

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0089

Delegerima, LI Yiping, MENG Xuefeng, et al. Study of the risk evaluation of snow disaster in pastoral areas of Xilingol League, Inner Mongolia [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4):1353–1362. [德勒格日玛, 李一平, 孟雪峰, 等. 内蒙古锡林郭勒盟牧区雪灾风险评估研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4):1353–1362.]

内蒙古锡林郭勒盟牧区雪灾风险评估研究

德勒格日玛^{1,2}, 李一平², 孟雪峰², 田 颖³, 计燕霞², 张莫日根²

(1. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 2. 内蒙古自治区气象台, 内蒙古 呼和浩特 010051;

3. 内蒙古气象培训干部学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘 要: 选取内蒙古锡林郭勒盟与积雪有关的雪灾致灾指标, 以气温、风速为气象条件孕灾环境指标, 坡度、植被盖度为下垫面孕灾环境指标, 人口密度、牧民纯收入、人均GDP、牲畜超载率等数据为承灾体脆弱性指标, 基于BP方法、层次分析法, 建立了内蒙古锡林郭勒盟白灾综合风险评价体系, 并对其进行了风险评价与区划。为提高灾害评估的准确率, 白灾的灾害等级是以月为尺度进行评定, 选取的气象指标多数都是以月为尺度的指标。研究表明: 白灾与积雪因子高度相关, 是气候灾害, 积雪、低温、大风等气象因子长期作用的结果。对白灾尝试用BP神经网络法进行风险评估, 评估的灾害等级和实际灾害等级十分吻合, 用训练好的神经网络对各个旗县(1980–2015年)的白灾进行了风险评估, 评估效果理想。因此, 可以通过数值预报产品、气候预测产品获取相关评价因子, 采用BP方法形成白灾风险预评估产品, 进而应用于雪灾风险评估业务中, 为相关部门提供决策依据。

关键词: 白灾; 锡林郭勒盟; 内蒙古; BP神经网络; 层次分析法; 综合风险评价

中图分类号: P426.63⁺4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)04-1353-10

0 引言

雪灾是我国冬春季最主要的自然灾害, 在我国西部牧区经常发生, 尤其是内蒙古、新疆、青海和西藏的牧区, 几乎每年都会发生, 造成大量的经济损失, 对我国畜牧业造成重大危害^[1–3], 同时对交通也有重大的影响。在冬天, 如果降雪过大, 积雪过厚, 牧草被大雪掩埋, 靠牧草为生的家畜因吃不到草, 冻饿而死, 这就是牧业上的“白灾”^[4]。Begsuren等^[5]、Morinaga等^[6]将雪灾分为5种: 白灾、黑灾(北方草原冬季少雪或无雪, 使牲畜缺水, 疫病流行, 膘情下降, 母畜流产, 甚至造成大批牲畜死亡的现象)、组合灾(是由深厚的积雪以及突然的强降温造成的灾害)、暴风雪灾(强风和强降雪导致的)、铁灾(草场表面形成牲畜很难用蹄子踢透的冰雪盖, 故此牲畜不能采食而饿死的现象)。本研究

中对对白灾和组合灾进行风险评估。

牧区雪灾一直是研究热点, 国内学者主要针对祖国边疆即内蒙古中东部、新疆北部、青海南部和西藏的东北部等地区, 陆续开展了牧区雪灾评估方法、理论等方面的研究。李兴华等^[7]通过EOS/MODIS接收系统实时接收处理TERRA/AQUA星监测的数据与地面气象观测资料相结合建立了内蒙古牧区不同草地类型雪灾等级预警方法。何永清等^[8]利用自然灾害风险评估的理论和方法, 选取牲畜数量、雪灾次数、牧草面积、人均GDP和牧草产量5个指标, 建立了青海省雪灾风险评估模型, 做出了青海省雪灾风险区划图。巴桑等^[9]利用1980–2009年气象台站的观测资数据、北半球NOAA周积雪产品和2001–2010年EOS/MODIS积雪产品等多源资料, 对30 a来西藏区域积雪变化趋势进行了分析, 结果表明近30 a来西藏地区积雪继续减少, 尤

收稿日期: 2018-05-12; 修订日期: 2019-04-12

基金项目: 内蒙古暴雪(暴风雪)专家型预报员创新团队; 国家自然科学基金项目(41265004)资助

作者简介: 德勒格日玛(1981–), 女, 内蒙古鄂尔多斯人, 高级工程师, 从事短期天气气候预测、灾害风险评估及研究工作。

E-mail: gerima_dele@aliyun.com

通信作者: 李一平, 正研级高级工程师, 从事天气气候预测与研究工作. E-mail: 617321974@qq.com.

其近些年较为明显。王芝兰等^[10]对比分析青藏高原积雪 AMSR-E 被动微波遥感资料与台站观测资料后发现,被动微波遥感资料对不同海拔高度区段、不同积雪深度区域的反演精度不同。Wang 等^[11]利用 AMSR-E 被动微波遥感资料、气象观测资料、牲畜和社会经济资料,建立了具备业务应用价值的青藏高原雪灾风险预警模型。郭晓宁等^[12]利用青海高原近 60 年(1951 – 2008 年)雪灾实际灾情统计资料,结合雪灾造成的牲畜死亡率,采用标准化降水指数(SPI),确定了不同雪灾等级的阈值,制订了青海高原基于实际灾情的雪灾标准。Liu 等^[13]基于 GIS,利用综合草原雪灾风险指数,并与灾情、暴露性、脆弱性、应急能力、灾后恢复能力结合,用层次分析法和加权综合法对锡林郭勒盟雪灾进行了风险评估。伏洋等^[14]综合考虑坡度、坡向、草地类型等孕灾环境参数,以雪灾规模、频率和密度为致灾危险性指标,选取人口密度、经济密度、交通密度以及土地资源丰富度等社会经济背景数据为承灾体易损性评价指标,应用综合评价法建立了青海牧区雪灾定量化综合风险评估模型。王世金等^[15]采用 Logistic 回归方法,选取 2010 年冬春季平均积雪深度、积雪日数、雪灾重现率、坡度、牲畜密度、冬春牲畜超载率、产草量、地区 GDP 和农牧民纯收入 9 项雪灾风险因子,建立了三江源地区雪灾综合风险评估 Logistic 回归模型,并对其进行了风险评价与区划。韩炳宏等^[16]选取诱发青海省雪灾发生的社会经济、畜牧和气象等致灾因子,较为系统地分析了青海省风险度因子的空间分布及雪灾综合风险等级特征。李红梅等^[17]以青藏高原为研究区,选用历史雪灾灾情资料、气象站点观测资料、地理信息数据等风险评估因子进行了雪灾综合风险评估。

