

# 中蒙边境典型草原草本可燃物燃烧性研究

张恒<sup>1</sup>, 崔孟然<sup>2</sup>, 单延龙<sup>3\*</sup>, 王飞<sup>1\*</sup>

(1. 内蒙古农业大学林学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2. 内蒙古农业大学草原与资源学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 3. 北华大学林学院, 北华大学森林草原防火科技创新中心, 吉林 吉林 132013)

**摘要:**【目的】研究中蒙边境典型草原地区二连浩特市、东乌旗和新巴尔虎右旗草原可燃物的燃烧性能, 对典型地区草原可燃物燃烧性能进行对比, 根据草原可燃物理化指标进行燃烧性排序并分析, 为中蒙边境地区草原火灾防控提供参考。【方法】采用外业调查和室内燃烧相结合的方法, 对中蒙边境地区试验点典型草原草本可燃物的粗脂肪、灰分、燃点、热值等理化指标进行分析, 借助 SPSS 18.0 和 Origin 2018 等软件, 对理化指标进行主成分分析并进行燃烧性排序。【结果】中蒙边境典型地区草原可燃物粗脂肪含量大小顺序为: 东乌旗>新巴尔虎右旗>二连浩特市。各试验点可燃物热值大小顺序为: 新巴尔虎右旗>二连浩特市>东乌旗。各试验点可燃物燃点大小顺序为: 新巴尔虎右旗>东乌旗>二连浩特市。各试验点可燃物灰分大小顺序为: 二连浩特市>东乌旗>新巴尔虎右旗。根据燃烧性能综合得分结合可燃物理化特性, 中蒙边境地区各试验点典型草原可燃物燃烧性大小顺序为: 东乌旗>二连浩特市>新巴尔虎右旗。【结论】中蒙边境典型草原区二连浩特市、东乌旗和新巴尔虎右旗地区中新巴尔虎右旗草原可燃物燃烧性最弱, 火灾危险性最低, 东乌旗由于可燃物性质和气象条件因素等综合作用导致此地区草原可燃物燃烧性最强, 火灾危险性最高, 需重点防范。

**关键词:** 草本可燃物; 中蒙边境; 草原; 燃烧性; 主成分分析

中图分类号: S812.6; S718

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2006(2021)05-0171-07



## Study on flammability of herbaceous fuel in typical grassland of China-Mongolia border

ZHANG Heng<sup>1</sup>, CUI Mengran<sup>2</sup>, SHAN Yanlong<sup>3\*</sup>, WANG Fei<sup>1\*</sup>

(1. College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China; 2. College of Grassland and Resources, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 3. Forestry College of Beihua University, Beihua University Science and Technology Innovation Center of Wildland Fire Prevention and Control, Jilin 132013, China)

**Abstract:** 【Objective】This paper studied the flammability of fuel in typical grasslands of Erenhot City (EC), East Wujing Banner (EWB) and Xin Barag Right Banner (XBRB) in China-Mongolia border. Studying the flammability of fuel in typical grasslands is of great significance for controlling and prevention of the occurrence of grassland fires in China-Mongolia border. 【Method】Based on field investigation and indoor combustion, analyzed the physical and chemical properties such as crude fat, ash content, ignition point and calorific value of fuel in typical grasslands in China-Mongolia border and based on SPSS 18.0 and Origin 2018 software, used the principal component analysis to analyze the physical and chemical properties to obtain the fuel flammability. 【Result】Crude fat of fuel in the typical grasslands in China-Mongolia border from strong to weak is EWB, XBRB, EC. Calorific value from strong to weak is XBRB, EC, EWB. Burning point from strong to weak is XBRB, EWB, EC. Ash content from strong to weak is EC, EWB, XBRB. According to the comprehensive index of flammability performance combined with the fuel physical and chemical properties, the flammability of typical grasslands in China-Mongolia border from strong to weak is EWB, EC, XBRB. 【Conclu-

收稿日期 Received: 2019-10-11

修回日期 Accepted: 2021-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(31860211)。

第一作者: 张恒(zhangheng\_nefu@126.com), 副教授, 博士, ORCID(0000-0001-7915-2450)。\*通信作者: 单延龙(shanyl@163.com), 教授, 博士, 负责数据处理与分析, ORCID(0000-0001-7915-2450); 王飞(wangfeihao2003@aliyun.com), 副教授, 博士, 负责外业设计与取样, ORCID(0000-0001-5389-0375)。

引文格式: 张恒, 崔孟然, 单延龙, 等. 中蒙边境典型草原草本可燃物燃烧性研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(5): 171-177. ZHANG H, CUI M R, SHAN Y L, et al. Study on flammability of herbaceous fuel in typical grassland of China-Mongolia border[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2021, 45(5): 171-177. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.201910006.

sion] The typical grassland on the border between China and Mongolia in the areas of EC, EWB and XBRB, fuel flammability in XBRB grassland is weakness and has the lowest fire risk; Based on fuel properties and meteorological conditions, EWB has the highest fire risk and should take prevention measures.

