

半干旱草原区沙尘暴灾害承灾体脆弱性动态变化分析

李锦荣¹, 高君亮², 郭建英¹, 赵海燕³

(1. 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020;

2. 中国林业科学研究院 沙漠林业实验中心, 内蒙古 磴口 015200; 3. 陕西师范大学, 西安 710062)

摘 要:以模糊数学为理论基础,通过构建沙尘暴灾害承灾体脆弱性评价模型,研究了半干旱草原区——锡林郭勒盟沙尘暴灾害承灾体的脆弱性。结果表明:三个时期(1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2010 年)锡林郭勒盟地区沙尘暴灾害承灾体的脆弱性表现出逐渐降低的趋势。大风日数减少、植被盖度增加,人口增长速度减缓、牲畜存栏头数和超载率得到一定控制,减轻了承灾体对环境的压力;牧民纯收入的增加、医疗卫生条件的改善、交通设施的增加,增强了承灾体抵御灾害的能力以及灾后恢复力;产业结构逐渐合理化、多元化,有利于经济稳定,对沙尘暴承灾体的脆弱性降低起到积极作用。评价结果表明,模糊数学方法对草原区沙尘暴承灾体脆弱性评价的可行性,评价结果可以为后续的防灾减灾工作提供依据。

关键词:沙尘暴; 承灾体; 脆弱性; 模糊数学; 半干旱草原区

中图分类号:P425.5⁺5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)05-0113-06

Analysis on Dynamics of Vulnerability of Hazard-bearing Bodies of the Sandstorm Disaster in the Semi-arid Grassland Areas

LI Jin-rong¹, GAO Jun-liang², GUO Jian-ying¹, ZHAO Hai-yan³

(1. *Institutes of Water Resources for Pastoral Area, Hohhot 010020, China*; 2. *Experimental Center of Desert Forestry, CAF, Dengkou, Inner Mongolia 015200, China*; 3. *Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China*)

Abstract:Based on the theory of fuzzy mathematics, this article did a research on the vulnerability of hazard-affected bodies of sandstorm disaster in semi-arid grassland area (Xilin Gol League), by means of constructing the evaluation model of vulnerability of sandstorm disaster, and classing the evaluation results. The results showed that the vulnerability of hazard-affected bodies showed gradually reduced tendency during three periods (1981—1990, 1991—2000, 2001—2010) in Xilin Gol League area region. Strong wind days reduce and vegetation coverage increases, the rate of population increase slowed down, and the total number of livestock and overloading rate obtained a certain control, which reduced the bearing pressure disaster to the environment, and enhanced the ability of people and livestock to resist the disaster at the same time. The ability of resisting the disaster and recovery of hazard-affected body were enhanced by the increase of net income of herdsmen, the improvement of medical and health conditions and the increase of traffic facilities. Industrial structure dominated by husbandry has transformed into rational and multivariant one, which is beneficial to economic stability, and enhances the ability of resisting the disaster, and plays a positive role in reducing the vulnerability of hazard-affected bodies. Evaluation results show that the fuzzy mathematics method on steppe sandstorm vulnerability assessment is feasible, but, as a follow-up evaluation results can provide the basis for disaster prevention and mitigation.

Key words:sand storm; hazard-bearing body; vulnerability; fuzzy mathematics; semi-arid grassland areas

收稿日期:2013-05-16

修回日期:2013-06-16

资助项目:国家自然科学基金(41301303,41301302);中国水利院科研专项项目(MK2013J08)

作者简介:李锦荣(1980—),男,内蒙古呼和浩特人,博士,研究方向:荒漠化防治。E-mail:lijinrong918@126.com

通信作者:郭建英(1979—),男,博士,主要从事半干旱地区水土流失与植物生态方面的研究。E-mail:guojianying1980@163.com

沙尘暴是指强风将地面大量沙尘吹起卷入大气中,使空气混浊,水平能见度小于1 km的天气现象。沙尘暴是一种灾害性天气,威胁着农牧业生产,使土地产生退化,导致区域生态环境恶化,更为严重的是直接造成人、牲畜的伤亡^[1]。从灾害学的角度来看,沙尘暴灾害同其他灾害一样,也是由致灾因子的危险性、孕灾环境的稳定性和承灾体的脆弱性共同作用决定的^[2]。其中,致灾因子的危险性和孕灾环境的稳定性构成了沙尘暴灾害发生的可能性,承灾体的脆弱性构成了沙尘暴灾害可能的损失^[3]。承灾体是人类及其活动所在的社会与各种资源(包括农田、草场、森林、道路、城镇、居民点、工厂等)的集合,是致灾因子的作用对象,其脆弱性也叫易损性,是指在给定的危险区存在的所有财产因危险因素而造成损失或伤害的容易程度,脆弱性越大、损失也越大;反之亦然。目前,国内外众多学者对沙尘暴灾害的致灾因子(气象条件)^[4-13]和孕灾环境(下垫面因子)^[11,13-20]已做了大量的研究,并取得了一系列的研究成果。然而,对沙尘暴灾害承灾体脆弱性方面的研究尚属空白,甚至对所有灾害承灾体脆弱性的研究也仅仅是概念及指标的选择和一些初步的评价^[21-23]。