多数研究中的选取的主要评价指标是以年为单位或多年的平均值,弱化了有些指标对雪灾的贡献,大大减弱了评价的精确性。从 20 世纪 80 年代至今,随着我国经济的高速发展,牧民的生产经营方式、防灾抗灾措施、灾害损失情况有了较大的变化,牧民对气象服务产品的需求也在发生变化,因此气象局通过媒体向牧民提供雪灾风险预评估产品,让牧民提前做好防灾减灾措施,尽可能的减少牧民损失成为可能。随着数值预报的高速发展,借助高时空分辨率的数值预报产品,气象部门提供雪灾预评估产品成为可能,本研究为此项业务

的开展提供可操作性强的技术支撑,具备实际意义。

本文研究区域——内蒙古锡林郭勒盟属中温带干旱半干旱大陆性季风气候,具有寒冷、风大、雨少的气候特点,这些气候特点使得该地区自然灾害频发^[18]。干旱是造成生态环境恶化的主要气象灾害,而白灾、暴风雪、沙尘暴、寒潮等灾害直接威胁着农牧业生产和人民的生命财产,低温、霜冻、冰雹也对饲草基地和农业生产构成了危害。本文中尝试使用 BP 方法对白灾风险等级进行评估,探寻有效的白灾风险评估方法,进一步为雪灾预评估提供技术支撑,可为党政部门提供决策依据。

1 数据来源及预处理

1.1 数据来源

气象数据主要来源于 1980 – 2015 年内蒙古锡林郭勒盟气象局 15 个气象站点气象汇编资料(图 1)。数据包括:月最大积雪深度、平均牧草高度、逐月最大风速、日最大风速月平均、日最高气温月平均、月降水量、牧草生长期降水量(4 – 9 月)、月最低温度、大风日数、积雪深度为 5 ~ 10 cm 的持续天数、积雪深度为 10 ~ 15 cm 的持续天数、积雪深度为 15 ~ 20 cm 的持续天数、积雪深度大于 20 cm 持续日数。

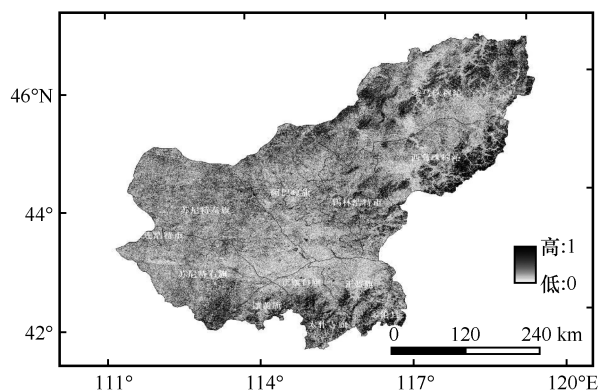


图 1 锡林郭勒盟坡度归一化图

Fig. 1 The slope normalization map of Xilignol League

气象风险评估中用到的灾情资料来自《中国气象灾害大典·内蒙古卷》(1959 – 2000 年),锡林郭勒盟气象局自己整理的灾害统计数据(1981 – 2010 年),《内蒙古自然灾害通志》等资料。

积雪综合指数的计算采用 1980 – 2015 年每年 11 月至翌年 3 月每个旗县观测站每日的积雪深度数据、积雪持续时间乘以根据各个旗县每月平均牧草

高度与最大积雪深度比评定出的相乘系数后获得综合积雪指数, 积雪综合指数计算公式: 积雪综合指数=(1~5 cm)积雪持续时间×相乘系数+(5~10 cm)积雪持续时间×相乘系数+(10~15 cm)积雪持续时间×相乘系数+……

由于冬季(11月至翌年3月)极地冷空气强盛, 蒙古冷高压控制锡林郭勒盟, 强冷空气分裂南下, 常造成风雪寒潮天气。初冬时气温急剧下降, 大部分地区的旬平均气温在10月下旬即可达到0℃以

下, 冬季开始, 天气逐渐变冷, 至11月上旬, 日平均气温普遍达-5℃以下, 开始进入掉膘期, 直至翌年3月。因此相乘系数从头一年11月至翌年3月逐渐增加, 从0.3开始以0.2的间隔逐渐增加至0.9, 体现综合积雪指数的可靠性, 也能够体现出牧草高度逐渐递减后同样的积雪在春天比初冬季节导致的灾害更严重的事实。同时雪灾灾害等级与积雪综合指数有着很高的相关性(表1), 表明相乘系数随着时间的推移增加是合理的。

表1 白灾与气象因子相关系数
Table 1 Correlation coefficients between white dzud and various meteorological factors

雪灾综合 指数	积雪掩埋牧 草高度比	最大积雪 深度	最大风速	平均最大 风速	月最低温度	最低温度月 平均值	最高温度月 平均值	月降 水量	牧草生长 期降水量
0.887**	0.523**	0.52**	-0.164*	-0.074	-0.413**	-0.254**	-0.363**	0.346**	0.125

注: **为显著水平 $P<0.01$; *为显著水平 $P<0.05$ 。

牧草类型数据是根据内蒙古生态与农业气象中心、中国农业部畜牧司发布的草地资源信息中划分的内蒙古锡林郭勒盟草地类型数据平均牧草高度是由内蒙古生态与农业气象中心提供的锡林郭勒盟各个旗县2004年9月至2014年9月的混合牧草高度(牧草高度实地观测一般在牧草生长季进行, 时间为每年的4~9月)值进行平均得到各个旗县9月初的牧草高度, 即为进入枯草期之前的牧草高度。本研究中用到的11月至翌年3月牧草高度是通过采访当地牧民并结合《锡林郭勒盟畜牧业志》中的相关资料进行分析后获得多年平均的月牧草高度数据, 进行计算时对荒漠化草原、典型草原、草甸草原分别进行统计, 也体现出进入枯草期后牧草高度逐渐递减的规律。