**Keywords:** herbaceous fuel; China-Mongolia border; grasslands; flammability; principal component analysis (PCA)

草地在防风固沙、涵养水源、保持水土、净化空气以及维护生物多样性方面,具有十分重要的作用<sup>[1]</sup>。草原火灾在全球范围内发生频繁<sup>[2]</sup>,是自然生态系统中重要的干扰因子之一<sup>[3]</sup>。据统计,1981—2015年内蒙古自治区共发生草原火灾1 177起,过火面积为8 138 713.1 hm<sup>2</sup>;平均年发生33.6起,过火面积232 534.66 hm<sup>2</sup>。草原火灾多发主要是内蒙古自治区的气候因素和可燃物因素导致的<sup>[4]</sup>,其中可燃物因素包括可燃物本身的结构状态、尺寸大小、数量分布和理化性质等<sup>[5]</sup>,草本可燃物的燃烧性能受到自身理化性质的影响<sup>[6]</sup>。因此,可燃物理化性质对于火灾的发生、发展和管理都有重要的作用。

有关可燃物理化性质对燃烧性能的影响方面学者们做了大量的研究。Wilgen等<sup>[7]</sup>选用南非部分树种的含水率、热值、粗脂肪含量等理化指标对燃烧性进行了研究;李旭等<sup>[8]</sup>对昆明地区具有代表性的15种木本植物进行研究,通过测定植物化学性质分析植物燃烧性大小;王雷等<sup>[9]</sup>对呼和浩特市21种园林树种的3个部位(叶、小枝、大枝)的理化指标及燃烧性进行研究,应用主成分分析进行燃烧性排序,筛选出地区园林抗火树种;裴建元等<sup>[10]</sup>选择10种常绿阔叶树种,采集不同树种的树叶、树枝和树皮,烘干粉碎后在室内进行理化性质的测定分析,以不同树种器官的含水率、热值、燃点、木质素、粗纤维、粗灰分、粗脂肪7个指标作为评价因素,对10个树种的抗火性进行聚类分析。王小雪等<sup>[11]</sup>对黑龙江省主要草本可燃物燃烧性进

行研究,结果表明研究森林杂草层次的燃烧性使森林可燃物分析更加具有整体性和系统性。对森林地表可燃物燃烧性评价研究提高了森林火险预测预报的准确性<sup>[12]</sup>。草地可燃物是草原火发生和蔓延的物质基础,主要以含水率较低的草本植物为主<sup>[13]</sup>,针对草原可燃物理化性质进行研究可以分析地区内可燃物的燃烧性,控制草原火灾的发生。

我国草原火灾发生频率高,火灾造成的损失较大,对草原生态系统破坏严重,北方草原大约1/3地区容易发生草原火灾。其中,影响内蒙古草原火灾的内因是降水少、气温高、气候干燥等<sup>[14]</sup>,这些气象因素的变化会改变草原火发生的外界客观条件和草原植被自身的可燃性,从而影响草原火的发生及蔓延<sup>[15]</sup>。中蒙边境地区边境线较长且草原火灾发生极为频繁<sup>[16]</sup>,大部分草原地理位置偏僻,管理难度较大,国境线附近的草原火灾发生频度高,对国家及人民生命财产造成了较为严重的损失。因此,研究中蒙边境地区草原火灾是十分必要的。本研究以中蒙边境典型地区草原草本可燃物为研究对象,在中蒙边境地区二连浩特市、东乌旗和新巴尔虎右旗内采取样本,对样本的粗脂肪、燃点、热值、灰分等理化指标进行分析,比较可燃物燃烧性大小。筛选出中蒙边境地区草原火灾高风险地区,以期对草原火灾预防提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区自然地理概况见表1。

表1 研究区自然地理概况

Table 1 Overview of the natural geography of the research area

采样点 sampling point	地理坐标 geographic coordinates	年均降水量/ mm	年均 蒸发量/mm	干旱指数 drought index	年均气温/℃ average annual air temperature	年极端温度/℃ annual extreme temperature	
		average annual precipitation	average annual evaporation		最高 max.	最低 min.	
EC	111°96 E 43°65'N	142.2	2 695	19.95	3.4	41.1	-37.1
EWB	116°97 E 45°52'N	300.0	>3 000	4.00~10.00	1.6	39.7	-40.7
XBRB	118°23E 48°22'N	247.3	2 000	8.09	0.3	40.2	-44.9

注:EC.二连浩特市 Erenhot City;EWB.东乌旗 East Wujimqin Banner;XBRB.新巴尔虎右旗 Xin Barag Right Banner。下同。The same below.