锡林郭勒盟是我国典型草原的主要分布区,草原是该地区分布最广泛的自然生态系统,是环北京生态防护圈的重要组成部分,也是我国北方强有力的生态安全屏障。从全国沙尘暴的分布情况来看,该地区是我国北方主要的沙尘暴源区之一,其沙尘暴发生机理和影响范围均有一定的特殊性。此外,该地区风力较强,环境极其脆弱,如果保护不当的话极有可能成为沙尘暴的高发区,进而影响首都生态环境。

基于上述结果,本文选择锡林郭勒盟这样一个特殊而又重要的地方作为研究区,基于模糊数学方法对该区域沙尘暴灾害承灾体的脆弱性进行分析,为该区域今后沙尘暴天气监测系统的建设提供理论依据与技术指导,进而减小该区域沙尘暴灾害所造成的损失;另外,研究结果也可对进一步研究半干旱草原区沙尘暴发生机理及其气候和环境效应起到一定的帮助。

1 研究区概况

锡林郭勒盟位于内蒙古自治区中部,北与蒙古国接壤、西与乌兰察布市交界、南与河北省毗邻、东与赤峰市、通辽市、兴安盟相连。地理坐标为111°08′36″—119°58′35″E,41°35′00″—46°46′30″N,总面积约20.3万km²。地形以高平原为主体,兼有多种地貌单元,地势南高北低,自西南向东北倾斜。气候属中温带干旱半干旱大陆性季风气候,年均气温0~3℃;最大风速24

~28 m/s,局部地区瞬间风速可达34 m/s,全年盛行偏西风;年均降雨量200~350 mm,分布时空不均,全年雨量大部集中于6—8月,雨量自西向东递增。土壤类型包括栗钙土、棕钙土、灰色森林土、黑钙土、灰褐土、草甸土、沼泽土及盐碱土。植被主要以小针茅(*Stipa klemenzi* Roshev.)、克氏针茅(*S. krylovii* Roshev.)、大针茅(*S. grandis* P. Smirn.)和羊草(*Leymus chinensis* Trin. Tzvel.)等为主。荒漠化现象较严重,第四次荒漠监测结果显示,锡林郭勒盟现有荒漠化土地面积为14.84万km²,紧随阿拉善盟之后,荒漠化形势不容乐观,防治荒漠化任务更加艰巨。

2 研究方法

由于承灾体脆弱性评价指标涉及生态、社会和经济等多个方面,评价指标数量较多且各指标之间关系复杂,量纲不一致。当一个事物的状况往往与多种因素有关,且关系复杂时,对这一事物做出评价或者决定,称为综合评判。模糊综合评判方法对受多种影响因素的事物做出全面评价的一种十分有效的多因素决策方法。同时,能较好地解决模糊的、难以量化的问题,适合各种非确定性问题的解决,且结果清晰,系统性强。从而避免量化过程中的主观随意性。基于数据易获得性、评价结果应用性强和区域完整性的考虑,研究以锡林郭勒盟行政区为基本单位进行分析评价。在时间上,将锡林郭勒盟地区分为3个时段:1981—1990年,1991—2000年,2001—2010年。

2.1 建立指标体系

指标体系的建立是评价分析的关键,指标体系的科学性决定着评价结果的准确性和可行性。研究本着科学、合理、综合、可操作、可比性的原则,参考前人研究^[21],结合沙尘暴灾害的特点,联系锡林郭勒盟当前沙尘暴灾害的实际情况,沙尘暴的承灾体脆弱性指标围绕着沙尘暴承灾体脆弱性成因机制和结果表现进行分析,成因方面从大风日数、月平均风速、年降水量和植被盖度选取评价因子;结果表现指标农业、林业、牧业、工业、通讯和交通运输以及对人民生命财产和健康选取指标,具体指标含义及计算方法见表1。

