、小兴安岭及邻近地区雷暴气候特征[J]. 山地学报, 2008, 26(4): 439-444.
- Li S, Chen L, Zhou Y J. Research on climate characteristics of thunderstorm phenomena in areas around Daxing'an Mountain and Xiaoxing'an Mountain [J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(4): 439-444.
- [21]王岩,刘强. 大兴安岭林区雷击火预警系统设计[J]. 黑龙江生态工程职业学院学报, 2012, 25(2): 18-19.
- Wang Y, Liu Q. Design of lightning fire warning system in Daxinganling Mountains[J]. Journal of Heilongjiang Vocational Institute of Ecological Engineering, 2012, 25(2): 18-19. (in Chinese)
- [22]郭福涛,苏漳文,马祥庆,等. 大兴安岭塔河地区雷击火发生驱动因子综合分析[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6439-6448.
- Guo F T, Su Z W, Ma X Q, et al. Climatic and non-climatic factors driving lightning-induced fire in Tahe, Daxing'an Mountain[J]. Acta

- Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6439–6448.
- [23]彭欢, 史明昌, 孙瑜, 等. 基于 Logistic 的大兴安岭雷击火预测模型[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(7): 166–169.
- Peng H, Shi M C, Sun Y, et al. Lightning fire forecasting model of Daxing'an Mountain based on logistic model[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(7): 166–169.
- [24]陈宁. 雷电预警技术在人工引雷作业中的应用研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011: 1–63.
- Chen N. Research on lightning warning technology in the application of artificial triggering lightning assignments[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011: 1–63.
- [25]李迪飞, 毕武, 宋欣, 等. 多雷林区“闪电拦截”防火技术研究[J]. 林业机械与木工设备, 2010, 38(9): 26–27.
- Li D F, Bi W, Song X, et al. Study on fire prevention technology “lightening interception” in forest areas struck by numerous thunders [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2010, 38(9): 26–27.
- [26]李迪飞, 毕武, 张明远, 等. 人工引雷技术研究及其在森林防火中的应用[J]. 林业机械与木工设备, 2010, 38(3): 17–20.
- Li D F, Bi W, Zhang M Y, et al. Artificially triggered lightning technology research and relevant application in forest fire prevention [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2010, 38(3): 17–20.
- [27]吴树森, 黄鑫. 森林雷击区人工影响雷电方法综述[J]. 森林防火, 2010, 27(4): 18–20.
- Wu S S, Huang X. A review on the methods of affecting lightning artificially in the forest area struck by lightning [J]. Forest Fire Prevention, 2010, 27(4): 18–20.
- [28]李良福, 胡怀林. 森林雷电防护研究[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 1–242.
- Li L F, Hu H L. Research on forest lightning protection[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004: 1–242. (in Chinese)

(上接第 652 页/Continued from Page 652)

- [14]张航, 刘玉梅, 宋立斌, 等. 吉林通化盆地三棵榆树断陷中新世代构造演化特征[J]. 世界地质, 2017, 36(4): 1092–1099.
- Zhang H, Liu Y M, Song L B, et al. Characteristics of Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution of Sankeyushu fault depression in Tonghua Basin, Jilin[J]. Global Geology, 2017, 36(4): 1092–1099.
- [15]何奕言, 程日辉, 宋立斌. 通化盆地亨通山组沉积特征及储层发育规律[J]. 世界地质, 2018, 37(3): 861–872.
- He Y Y, Cheng R H, Song L B. Sedimentary characteristics and reservoir development of Hengtongshan Formation in Tonghua Basin [J]. Global Geology, 2018, 37(3): 861–872.
- [16]王丹丹, 赵松, 张文浩, 等. 松辽盆地外围通化地区高精度重磁电特征及其构造格架[J]. 中国地质, 2020, 47(4): 1056–1068.
- Wang D D, Zhao S, Zhang W H, et al. Lithofacies identification and deep structure of Tonghua area in the periphery of Songliao Basin based on high-precision gravity-magnetic electrical survey[J]. Geology in China, 2020, 47(4): 1056–1068.
- [17]王丹丹, 张交东, 周新桂, 等. 东北通化盆地群下白垩统页岩油气成藏地质条件[J]. 东北石油大学学报, 2019, 43(6): 83–93.
- Wang D D, Zhang J D, Zhou X G, et al. Geological conditions of hydrocarbon accumulation in Lower Cretaceous shale oil and gas in Tonghua Basin Group, Northeast China [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2019, 43(6): 83–93.
- [18]中国石油天然气总公司. SY/T 6285—1997 油气储层评价方法[S]. 北京: 中国石油天然气总公司, 1997: 7–8.
- China National Petroleum Corporation. SY/T 6285—1997 Evaluating methods of oil and gas reservoirs[S]. Beijing: China National Petroleum Corporation, 1997: 7–8.
- [19]申婉琪. 松辽盆地东部盆地群下白垩统泥页岩源盖层特征[D]. 大庆: 东北石油大学, 2017.
- Shen W Q. Characteristics of the Lower Cretaceous shales and cap rock of eastern basin group to Songliao Basin[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.
- [20]刘国东. 通化盆地三棵榆树断陷下白垩统鹰嘴砬子组储层特征[J]. 世界地质, 2020, 39(3): 610–616.
- Liu G D. Reservoir characteristics of lower cretaceous Yingzuilazi Formation in Sankeyushu fault depression of Tonghua Basin[J]. Global Geology, 2020, 39(3): 610–616.