二连浩特市(Erenhot City,简称EC)位于内蒙古自治区正北部的锡林郭勒盟西部,气候干旱,地面干燥,属于中温带干旱大陆性气候,是典型的干旱草原沙化区,自然植被以荒漠草原为主<sup>[17]</sup>;东乌旗(Eastern Wujimqin Banner,简称EWB)是隶属内蒙古自治区锡林郭勒盟的一个旗,地处内蒙古自治区锡林郭勒盟东北部,北与蒙古国交界,国境线长达527.6 km,属北温带大陆性气候,地区地带性草地类型主要包括温性草甸草原类和温性典型草原类<sup>[18]</sup>;新巴尔虎右旗(Xin Barag Right Banner,简称XBRB)位于我国东北边陲,国境线长515.4 km,属温带大陆性气候,新巴尔虎右旗草地类型多样,可分为草甸草原和干草原两大草原地带<sup>[19]</sup>。

## 1.2 试验材料

依据典型原则,在每个地区选择能够代表当地主要草本的样地,随机布设10 m×10 m的样地,每个地区3块样地,分别为I、II、III,然后在每个样地四角及两条对角线中心点处取5个小样方,样方大小为1 m×1 m,小样方内地上所有草本齐地收割,装入信封袋,采集样品野外称取鲜质量,标记好带回实验室进行试验分析,主要测量粗脂肪、燃点、热值、灰分等理化指标。

## 1.3 试验方法

### 1.3.1 粗脂肪测定

将经过处理、分散且干燥的样品用乙醚或石油醚等溶剂回流提取,使样品中的脂肪进入溶剂中,回收溶剂后所得的残留物即为粗脂肪。

粗脂肪含量(质量分数, $c$ )计算公式为:

$$c = \frac{W_2 - W_1}{W} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $W_1$ 为抽提物提取前的总质量,g; $W_2$ 为抽提物提取后的总质量,g; $W$ 为抽提前样品的质量,g。

### 1.3.2 灰分测定

将制备好的样品2 g左右放入事先干燥称量好的坩埚内,并称质量。将烘干的小坩埚和样本置于点烧炉进行点烧直至无烟状态。将小坩埚放置在马弗炉内,设定温度为600 ℃,持续6 h,使用电子秤称质量并记录,灰分+坩埚的质量,进行2次重复试验。

灰分的含量(质量分数, $X$ )计算公式为:

$$X = \frac{m_2 - m_1}{m_3 - m_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $m_1$ 为坩埚质量, $m_2$ 为坩埚和灰分的质量, $m_3$ 为坩埚和样品的质量。

### 1.3.3 热值测定

热值的测量采用Parr 6300型全自动氧弹式热量计测定样品的热值。将采集的样品粉碎后用压饼器压饼,处理好的样品放入热值计量仪内测定,燃烧后热值计量仪会显示热量值并打印。

### 1.3.4 可燃物燃点测定

本研究中用实验仪器Perkin Elmer STA6000(热重分析仪)计算燃点。将样本粉碎成粉末状,并将少量样本放入微型坩埚内;设定程序,升温速率30 ℃/min,通氧速率分别为20 mL/min。运行程序为:首先升温至100 ℃并保持5 min,然后以30 ℃/min的升温速率升温至700、600 ℃;得出吸热放热曲线(DSC),计算出燃点。

## 1.4 数据分析方法

试验数据经Excel 2010软件整理后,采用SPSS 8.0软件对数据进行方差分析(One-way ANOVA),同时采用Origin 2018软件进行作图,分析比较典型地区草本可燃物的灰分、粗脂肪、燃点、热值等理化指标,对处理的理化指标进行主成分分析,各主成分的贡献率要求达到较高指标,保证这些主成分可以反映样本的更多信息,得出燃烧性比较结果。

## 1.5 主成分分析排序

主成分分析法可以避免重复信息的干扰,使原有信息不损失或很少损失,将多个指标进行处理,得出独立并且可以携带更多原样本信息综合指标<sup>[20]</sup>。评价典型地区草原可燃物抗火性能的综合指标需要利用式(3)<sup>[21]</sup>计算出典型草原可燃物主成分合成变量( $Y$ 值),可利用各主成分的贡献率和各主成分的因子得分计算合成变量( $Y$ 值),各主成分的贡献率须达到90%以上。

$$Y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots + a_mx_m \quad (3)$$

式中: $a_m$ 为各主成分贡献率; $x_m$ 为各主成分因子得分; $m$ 为主成分个数。

## 2 结果与分析

### 2.1 中蒙边境典型草原可燃物燃烧性分析

可燃物脂肪是一种成分很复杂的易燃物,对燃烧行为影响较大<sup>[5]</sup>。可燃物中的脂肪含量较其他理化指标所占比例小,但它对燃烧反应的发生影响很大<sup>[22]</sup>。通常用可燃物中粗脂肪含量衡量可燃物的易燃性,可燃物燃烧性越小,说明可燃物燃烧反应越不易发生,可燃物中粗脂肪含量较高时,可燃物越易燃,燃烧性越大。对3个区试验点典型草原草本可燃物进行测定,得到其灰分、粗脂肪、热值和