在本研究选取的白灾样本是从《中国气象灾害大典·内蒙古卷》第183页至189页中选取出来的, 灾害等级是主要根据灾害大典中的灾害描述, 参考内蒙古畜牧厅提供的雪灾评估标准等式计算的结果并咨询相关专家后判定, 选取了145个样本, 雪灾评估标准等式如下:

由内蒙古畜牧厅提供(1997年)的评估雪灾标准等式如下:

$$S_d = \frac{H_s \times D_s}{H_g \times D_t}$$

(1)

式中: S_d 为雪灾评估等级; H_s 是积雪深度; D_s 是积雪持续时间; H_g 是入冬前牧草平均高度; D_t 是雪灾延续期间日平均温度低于零度的累计日数。

1.2 风险评估因子的选取

1.2.1 致灾因子

大量的降雪导致积雪掩埋牧草使得牲畜无法采食是雪灾发生的必要条件, 同时长时间的积雪是白灾出现的充分条件。因此白灾与积雪深度、积雪持续时间、牧草高度等有着绝对的相关, 选取上述积雪有关的因子作为雪灾致灾因子。

1.2.2 孕灾环境指标

(1) 气象条件导致的孕灾环境指标

持续的低温也是发生白灾的关键因素。低温使降雪不能及时融化从而堆积, 并且低温使牲畜体内的能量散失得更快, 当气温低于-5℃时, 牲畜就开始掉膘。因此气温是孕灾环境指标之一, 在此研究中选取最低气温月平均值、最高气温月平均值为白灾风险评估指标。

水是植物进行光合作用的原料, 是维持生命的基本物质, 是植物生长发育和产量形成的基本因子。年降水量和生长季(4~9月)降水量是评定水分资源的重要指标。有关文献里提及内蒙古中部4~9月为牧草生长期, 牧草生长期降水量与牧草长势、草况与牲畜膘情有关, 因此牧草生长季降水量选为白灾风险评估指标^[19]。

大风对白灾的影响也是不容忽视的。有研究表明牲畜在低温、有风环境中, 常常出现各种应激反应, 比如不采食, 发呆, 甚至死亡^[20]。Sipls-Passel风寒指数公式表明了风速和环境温度对人体裸露皮肤热损耗的影响, 用风寒相当温度来表示在不同风速的环境温度下, 人体所感受到的“体感温

度”。在风速为6级、气温为0℃时,人的体感温度与静风下-16℃时相当。而在气温为-5℃、风速达7级时,人的体感温度竟与在静风时-25℃相当,因此风对牲畜应该会有一些影响。所以将月最大风速值、日最大风速月平均值选为孕灾环境指标^[21]。

(2) 下垫面孕灾环境指标

积雪在重力与风力作用下将会重新分布,山坡丘陵凸起处的积雪易被吹向低洼处,使低洼处的积雪增加,陡峭的地带或坡度大的地方不易产生积雪。坡度较小的丘陵地带或凹地,容易发生积雪沉积。表2中,坡度<15°的山坡或平地,易形成地形性积雪;25°~45°坡度地区的雪蚀作用较活跃;坡度>45°的山坡,不易形成积雪^[14]。

表2 不同坡度条件下灾变权重
Table 2 Cataclysm weight (W_θ) changing with slopes

坡度	权重(W_θ)
$\theta < 15^\circ$	0.42
$15^\circ \leq \theta < 25^\circ$	0.17
$25^\circ \leq \theta < 35^\circ$	0.17
$35^\circ \leq \theta < 45^\circ$	0.24
$\theta \geq 45^\circ$	0

通过90 m SRTM数据,把它内插成30 m分辨率的数据提取坡度,通过以上的权重系数计算后的坡度数据如下(图1)。

本文中所用的GIMMS-NDVI数据为美国国家航天航空局(NASA)戈达德航天中心全球监测与模拟研究组制作的15 d最大化合成的8 km NDVI数据集,该数据集消除了云、太阳高度角、火山爆发和传感器灵敏度随时间变化等的影响,采用最大值合成法MVC方法得到月尺度GIMMS-NDVI数据。数据格式为ENVI,后缀为IMG和HDF的遥感影像文件。在本文中的数据进行了归一化(0~1)。对白灾进行风险评估时选取每个月的植被盖度(当11月至翌年3月)。图2为部分月份的植被盖度情况。

1.2.3 承灾体脆弱性指标

本研究中研究的雪灾是主要基于野外放牧生产方式下的雪灾评估,主要的承灾体为牲畜,因此,(1)考虑基于载畜量的超载率(计算超载率时有将大牲畜按比例折算成羊单位,以上为羊单位计算的超载率)作为承灾体脆弱性指标^[22];(2)雪灾对人

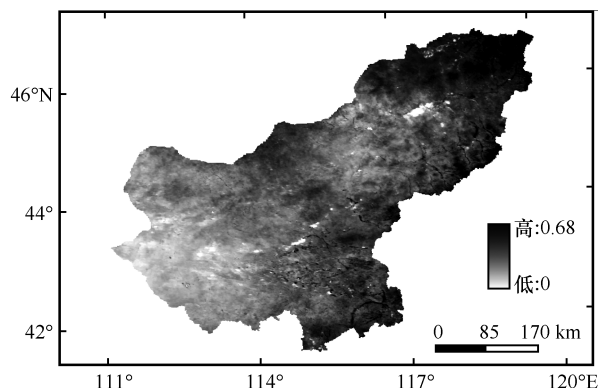


图2 锡林郭勒盟归一化植被盖度

Fig. 2 Vegetation coverage of Xilingol League in November, 2009

害严重时对人的生命财产造成影响,人口密度也作为承载体脆弱性指标;(3)考虑经济发展水平,本文中选取牧民纯收入、人均GDP作为为承载体脆弱性指标,也是反应抗灾能力的指标。