自然成因指标,其中指标有锡林郭勒气象局15个气象站点1981—2010年气象汇编资料,植被盖度利用美国国家航天航空局(NASA)推出的GIMMS(Global Inventory Modelling and Mapping Studies)NDVI最新全球植被指数变化数据;各结果表现指标数据来源于1980—2010年《内蒙古自治区统计年鉴》、《锡林郭勒盟辉煌60年统计年鉴》以及锡林郭勒盟统计局网站。

表 1 承灾体脆弱性指标

分类		指标	表达式/含义
自然成因指标	大风日数	月大风日数	$\geq 17.2\text{ m/s}$
	风速	月平均风速	每月平均风速
	地温	月平均地温日较差	每月昼夜间最高地温与最低地温的差值取平均值
	降水量	年降水量	$\sum_{i=1}^{12} P_i$ P_i ——月降雨量
	植被盖度	年最大植被盖度	$\text{Max}(f_i)$ f_i ——每月植被盖度
结果表现指标	人口情况	人口密度	人口数/行政区面积
		耕地百分比	耕地面积/行政区面积
		超载量	$(\text{实际载畜量}/\text{理论载畜量}) \times 100$
	农牧业生产	大牲畜比例	$(\text{大牲畜头数}/\text{大小畜生总头数}) \times 100$
		牧民纯收入	
		交通运输业	$(\text{公路长度}/\text{行政区面积}) \times 100$
	生产总值	第一产业比重	$\text{第一产业产值}/\text{总产值} \times 100$
		第二产业比重	$\text{第二产业产值}/\text{总产值} \times 100$
		第三产业比重	$\text{第三产业产值}/\text{总产值} \times 100$
		人均总产值	
	医疗卫生	万人拥有医院卫生院床位数	床位数/年末人口数(万人)
		万人拥有医疗技术人员数	医疗技术人员数/年末人口数(万人)

其中自然成因指标中,对锡林郭勒盟地区各旗县的监测数据按月份进行了统计分析。从图 1 可以看出,锡林郭勒盟地区的沙尘暴主要集中在春季发生;沙尘暴发生日数和大风天气日数,在数量有一定的差异,即大风日数要多于沙尘暴日数,说明即使是大风发生,但不一定爆发沙尘暴,这一数量关系也说明,大风是沙尘暴发生的必要条件,但不是充分条件。总体而言,一年中沙尘暴发生次数和大风日数的变化规律几乎一致,两组随机变量之间的相关系数达到0.929。大风日数可以很好地反映锡林郭勒地区沙尘暴频数,进一步说明了大风日数作为沙尘暴自然成因指标是正确和可信的。

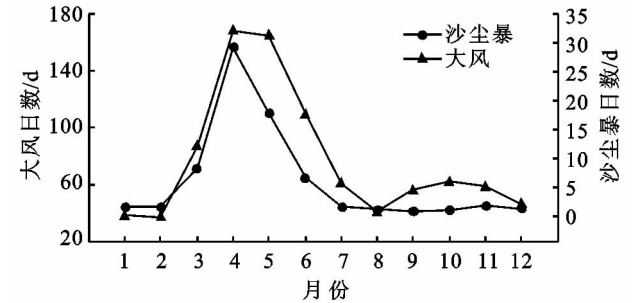


图 1 锡林郭勒盟大风与沙尘暴相关关系

同理,对沙尘暴日数和月平均风速、月平均地温日较差、年降雨量统计分析,显示存在显著差异($P>0.1$),选作成因指标是科学的。对沙尘暴成因除天气因素外,还有下垫面植被盖度也是一个重要因素。对锡林郭勒盟地区植被盖度与沙尘暴进行统计分析,结果见图 2。

从图 2 可以看出,锡林郭勒盟地区最大被植被盖

度与沙尘暴日数在年际变化上呈现负相关($R=-0.54$)。植被盖度大的年份,下一年的沙尘暴日数值较小,植被盖度小的年份,下一年的沙尘暴日数值较大。1981—2000 年间,锡林郭勒盟地区的沙尘暴日数呈波动递减趋势,植被盖度呈现增加趋势;2001—2010 年间,波动幅度较大,其中 2001 年、2002 年和 2006 年沙尘暴发生频繁。总体呈现,上年最大植被盖度降低,沙尘暴发生频率增加的规律,作为成因指标科学。