燃点结果见图1。如图1A所示,二连浩特市(EC)可燃物粗脂肪含量明显低于东乌旗(EWB)和新巴尔虎右旗(XBRB),因此二连浩特市边境草原可燃物燃烧强度也低于东乌旗和新巴尔虎右旗,燃烧性较小;东乌旗样地Ⅱ和新巴尔虎右旗样地Ⅰ粗脂肪量明显高于其他地区,样地内草种多为易燃草种,燃烧强度大。综合对比3个地区,明显发现东乌旗地区典型可燃物粗脂肪含量高于其他地区。因此,各试验点可燃物粗脂肪大小顺序为:东乌旗>新巴尔虎右旗>二连浩特市。

粗灰分含量是指可燃物燃烧剩下的矿物质含量。粗灰分对燃烧有显著的影响,各种矿物质与催化纤维素进行反应后,可燃物中木炭增加,同时焦

油的形成减少<sup>[22]</sup>。灰分物质含量越高,可燃物就越难燃,蔓延越迟缓<sup>[8]</sup>。可燃物灰分含量越高,燃烧性能越差。如图1B所示,3个地区可燃物灰分最高值差距较小,二连浩特市和东乌旗地区可燃物灰分值均在10%以上,表明燃烧性较小;新巴尔虎右旗样地Ⅰ和样地Ⅲ可燃物灰分比较低,样地Ⅱ偏高,3块样可燃物的灰分含量不均,主要原因是样地内草本植物的数量和覆盖率不同,但新巴尔虎右旗样地灰分含量较另外两个地区可燃物灰分含量低,燃烧性较大。综合对比,二连浩特市可燃物灰分比其他两个地区更高,燃烧性更小。因此,各试验点可燃物灰分大小顺序为:二连浩特市>东乌旗>新巴尔虎右旗。

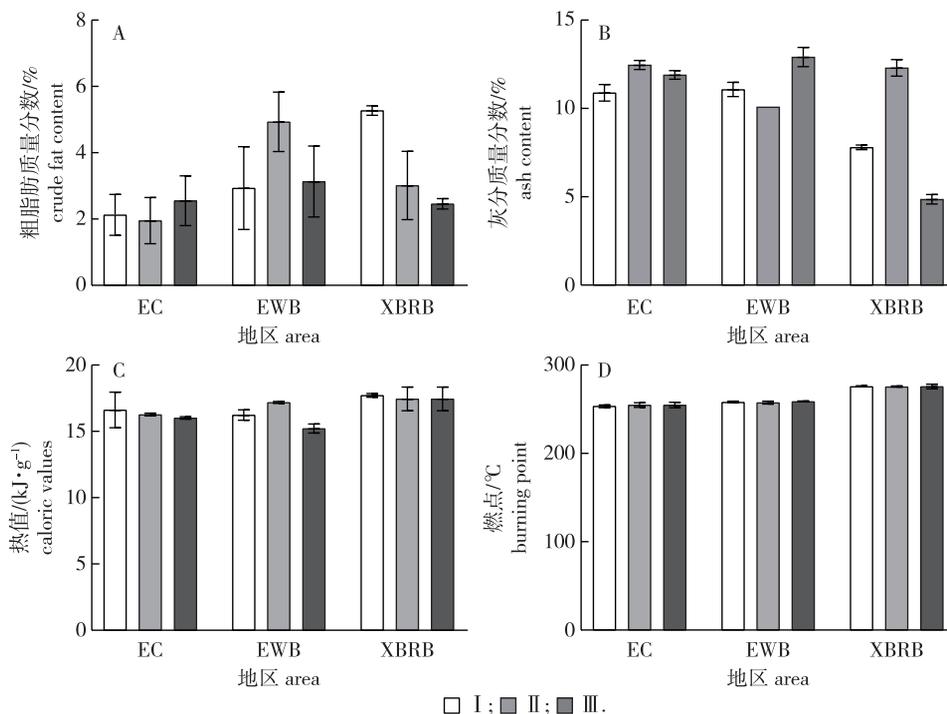


图1 中蒙边境地区可燃物粗脂肪含量、灰分含量、可燃物热值及可燃物燃点

Fig.1 The crude fat content, ash content, calorific value and burning point of fuel in China-Mongolia border

可燃物热值是指在绝干状态下单位质量的可燃物完全燃烧时所放出的热量。燃烧热值越大,释放热量越多,表明抗火能力越差<sup>[11]</sup>,则燃烧性越大。如图1C所示各地区样地植被热值均在14 kJ/g以上,热值差距不大,3个地区典型草原可燃物热值都偏高,燃烧性较大。综合对比,新巴尔虎右旗可燃物热值最大,燃烧性最大,在气象条件相同的情况下最易发火灾。各试验点可燃物热值大小顺序为:新巴尔虎右旗>二连浩特市>东乌旗。