1.3 数据预处理

为了避免数据的值差异很大影响计算的情况,需要根据某一项指标值的最大值和最小值的大小,确定该指标值的变化范围,并把该指标的值都处理到一个固定的区域中,使数据便于处理和计算,本文使用的标准化处理方法是在综合不同量纲数据的时候将其值处理到0~1之间,具体计算公式如下:

$$k = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中: x_i 为第 i 个样本数据; x_{\max} 为样本数据最大值; x_{\min} 为样本数据最小值。

2 风险评估中应用的方法

2.1 BP神经网络法

本研究中采用log-sig-moid函数的三层前向BP人工神经网络,式(3)确定隐含层单元 N_2 的数量范围:

$$N_2 = \sqrt{(N_1 + M) + a} \quad (3)$$

式中: N_1 为输入单元数; M 为输出单元数; a 为1~10的常数。

在确定与 M 的数值以后,通过改变 a 的数值来改变隐含层 N_2 的单元个数,对BP神经网络进行训练和调整,直到神经网络训练误差达到预先设定的误差最小值为止。最后通过检验组数据来考核网络训练拟合程度是否能够满足预测要求,根据最佳预测结果来确定BP神经网络的结构。

2.2 层次分析法

本文中的下垫面下垫面孕灾环境指标、承载体各个指标之间没有确定的数量关系,没有办法直接用主观定权法或客观赋值的方法,这样会导致随意性大,因此用模糊综合评判是最好的选择,能够弥补单一赋权法的不足,使得主观与客观、定性与定量趋于合理化。因此本文中用层次分析法进行了

权重分配。

3 白灾评价因子权重确定

基于因子分析、相关性分析、并咨询内蒙古气象局有关专家,对评价指标及各个子因子进行排序,并通过层次分析法得出各个指标的权重。各个因子权重分布如表3所示。

表3 白灾风险评估指标权重
Table 3 Weights of risk assessment indexes on white dzud

评价指标	对白灾的贡献权重	子因子层	子因子在评价指标中的权重	子因子在白灾中的权重
致灾因子	0.6690	最大积雪深度	0.2109	0.1411
		积雪综合指数	0.6103	0.4083
		积雪掩埋牧草高度比	0.1788	0.1196
孕灾环境指标	0.1997	最大风速月平均	0.0517	0.0103
		定时风速日平均值的月平均	0.0622	0.0124
		月最低气温	0.0367	0.0073
		日最低气温月平均值	0.1441	0.0288
		日最高气温月平均	0.0377	0.0075
		月降水量	0.3512	0.0701
		牧草生长期降水量	0.3204	0.0640
		归一化植被盖度	0.7500	0.0632
下垫面孕灾环境	0.0843	坡度	0.2500	0.0211
		人口密度	0.0629	0.0030
脆弱性指标	0.0471	超载率	0.5810	0.0274
		牧民纯收入	0.2896	0.0136
		人均GDP	0.0665	0.0031

4 BP神经网络在白灾风险评估中的应用

本文中采用BP神经网络对白灾进行预测,输入层取10个神经元,分别为雪灾综合指数、积雪掩埋牧草高度比、最大积雪深度、月最低温度、月最高温度平均、月降水量、最低温度月平均、最大风速、牧草生长期降水量、平均最大风速相对应。多隐含层或较多神经元的单隐含层网络泛化能力强,预报精度高;因此在本研究中输出层一个神经元,与白灾灾害等级对应,采用一个隐层,隐节点为100个,允许误差为0.00001,最大迭代次数为10 000。本文的实验用MATLAB自带的神经网络工具箱模拟完成。

首先,在使用BP网络进行预测之前,需要用已知数据对其进行训练。本文中,我们用归一化的白灾数据训练网络,这些数据包含145个训练样本,每个样本对应的灾害等级借鉴《中国气象灾害

大典·内蒙古卷》中白灾的阐述,结合锡盟气象局统计的灾情描述,并咨询内蒙古气象局相关专家后人为给定。用训练得到的BP神经网络对训练数据进行预测,结果如图3所示。可以发现,预测灾害等

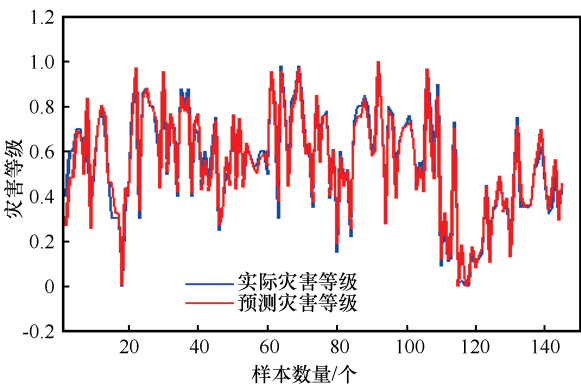


图3 训练样本预测结果

Fig. 3 The training sample prediction results, showing that the trained neural network can get very good prediction results on the training data set

级和实际灾害等级两条曲线十分吻合,即训练得到的神经网络在训练数据集上得到非常好的预测结果。

接下来,我们用训练好的神经网络对各个旗县的白灾数据进行预测。注意到BP神经网络预测的初始化权值和阈值都是随机的,造成每次预测的结

果都是不一样。为了得到稳定的结果,我们用25次预测的结果的平均值作为最终预测值(每次预测都重新训练网络)。为检验预测结果的准确性,以下将通过灾情判定的灾害等级与训练样本BP神经网络预测得到的结果(25次预测的结果的平均值)进行对比分析,结果如图4所示。