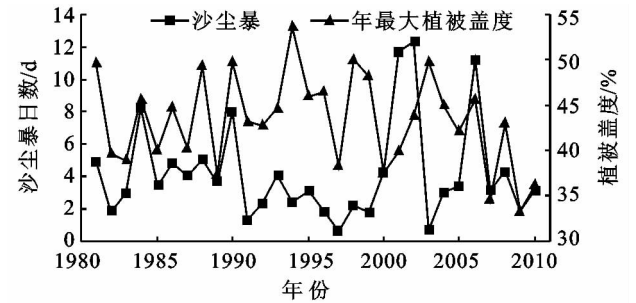


图 2 1981—2010 年锡林郭勒盟平均最大被盖度和沙尘暴日数年际的变化

作为结果表现指标,参考前人研究^[21],从可能对农、林、牧、工、通讯和交通运输以及对人民生命财产和健康选取指标,结果指标不同于成因指标,不做相关分析。

2.2 建立评价集

在脆弱性评价前,必须将指标同趋势化。一般是将逆向指标转化为正向指标,所以也称为指标的正向化^[24]。不同评价指标往往具有不同的量纲和量纲单位,为了消除由此带来的不可公度性,还应将各评价

指标作无量纲化处理。指标的同趋势化和无量纲化都有多种方法,应用时应根据实际情况选择合适的方法,否则将会使综合评价的准确性受到影响。本文参考多篇文章^[24-26],本文选定负向指标正向化: $X_{ij}'=X_{ij\max}-X_{ij}$ 和 无量纲化: $X_{ij}''=X_{ij}'/\bar{X}_{ij}$; 式中: X_{ij} 表示第 i 个因素中第 j 个指标的原始数据; \bar{X}_{ij} , $X_{ij\max}$ 分别表示第 i 个因素中第 j 个指标的平均值和最大值。经过这样的处理后,将沙尘暴灾害承灾体的脆弱性程度划分为 5 个等级,即评价集 $V=\{V_1,V_2,V_3,V_4,V_5\}=\{\text{低脆弱性,较低脆弱性,中度脆弱性,较高度脆弱性,高度脆弱性}\}$ 。 V 值得确定根据每个指标的均值加减标准差($X_{ij}''\pm\text{SD}$)^[27]。

2.3 确定评价因子权重

在承灾体脆弱性的评价中,由于选择的评价因子重要性程度有差异,所以按照要求要对所选指标进行权重的确定。评价因子权重的合理性无疑会影响评价结果的准确性、科学性。权重的确定方法有主观赋权法和客观赋权法两种。主观赋权法受专业知识限制,对于某一具体问题认识上存在局限,往往导致赋权结果出现一定偏差。所以,本文选用 AHP 层次分析法,它是基于系统分析思想理论,将复杂问题分解为许多有联系、有次序的层次和因素,对每层的相关因素进行两两比较的方法确定重要性,再经过简单的数学运算决定要素的重要性即权重。经过层次分析法最终确定权重(表 2)并通过一致性检验。

表 2 承灾体脆弱性权重

分类	权重	指标
自然成因指标	大风日数	0.125
	风速	0.144
	地温	0.12
	降水量	0.132
	植被盖度	0.029
结果表现指标	人口情况	0.084
	农牧业生产	0.166
	交通运输业	0.039
	生产总值	0.116
	医疗卫生	0.044

2.4 承灾体隶属度函数构建

为了便于问题分析,各指标之间有一个统一的衡量标准,采用构造隶属函数的方式来确定隶属度,本文参考其他文章选取升、降半梯形和三角形来确定各等级的隶属函数^[22-23,28]。将沙尘暴灾害脆弱性等级划分为 5 级(低脆弱性、较低脆弱性、中度脆弱性、较高度脆弱性、高度脆弱性),降半梯形函数描述低度脆弱性,升半梯形描述高度脆弱性,其他 3 级用三角形函数表示。

通过隶属度函数求出模糊矩阵:

$$R=\begin{bmatrix}r_{11}&r_{12}&\cdots&r_{15}\\r_{21}&r_{22}&\cdots&r_{25}\\\vdots&\vdots&\vdots&\vdots\\r_{n_11}&r_{n_12}&\cdots&r_{n_15}\end{bmatrix}$$

2.5 承灾体模糊综合评价

获得模糊矩阵 R ,由表 3 权重得到 A 权重矩阵,采用模糊矩阵变换进行综合评判 $B=AR$ 。几种常用的数学模型有 $M=(\wedge,\vee)$, $M=(\cdot,\vee)$, $M=(\cdot,\oplus)$, $M=(\wedge,+)$,其中模型 $M=(\cdot,\vee)$ 兼顾了所有因素,同时也突出了主要因素,其评判结果比较详细,因此本文承灾体脆弱性模糊综合评价模型采用 $M=(\cdot,\vee)$ 的合成运算方法^[29];其中“ \cdot ”为普通乘法运算, \vee 为取大运算;最后在结果中按照最大隶属度原则获取 B 中的最大值,即 $B_k=\max\{b_1b_2b_3b_4b_5\}$; k 级即为被评定单元沙尘暴灾害的脆弱性等级。由此便得到锡林郭勒盟沙尘暴灾害脆弱性模糊综合评判结果。