受到外界火源的直接作用可燃物开始持续燃烧化学反应称为着火,燃点是可燃物开始着火的最低温度<sup>[22]</sup>。不同种类可燃物燃点差别较大,可燃

物的燃点越高,可燃物被引燃就需要更长的加热时间,越难以引燃,燃烧性越小;各地区典型草原可燃物燃点最高值差距不明显,可燃物燃点均在250℃以上,说明其燃烧性较小。综合对比3个地区,新巴尔虎右旗可燃物燃点最高,燃烧性最小(图1D)。燃点大小顺序为:新巴尔虎右旗>东乌旗>二连浩特市。

## 2.2 可燃物燃烧性评价指标

综合评价可燃物理化指标(灰分、热值、粗脂肪、燃点)对植物燃烧性的影响,其中热值、粗脂肪对可燃物燃烧性的影响为正向,灰分、燃点对可燃物燃烧性的影响为负向,可燃物灰分、燃点越低,燃

烧性越强,热值、粗脂肪等可燃物理化指标值越低,燃烧性越弱。所以,对实验测得的可燃物理化指标进行正向化处理<sup>[23]</sup>,使可燃物理化指标与燃烧性同向。

利用标准化以后的 3 个典型地区草原可燃物理化指标进行主成分分析,得到新的互不影响的可燃物变量样本的信息含量、贡献率、累计贡献率如表 2 所示。

表 2 样本相关矩阵的特征根与主成分贡献率

Table 2 Characteristic root and principal component contribution rate of sample correlation matrix

主成分 principal component	信息含量 information content	贡献率/% contribution rate	累计贡献率/% cumulative contribution rate
1	3.297	82.421	82.421
2	0.703	17.579	100.000
3	-1.000×10 <sup>13</sup>	-1.012×10 <sup>13</sup>	100.000
4	-1.001×10 <sup>13</sup>	-1.025×10 <sup>13</sup>	100.000

由表 2 可以看出,前两个主成分的累计贡献率已达到了 100%;表明主成分 3、4 对方差的影响较小,前两个主成分已经包含了大多数的信息,故需要忽略后两个主成分。因此前两个主成分即为中蒙边境典型地区草原可燃物抗火性能评价的复合指标。主成分载荷矩阵和各主成分因子得分见表 3 和表 4。

表 3 正交旋转后的主成分载荷矩阵

Table 3 Principal component load matrix after orthogonal rotation

指标 index	主成分 1 principal component 1	主成分 2 principal component 2
粗脂肪 crude fat content	-0.246	0.969
灰分 ash content	0.947	-0.321
燃点 burning point	0.929	-0.371
热值 caloric values	-0.991	0.133

由表 3 可以看出,在第 1 主成分中灰分、燃点系数较大,说明第 1 主成分在这两个指标的特征属性上有较大的因子载荷;在第 2 个主成分中粗脂肪、热值的系数较大,说明第 2 主成分在这两个指标属性上有较大因子载荷。

将各主成分的贡献率和各主成分的因子得分代入式(3)得到可燃物抗火性综合指标值及其排列顺序见表 4。

从各地区综合指标排序结合可燃物的理化特征分析,新巴尔虎右旗综合得分最高,燃烧性最低,

其次是二连浩特市,燃烧性中等,燃烧性最大的是东乌旗。

表 4 样本因子得分及各地区综合指标排序

Table 4 Sample component index and comprehensive index of different areas

地区 area	主成分 1 principal component 1	主成分 2 principal component 1	抗火性值 fire resistance value	排序 rank
EC	-0.342 04	1.102 88	-8.35	2
EWB	-0.784 10	-0.847 66	-79.53	3
XBRB	1.126 14	-0.255 22	88.33	1

### 3 讨 论

1)可燃物理化性质分析是可燃物易燃性研究的基础,是草原火灾研究的重点。中蒙边境地区地广人稀,一旦发生火灾,发展快、火线长、火势大、面积广、危害大<sup>[24]</sup>,所以对于中蒙边境地区草原火灾的研究刻不容缓。本研究以中蒙边境典型地区草原草本可燃物理化指标粗脂肪、灰分、热值和燃点为研究对象,利用主成分分析法,分析中蒙边境地区典型草本可燃物燃烧性,并对地区草本可燃物燃烧性进行综合排序,为筛选中蒙边境火灾防治重点区域提供依据。根据燃烧性分析结果,草原可燃物燃烧性最大的地区是东乌旗,其次是二连浩特市,新巴尔虎右旗燃烧性最小。此结果与周怀林等<sup>[25]</sup>从旗(县)的空间尺度上对内蒙古 1981—2005 年内蒙古草原火灾统计资料研究结果显示的新巴尔虎右旗比东乌旗发生火灾次数更多并不矛盾,因为草原火灾受诸多因素影响<sup>[26]</sup>,草原火的年际变化与植被状态和其气候条件具有密切关系<sup>[24]</sup>,而本研究主要考虑秋季植被理化性质,忽略研究地区年度气象变化。