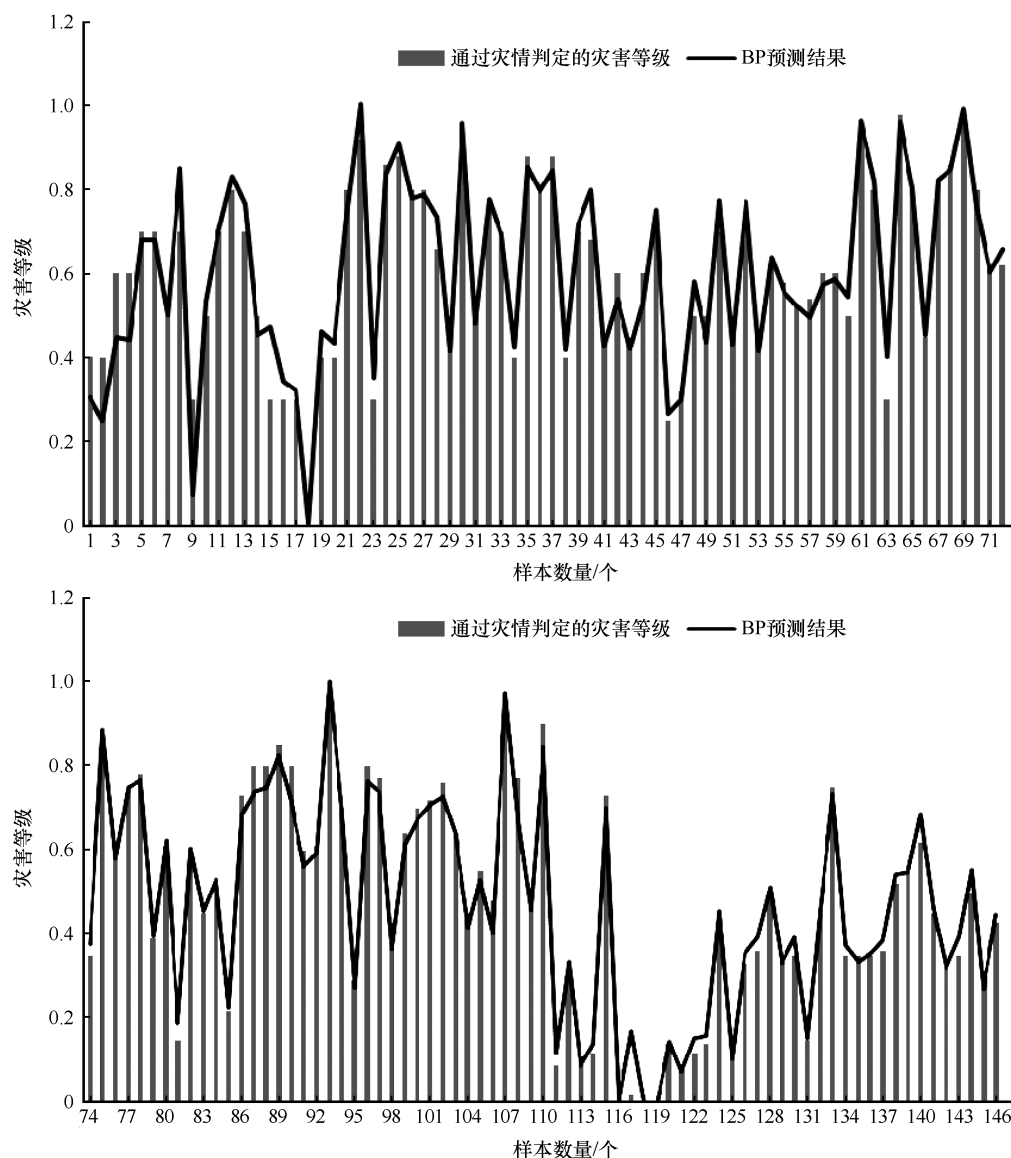


图4 通过灾情判定的灾害等级与BP评定结果对比分析

Fig. 4 Comparison of snow hazard grade determined by the disaster losses and calculated by the BP method

令 X 为预测结果序列, Y 为实际灾害等级序列。由图4可以发现,预测结果与实际灾害等级在整体上有着相同的分布。为了量化这种分布,用如下相关系数衡量两个分布的相似性:

$$r(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{Var}[X] \text{Var}[Y]}} \quad (4)$$

式中: $\text{Cov}(X, Y)$ 为 X 与 Y 的协方差; $\text{Var}[X]$ 为 X 的

方差; $\text{Var}[Y]$ 为 Y 的方差。

将预测结果与实际灾害等级代入式(4),通过计算可得两者相关系数为0.9761。该结果说明 X 和 Y 两个序列非常相似,即预测结果与实际灾害等级在整取趋势上一致。

另一方面,我们计算预测结果与实际灾害等级的绝对误差,即:

$$E(X, Y)=|X-Y| \tag{5}$$

式中： $E(X, Y)$ 为 X 和 Y 的绝对误差； $| |$ 为绝对值符号。

实验结果如图 5 所示。可以发现，预测结果与实际灾害等级的最大绝对误差为 0.2255，最小绝对误差为 0。也就是说，对于极个别特殊情况，通过神经网络难以预测非常准确的结果。此外，所有绝对误差的平均值为 0.0368，这个值对于预测等级来说是非常小。这个结果说明对于所有测试样本来说，通过 BP 神经网络预测的结果是非常准确的。

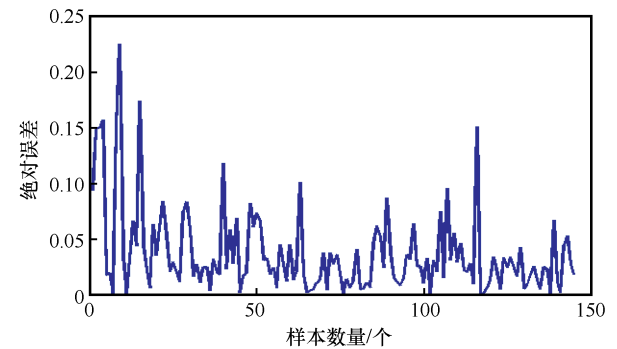


图5 BP预测结果与通过灾情判定的灾害等级绝对误差分析
Fig. 5 The absolute error between BP prediction result and disaster grade determined by disaster losses

5 白灾综合风险评价等级计算及划分标准

前面已经对白灾各个指标的权重通过层次分析法进行了计算，其中气象条件导致的孕灾环境指标与积雪导致的致灾因子指标在白灾中的贡献是直接通过 BP 方法计算获得，并乘以相应的权重，通过 ArcGIS 软件图层叠加功能，得到最终的灾害综合风险评价等级(以月为尺度的锡林郭勒盟白灾综合风险评价等级图)。

风险评估结果中的灾害风险等级分五级，风险等级与相应的赋值区间请见表 4。

表4 灾害等级与灾度

Table 4 The five disaster grades and disaster degree

低风险区	次低风险区	中等风险区	次高风险区	高风险区
>0.3	0.3~0.5	0.5~0.75	0.75~0.9	0.9~1.0

6 白灾综合风险评价结果与灾情资料对比

灾情描述摘自《中国气象灾害大典·内蒙古卷》：1985 年 11 月 6 - 11 日，受西伯利亚较强冷空气影响，内蒙古中东部地区出现一次降雪寒潮天气过程，通辽市、赤峰市、锡林郭勒盟大部地区降下

6 ~ 18 mm 的大暴雪；在 21 - 22 日，锡林郭勒盟、赤峰市、通辽市又降下 1 ~ 2 mm，部分地区 3 ~ 5 mm 的大雪，积雪深厚，锡林郭勒盟积雪最深达 25 cm，形成白灾。这一时段的雪灾风险评估结果请见图 6(a)。

1986 年 2 月 18 日和 3 月中上旬，内蒙古中东部地区出现 3 次中到大雪，局部暴雪，致使白灾加重。至 1986 年春，全区因白灾死亡牲畜 56 万头(只)，仅锡林郭勒盟就死亡 50 万头(只)，这是仅次于 1977 年的大白灾。这一时段的雪灾风险评估结果请见图 5(b)。

1999 年 11 月上旬锡林郭勒盟出现座冬雪，从 2000 年 1 月中旬开始至 2 月底，中东部地区的气温比常年偏低 2 ~ 4 ℃，积雪长期不化，锡林郭勒盟大部积雪深度普遍为 10 ~ 25 cm，形成白灾；锡林郭勒盟受灾面积 1 140 万公顷，受灾牧民 33.2 万人，受灾牲畜 694 万头(只)，死亡 15 万头(只)。这一时段的雪灾风险评估结果请见图 5(c)。

1992 年 11 月乌兰察布市、锡林郭勒盟连降 4 场中到大雪，局部暴雪，降雪比常年偏多 7 成至 4 倍，特别是锡林郭勒盟的月降雪量普遍为 10 ~ 20 mm，比常年偏多 2 ~ 4 倍，积雪深度 6 ~ 14 cm，形成白灾，有 713 万头牲畜受白灾威胁。这一时段的雪灾风险评估结果请见图 5(d)。

上述为研究区有灾且灾情较重的情况，评估效果还是很理想。对于无灾害或轻灾、部分地区有灾害的情况进行检验后发现评估效果十分理想(图略)。

7 讨论

(1) 本文中的白灾风险评估方法对北方牧区白灾的风险评估具有普适性，但每个地域的草场类型、牧草高度、地貌、海拔高度、月平均最低气温、畜种等不尽相同，因此指标的选取上会有差异。

(2) 本文中除了坡度、植被盖度数据是以遥感数据为主要来源，而遥感数据的特点是基于像元的计算，其他数据是以县为单位，存在数据精度不够而风险评估结果不够精细的缺点。今后可采用高精度的根据地面观测的积雪深度数据订正过的遥感监测积雪深度数据、积雪面积数据，结合数值预报提供的风、温度、降水等气象要素预报可以进一步完善白灾综合风险评估与区划方面的工作。

(3) 本文中选取以月为尺度的积雪综合指数指

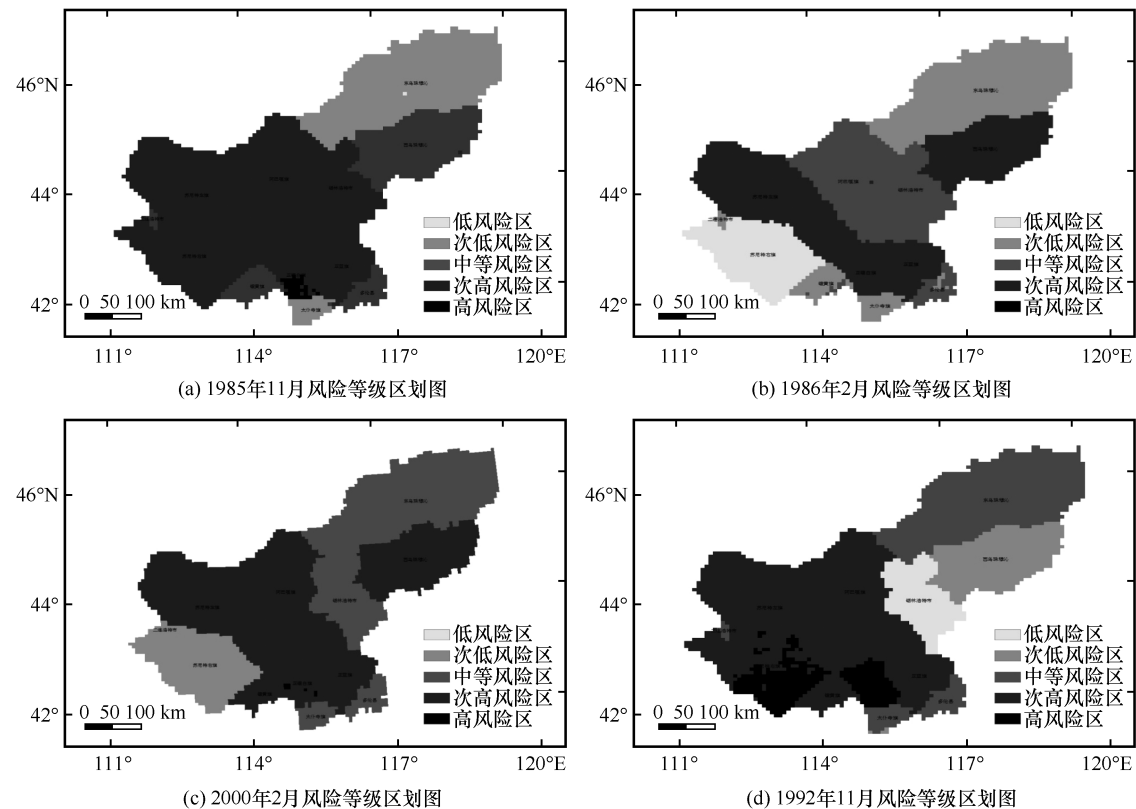


图6 锡林郭勒盟雪灾风险等级区划

Fig. 6 Maps showing the snow disaster risk classification in Xilingol League in Nov. 1985 (a), Feb. 1986 (b), Feb. 2000 (c) and Nov. 1992 (d)