东乌旗属北温带大陆性气候,自然条件较为恶劣,尤其春秋两季干旱、多风、日照强,为草原较高火险地区,同时也是境外火发生最频繁的区域之一<sup>[27]</sup>,秋冬季为东乌旗珠沁旗发生火灾最为频繁的季节<sup>[14]</sup>。草原植被秋季开始枯黄,草原地区降雨开始减少,可燃物含水率降低,秋季人类活动频繁<sup>[28]</sup>,这个时间发生草原火灾可能性较大。气象因素的变化会改变草原火发生的外界客观条件和草原植被自身的可燃性,从而影响草原火的发生及蔓延<sup>[16]</sup>。结合研究区气象条件,东乌旗较其他两地年降水量与年蒸发量都最高,干旱指数也较高,极端温度差距大,日照时间不足,不利于草种生长,恶劣的气象条件使草原可燃物难以生存,这可能是

导致东乌旗典型草原可燃物燃烧性大的原因;新巴尔虎右旗地区年蒸发量与年降水量差值最小,较其他两个地区生态条件更优越,更适合植物生长。内蒙古地区可燃物数量分布呈现从东北向西南减少趋势<sup>[29]</sup>,草地火气候指数分布的空间格局是从西向东逐级递减<sup>[30]</sup>,新巴尔虎右旗属于内蒙古东北部,可燃物数量与其他两个地区相比最大,燃烧性最小。二连浩特市地区生态条件在两者之间,可燃物燃烧性居中。草原火灾的发生和气象因子关系紧密<sup>[26]</sup>,为了减少东乌旗地区草原火灾的发生,需要及时掌握当地气象状况,气象条件影响着草本植物自身的理化性质,同时,对于中蒙边境地区尤其是东乌旗边境区,需要适当增加防火隔离带的数量和宽度,减少境外火的发生次数。

2) 如果对中蒙边境地区草原草本可燃物理化性质进行单独分析,粗脂肪含量对可燃物燃烧强度影响很大,从粗脂肪角度考虑,草原可燃物燃烧性大小排序为:东乌旗>新巴尔虎右旗>二连浩特市;热值越大,燃烧性越大,各地区热值差距不大。从热值角度考虑,草原可燃物燃烧性大小排序为:新巴尔虎右旗>二连浩特市>东乌旗;燃点是可燃物开始燃烧的最低温度,可燃物的燃点越低,相同火源条件下,燃烧性越大。从燃点角度考虑,燃点由大到小依次为:新巴尔虎右旗>东乌旗>二连浩特市;灰分是影响可燃物燃烧性的重要因素,灰分含量越高,对火灾的抑制和阻隔能力就越强<sup>[31]</sup>。从灰分的角度考虑,灰分含量由大到小依次为:二连浩特市>东乌旗>新巴尔虎右旗。各个理化指标对比结果与综合得出的燃烧性排序结果不完全相符,说明燃烧性受到多种理化性质的共同作用,单独考虑任何一种都不具有代表性。3个地区不同样地之间各种理化指标由于受到地形条件、采样地草种、人为条件等多方面的影响,导致同一地区实验数据有所差异。虽然存在差异性,但是由于采样、实验及数据处理十分严谨,各地区典型草原草本可燃物燃烧性排序结果准确性并未受到影响。相同地区不同区域气象条件变化较大,生长的典型可燃物理化指标差异明显,火源类型、草原分布规律以及人们的生产劳动等多因素共同作用使得地区之间可燃物燃烧性大小不同。

3) 本研究只重点研究理化性质对中蒙边境典型地区草原草本可燃物燃烧性的影响,没有考虑草本可燃物种类、可燃物载量、其他可燃物理化性质等方面,在今后的研究中,尚需对不同地区具体草本分别进行燃烧性实验,并根据不同地区样方内不

同草本的比例进行燃烧实验比较燃烧性大小,基于此对特定地区草本可燃物进行燃烧性等级划分,为草原火灾的预防打下基础。

根据各主成分的贡献率和各主成分的因子得分,各试验地中燃烧性能综合排序结果为:草原可燃物燃烧性最大的地区是东乌旗,其次是二连浩特市,燃烧性最小的地区是新巴尔虎右旗。新巴尔虎右旗地区抗火性最强,此地区火灾危险性较低,东乌旗因为可燃物和气象条件因素等综合作用导致此地区抗火性最弱,火灾危险性最高,需要重点预防。