标为白灾风险评估指标,该指标中能够体现积雪深度、积雪持续时间,也体现积雪掩埋牧草的程度,明显的提高了白灾风险评估精度。

(4) 作者尝试用SVM、Logistic回归模型、因子分析法对白灾的风险等级进行过预测,都没有BP神经网络效果好,因此本文中用BP神经网络进行白灾风险等级预测;BP神经网络预测的初始化权值和阈值都是随机的,造成每次预测的结果都不是完全一样,为了得到稳定的结果,文章中用25次预测的结果的平均值作为最终预测值,这样也提高了预测精度,通过评估效果检验得到证实。

(5) 本文中白灾风险评估时段从20世纪80年代至今,随着我国经济的高速发展,牧民的生产经营方式、防灾抗灾措施、灾害损失情况有了较大的变化。通过走访锡林郭勒盟牧户进行雪灾调查后发现,近些年道路等基础设施、牲畜的暖棚设施等比起80、90年代大有改善,但一旦发生雪灾需要舍饲圈养牲畜,加之每年牧户存栏家畜多,超载过牧等导致饲草需求大,同时也需要比没有雪灾时投入更多的劳动来承担家畜的管理、补饲等工作,这种

以舍饲圈养为防灾、抗灾主要措施的牧户,他们的受灾形式主要是草料费用增加导致的,灾害严重时草料费用往往超过牧民的年收入,带来严重的经济损失。因此白灾灾害等级的显现方式从过去的牲畜死亡带来的经济损失转变为草料费用、劳动力投入增加等导致的经济损失。因此本文中的白灾的风险评估工作具备实际意义。

8 结论

- (1) 本文中选取积雪有关的雪灾致灾指标,气温、风速为主的气象条件孕灾环境指标,提取坡度、植被盖度为下垫面孕灾环境指标,人口密度、牧民纯收入、人均GDP、牲畜超载率等数据为承灾体脆弱性指标,基于BP方法、层次分析法、模糊综合评价法构建了内蒙古锡林郭勒盟白灾综合风险评估模型,并对其进行了风险评价与区划,制作出锡林郭勒盟1980年11月至2015年3月白灾风险评估等级图。
- (2) 白灾与积雪因子高度相关,是气候灾害,积雪、气温、风等因子长期作用的结果;本文中的

白灾灾害等级是以月为尺度进行评定, 选取的气象指标中除了牧草生长期降水量以外其他气象要素指标都是以月为尺度的指标, 能够提高灾害评估的准确率, 以往的研究中从未见过以月为尺度进行白灾风险等级的评定, 在本文中得到体现。

(3) 通过检验白灾综合风险评价效果, 发现风险评价效果较理想, 因此可以通过数值预报产品、气候预测产品获取相关评价因子后, 采用BP方法形成白灾风险评估、预评估产品成为可能, 并可业务转化, 为党委、政府等部门提供决策依据。

参考文献(References):