#### 参考文献(reference):

- [1] 姜莉, 玉山, 乌兰图雅, 等. 草原火研究综述[J]. 草地学报, 2018, 26(4): 791-803. JIANG L, YU S, WULAN T Y, et al. Summary of grassland fire research [J]. Acta Agrestia Sin, 2018, 26(4): 791-803. DOI: 10.11733/j.issn.1007-0435.2018.04.001.
- [2] 张正祥, 张洪岩, 李冬雪, 等. 呼伦贝尔草原人为火空间分布格局[J]. 生态学报, 2013, 33(7): 2023-2031. ZHANG Z X, ZHANG H Y, LI D X, et al. Spatial distribution pattern of human-caused fires in Hulunbeir Grassland [J]. Acta Ecol Sin, 2013, 33(7): 2023-2031.
- [3] 雒瑞森. 全球火格局的时空变异及其机理分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. LUO R S. Global analysis of spatial and temporal variations of fire patterns and the mechanisms [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [4] 萨如拉, 张鑫, 韩霄, 等. 1981—2015年内蒙古自治区草原火灾时空动态研究[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(3): 421-425. SA R L, ZHANG X, HAN X, et al. Studies on the temporal and spatial dynamics of grassland fires in Inner Mongolia from 1981 to 2015 [J]. Fire Sci Technol, 2019, 38(3): 421-425.
- [5] 刘菲, 胡海清. 森林可燃物理化性质与燃烧性的研究综述[J]. 森林防火, 2005(1): 28-30. LIU F, HU H Q. Review of research on flammable physical properties and flammability of forests [J]. Forest Fire Prevention, 2005(1): 28-30.
- [6] 郭文霞. 北京地区油松林抗火性综合分析及调控研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009. GUO W X. Study on the fire-resistance comprehensive analysis and control of Chinese pine forest in Beijing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009.
- [7] WILGEN V B W, HIGGINS K B, BELLSTEDT D U. The role of vegetation structure and fuel chemistry in excluding fire from forest patches in the fire-prone fynbos shrublands of South Africa [J]. J Ecol, 1990, 78(1): 210.
- [8] 李旭, 王秋华, 张雨瑶. 滇中火灾高发区15种木本植物燃烧性研究[J]. 林业调查规划, 2016, 41(2): 62-68. LI X, WANG Q H, ZHANG Y Y. Study on combustibility of 15 woody plants in the high fire risk area of central Yunnan [J]. Forestry Inventory and Planning, 2016, 41(2): 62-68.
- [9] 王雷, 徐家琛, 朱鹏飞, 等. 呼和浩特市主要园林树种理化性质及燃烧性研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(3): 74-80. WANG L, XU J C, ZHU P F, et al. Physical and chemical properties and combustibility of predominant landscape tree species in Hohhot, China [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2020, 44(3): 74-80. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.201905024.
- [10] 裴建元, 严员英, 叶清, 等. 10种常绿阔叶树种理化性质的