- [1] Liang Tiangang, Liu Xingyuan, Wu Caixia, et al. An evaluation approach for snow disasters in the pastoral areas of northern Xinjiang, PR China[J]. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2007, 50(3): 369–380.
- [2] Liu Xingyuan, Liang Tiangang, Guo Zhenguan. Assessment and monitoring of snow disaster effect on grassland livestock industry in the Aletai region using remote sensing technology[J]. *Acta Pratacultural Science*, 2003, 12(6): 115–119.
- [3] Zhuang Xiaocui, Zhou Hongkui, Wang Lei, et al. Evaluation and cause study on the snow disaster in pastoral areas of northern Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2015, 32(5): 1000–1006. [庄晓翠, 周鸿奎, 王磊, 等. 新疆北部牧区雪灾评估指标及其成因分析[J]. *干旱区研究*, 2015, 32(5): 1000–1006.]
- [4] Gong Deji, Li Zhangjun. The climatic features of heavy snow, snowstorm and snow disaster in Inner Mongolia[J]. *Meteorology*, 2000(12): 24–28. [宫德吉, 李彰俊. 内蒙古大(暴)雪与白灾的气候学特征[J]. *气象*, 2000(12): 24–28.]
- [5] Begzsuren S, Ellis J E, Ojima D S, et al. Livestock responses to droughts and severe winter weather in the Gobi Three Beauty National Park, Mongolia[J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 59(4): 785–796.
- [6] Morinaga Y, Shinoda M. Natural disaster in Mongolia: drought and dzud monitoring system at the Institute of Meteorology and Hydrology[M]. *National Museum of Ethnology, Osaka*, 2005.
- [7] He Yongqing, Zhou Bingrong, Zhang Haijing, et al. Assessment model on risk degree of snow disaster and its risk division in Qinghai Plateau[J]. *Pratacultural Science*, 27(11): 37–42. [何永清, 周秉荣, 张海静, 等. 青海高原雪灾风险度评价模型与风险区划探讨[J]. *草业科学*, 2010, 27(11): 37–42.]
- [8] Li Xinghua, Chao Lumen, Liu Xiurong, et al. Snow disaster warning system in pastoral areas of Inner Mongolia[J]. *Pratacultural Science*, 2014, 31(6): 1195–1200. [李兴华, 朝鲁门, 刘秀荣, 等. 内蒙古牧区雪灾的预警[J]. *草业科学*, 2014, 31(6): 1195–1200.]
- [9] Basang, Yang Xiuhai, Lazhen, et al. Variation of snow cover over Tibet Autonomous Region Based on Multi-Source Data[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(5): 1023–1030. [巴桑, 杨秀海, 拉珍, 等. 基于多源数据的西藏地区积雪变化趋势分析[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(5): 1023–1030.]
- [10] Wang Zhilan, Wang Xiaoping, Li Yaohui. Analysis of snow cover based on passive microwave remote sensing data and observed data over the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(4): 783–792. [王芝兰, 王小平, 李耀辉. 青藏高原积雪被动微波遥感资料与台站观测资料的对比分析[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(4): 783–792.]
- [11] Wang W, Liang T, Huang X, et al. Early warning of snow-caused disasters in pastoral areas on the Tibetan Plateau[J]. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 2013, 13(6): 1411–1425.
- [12] Guo Xiaoning, Li Lin, Wang Jun, et al. Indexes for assessing snow disasters over Qinghai Plateau based on actual snow disasters[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2012, 40(4): 676–679. [郭晓宁, 李林, 王军, 等. 基于实际灾情的青海高原雪灾等级(评估)指标研究[J]. *气象科技*, 2012, 40(4): 676–679.]
- [13] Liu X, Zhang J, Tong Z, et al. Grid-based multi-attribute risk assessment of snow disasters in the grasslands of Xilingol, Inner Mongolia[J]. *Human & Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2011, 17(3): 712–731.
- [14] Fu Yang, Xiao Jianshe, Xiao Ruixiang, et al. Risk assessment model of snow disaster in Qinghai Province based on GIS[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(Suppl 1): 197–205. [伏洋, 肖建设, 校瑞香, 等. 基于GIS的青海省雪灾风险评估模型[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(增刊1): 197–205.]
- [15] Wang Shijin, Wei Yanqiang, Fang Miao. Integrated risk assessment of snow disaster in the three rivers source region, China[J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2014, 23(2): 108–116. [王世金, 魏彦强, 方苗. 青海省三江源牧区雪灾综合风险评估[J]. *草业学报*, 2014, 23(2): 108–116.]
- [16] Han Binghong, Wu Rang, Zhou Bingrong, et al. Grid-based estimation of snow disaster risk in Qinghai Province[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(5): 1035–1041. [韩炳宏, 吴让, 周秉荣, 等. 基于格网的青海省雪灾综合风险评估[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(5): 1035–1041.]
- [17] Li Hongmei, Li Lin, Gao Ge, et al. Snow disaster in Qinghai Plateau: risk division and countermeasure[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 656–661. [李红梅, 李林, 高歌, 等. 青海高原雪灾风险区划及对策建议[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 656–661.]
- [18] Liu Zhigang. Climatic regionalization in Xilingol League of Inner Mongolia[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006. [刘志刚. 内蒙古锡林郭勒盟牧业气候区划[M]. 北京: 气象出版社, 2006.]
- [19] Yang Huijuan, Li Ning, Du Zixuan, et al. Influence of climate change on heavy snow disaster in pastoral area of Inner Mongolia: an entropy-weighted technique based case study on Xilinhot City[J]. *Journal of Natural Disaster*, 2006, 15(6): 62–66. [杨惠娟, 李宁, 杜子旋, 等. 气候变化对内蒙古牧区白灾的影响——基于熵权法分析的锡林浩特市案例研究[J]. *自然灾害学报*, 2006, 15(6): 62–66.]
- [20] Deng Zifeng. Livestock meteorological disaster and countermeasures[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991. [邓子风. 畜牧气象灾害及防御对策[M]. 北京: 气象出版社, 1991. 26–28.]
- [21] Dixon J C, Prior M J. Study on wind chill index[J]. *Meteorological Science and Technology*, 1988, 6: 28–32. [Dixon J C, Prior M J. 风寒指数研究[J]. *气象科技*, 1988, 6: 28–32.]
- [22] Ma Xiaofang, Huang Xiaodong, Deng Jie, et al. Comprehensive risk assessment of snow disaster in Qinghai Province[J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2017, 26(2): 10–20. [马晓芳, 黄晓东, 邓婕, 等. 青海牧区雪灾综合风险评估[J]. *草业学报*, 2017, 26(2): 10–20.]

Study of the risk evaluation of snow disaster in pastoral areas of Xilingol League, Inner Mongolia

Delegerima^{1,2}, LI Yiping², MENG Xuefeng², TIAN Ying³, JI Yanxia², ZHANG Morgen²

(1. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Inner Mongolia Meteorological Observatory, Hohhot 010051, China; 3. Inner Mongolia Meteorological Training Center, Hohhot 010051, China)

Abstract: In this study, a model has developed for risk assessment of snow disaster in the pastoral area of Xilingol League based on BP (back propagation artificial neural network), AHP (analytic hierarchy process) and fuzzy comprehensive evaluation method by using MATLAB, ArcGIS and SPSS. The indicator system of the snow disaster risk assessment is composed of disaster inducing indicators related with the snow depth; the disaster pregnant environment meteorological indicators are mainly constitute of temperature and wind speed indexes; disaster pregnant environment underlying surface indicators are formed by slope and vegetation coverage; vulnerability indicators of disaster bearing bodies are constituted by population density, herdsmen's net income, GDP per capita, overload rate of livestock. The curve of the predicted hazard level and actual hazard level fits perfectly. Therefore, in this paper, using BP to do the risk assessment of the snow disaster by monthly from November to March of the following year from 1980 to 2015 for each county. Snow hazard is climatic disaster which is highly related with snow cover; It is the result of long-term effects of snow cover, low temperature and strong wind. Except the index that the rainfall during grass growth period, the other indexes are monthly scale, so it can enhance the accuracy of hazard assessment. The effect of risk assessment is comparably ideal, since it is possible to form product of the risk grade of white dzud based on BP method through gaining numerical prediction products and climate prediction products. Consequently, these products will be gradually applied to daily business and provided decision-making basis for party committee and government.

Key words: white dzud; Xilingol League; Inner Mongolia; BP neural network; analytic hierarchy process; comprehensive risk assessment

(责任编辑: 王世金; 编辑: 周成林)