- 研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(2): 16-21. PEI J Y, YAN Y Y, YE Q, et al. Study on physical and chemical properties of 10 evergreen broad leaf tree species[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015, 35(2): 16-21. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2015.02.004.
- [11] 王小雪, 彭徐剑, 胡海清. 黑龙江省主要草本可燃物燃烧性分析: II 燃烧性综合评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(6): 1-6. WANG X X, PENG X J, HU H Q. Analysis of combustibles of major herbspieces in Heilongjiang Province: comprehensive evaluation of combustion II[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, 33(6): 1-6. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2013.06.014.
- [12] 夏智武. 森林地表可燃物燃烧性评价研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016. XIA Z W. Study on evaluation of forest surface fuel flammability [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2016.
- [13] 周道玮, 李晓波. 草地计划火烧理论与技术[J]. 中国草地, 1996(4): 71-74. ZHOU D W, LI X B. Grassland plan burning theory and technology [J]. Chinese Journal of Grassland, 1996(4): 71-74.
- [14] 李兴华. 内蒙古草原火灾演变规律及影响因子研究[C]// 中国气象学会. 第34届中国气象学会年会 S11 创新驱动智慧气象服务——第七届气象服务发展论坛论文集. 2017: 9. LI X H. Study on the evolution law and influence factors of grassland fires in Inner Mongolia [C]// Chinese Meteorological Society. 34th Annual Meeting of Chinese Meteorological Society S11 Innovation Drives Smart Weather Service: Proceedings of the 7th Meteorological Service Development Forum. 2017: 9.
- [15] 丽娜, 包玉龙, 银山, 等. 中蒙边境地区草原火时空分布特征分析[J]. 灾害学, 2016, 31(3): 207-210. LI N, BAO Y L, YIN S, et al. Spatio temporal characteristics of grassland fire in China-Mongolia border regions [J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(3): 207-210.
- [16] 高策. 内蒙古东部地区草原火时空分布格局及影响因素研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2016. GAO C. The research on spatial-temporal pattern and effecting factors of grassland fire in the eastern part of Inner Mongolia [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2016.
- [17] 李红颖, 刘果厚, 刘利红, 等. 二连浩特地区种子植物区系研究[J]. 中国草地学报, 2016, 38(4): 35-41. LI H Y, LIU G H, LIU L H, et al. Study on the seed plants flora of Erlianhot area [J]. Chinese Journal of Grassland, 2016, 38(4): 35-41. DOI: 10.16742/j.zgcdxb.2016-04-06.
- [18] 杨胜利, 乌恩. 东乌珠穆沁旗草地资源现状调查研究[J]. 安徽农学通报, 2013, 19(9): 101-103. YANG S L, WU E. Investigation on the current situation of grassland resources in Dongwuzhumuqi Banner [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2013, 19(9): 101-103. DOI: 10.16377/j.cnki.issn1007-7731.2013.09.085.
- [19] 何晓蕾, 赵萌莉, 刘通, 等. 新巴尔虎右旗草地生态系统的服务功能[J]. 草业科学, 2013, 30(10): 1656-1663. HE X L, ZHAO M L, LIU T, et al. Evaluation on grassland ecosystem service of Xin Barag Youqi [J]. Pratacultural Sci, 2013, 30(10): 1656-1663.
- [20] 张振文, 姚庆群. 主成分分析法在芒果贮藏特性分析中的应用[J]. 亚热带植物科学, 2005, 34(2): 25-28. ZHANG Z W, YAO Q Q. Application of principal component analysis in analysis of Mango storage characteristics [J]. Subtropical Plant Science, 2005, 34(2): 25-28.
- [21] 于秀林, 任雪松. 多元统计分析[M]. 北京: 中国统计出版社, 1999: 167-168. YU X L, REN X S. Multivariate statistical analysis [M]. Beijing: China Statistics Press, 1999: 167-168.
- [22] 祝必琴, 黄淑娥, 田俊, 等. 亚热带季风区不同林型可燃物理化性质及燃烧性研究[J]. 江西农业大学学报, 2011, 33(6): 1149-1154. ZHU B Q, HUANG S E, TIAN J, et al. A Study on the physical-chemical properties and flammability of different forest types in semi-tropical monsoon area [J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2011, 33(6): 1149-1154. DOI: 10.13836/j.jjau.2011206.
- [23] 郭文霞. 北京地区油松林抗火性综合分析及调控研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009. GUO W X. Study on the fire-resistance comprehensive assessment and control of Chinese Pine forest in Beijing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009.
- [24] 韩朝斌, 张洪顺. 中蒙边境火的防范与阻截[J]. 森林防火, 2001(2): 42-44. HAN C B, ZHANG H S. Prevention and interception of fires in China-Mongolia borders [J]. Journal of Forest Fire Prevention, 2001(2): 42-44.
- [25] 周怀林, 王玉辉, 周广胜. 内蒙古草原火的时空动态特征研究[J]. 草业学报, 2016, 25(4): 16-25. ZHOU H L, WANG Y H, ZHOU G S. Temporal and dynamics of grassland fires in Inner Mongolia [J]. Acta Pratacultural Sinica, 2016, 25(4): 16-25.
- [26] 才仁永吉. 青海草原火灾环境因素分析[J]. 中国畜牧兽医文摘, 2018, 34(4): 20. CAI R Y J. Analysis of environmental factors in Qinghai grassland fire [J]. Chinese Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2018, 34(4): 20.
- [27] 刘桂香, 苏和, 李石磊. 内蒙古草原火灾概述[J]. 中国草地, 1999, 21(4): 76-78. LIU G X, SU H, LI S L. The summarization on the fire accident of grassland in Inner Mongolia [J]. Grassland China, 1999, 21(4): 76-78. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5021.1999.04.015.
- [28] 徐英睿. 2001—2010年呼伦贝尔草原火灾空间分布[J]. 长春师范大学学报(自然科学版), 2017, 36(5): 77-80. XU Y R. Spatial distribution of glassland fire in Hulunbuir during 2001-2010 [J]. J Chang Norm Univ (Nat Sci), 2017, 36(5): 77-80. DOI: 10.3969/j.issn.1008-178X.2017.05.017.
- [29] 马文红, 方精云, 杨元合, 等. 中国北方草地生物量动态及其与气候因子的关系[J]. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(7): 632-641. MA W H, FANG J Y, YANG Y H, et al. Biomass carbon stocks and their changes in northern China's grasslands [J]. Sci China Life Sci, 2010, 40(7): 632-641.
- [30] 张正祥. 基于地理信息系统和遥感的草地火状况研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2010. ZHANG Z X. Study on the regime of grassland fires based on geographical information system and remote sensing [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2010.
- [31] 顾汪明, 卢泽洋, 黄春良, 等. 云南省建水县防火树种筛选研究[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(2): 49-60. GU W M, LU Z Y, HUANG C L, et al. Screening study of fire resistant tree species in Jiashui County, Yunnan Province of southwestern China [J]. J Beijing For Univ, 2020, 42(2): 49-60.

(责任编辑 李燕文)