3 结果与分析

采用模糊综合评判方法对锡林郭勒盟各旗县 1981—2010 年期间(1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2010 年)沙尘暴承灾体的脆弱性进行评价,结果见图 3。从锡林郭勒盟草原区沙尘暴承灾体脆弱性的评价结果表明:3 个时期(1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2010 年)锡林郭勒盟地区的承灾体脆弱性表现出逐渐降低的趋势。特别是南部太仆寺旗、多伦县、正镶白旗以及东乌珠穆沁旗降低趋势明显。

其中,第一阶段(1981—1990 年)到第二阶段(1991—2000 年)仅有正蓝旗、多伦、西乌珠穆沁旗的脆弱等级发生变化,均是脆弱性降低;特别是正蓝旗、多伦从较高度脆弱性(Ⅳ)分别降低至较低脆弱性(Ⅱ)、中度脆弱性(Ⅲ)。该地区的年均风速由 4.2 m/s 和 3.6 m/s 分别降低到 3.8 m/s 和 3.3 m/s;10 a 间全年大风日数由 711 d 和 731 d 分别降低到 689 d 和 507 d。同时,植被盖度、降水在这期间逐渐增加,都在降低该地区脆弱性等级方面起到了积极作用。二连浩特和东乌珠穆沁旗的脆弱性增加,由较低脆弱性(Ⅱ)分别增加到较高度脆弱性(Ⅳ)和中度脆弱性(Ⅲ);二连浩特人口增加,植被盖度降低,城市化是造成脆弱性增加的主要原因。东乌珠穆沁旗,牲畜头数增加,超载严重,导致植被盖度降低,脆弱性等级增加。其他旗县脆弱性等级为发生变化,除太仆寺旗处于高度脆弱性(Ⅴ)外,均处于较低脆弱性等级(Ⅱ)。太仆寺旗的人口密度,显著高于其他旗县是造成脆弱性较高的主要因素。

在第二阶段(1991—2000 年)到第三阶段

(2001—2010 年)间,二连浩特市、苏尼特右旗、东乌珠穆沁旗、太仆寺旗、正镶白旗和多伦都表现出脆弱性降低的趋势。其中二连浩特市和太仆寺旗变化最为显著,分别由较高脆弱性(Ⅳ)和高度脆弱性(Ⅴ)降低到低脆弱性(Ⅰ)和较低脆弱性(Ⅱ)。同样是城市化进程增加的二连浩特市,脆弱性则表现出显著降低,主要是该地风速降低、大风日数的减小,植被增加,发生沙尘暴的风险减少;同时,城市建设,线路密度、生产总值以及医疗条件的改善和提高,提高灾害的抵御能力和恢复能力,使得灾害脆弱性降低。在 2000 年后,太仆寺旗、苏尼特右旗、正镶白旗和多伦脆弱性变化主要引起因素:引起变化的主要因素是耕地面积比例减少,植被盖度明显增加,牲畜头数逐渐减少,超载问题得到缓解,牧民纯收入一直保持持续增长。一直向有利于脆弱性降低的趋势发展。随着锡盟经济社会发展产业结构调整迅速,人均收入提高

迅速,在一定程度上降低了承灾体的脆弱性。镶黄旗和正蓝旗是农牧交错地区,耕地比例的减少趋势不明显,一般维持在 1.5%~2.05%,由于降水减少,地温增加,同时人口密度较大,对生态环境具有一定的压力。多个因素的叠加使得该地区脆弱性呈现增加趋势。

总体而言,研究区的自然环境因素和经济、社会数据分析结果显示:大风日数减少,植被盖度增加,风速降低以及人口增长速度减缓、牲畜存栏头数和超载率得到一定控制、牧民纯收入逐年增加(特别是在 2000 年以后牧民的收入增速加快)、城市化进程得到合理发展,产业结构由农牧业为主的产业逐渐向合理化、多元化的产业结构转型,这些变化对增强承灾体抵御灾害能力、增加灾害恢复力、降低沙尘暴承灾体的脆弱性起到积极作用。同时医疗卫生条件的提高,增强了承灾体抵御灾害的能力,虽然降水有所减少,但并未起到决定性作用。

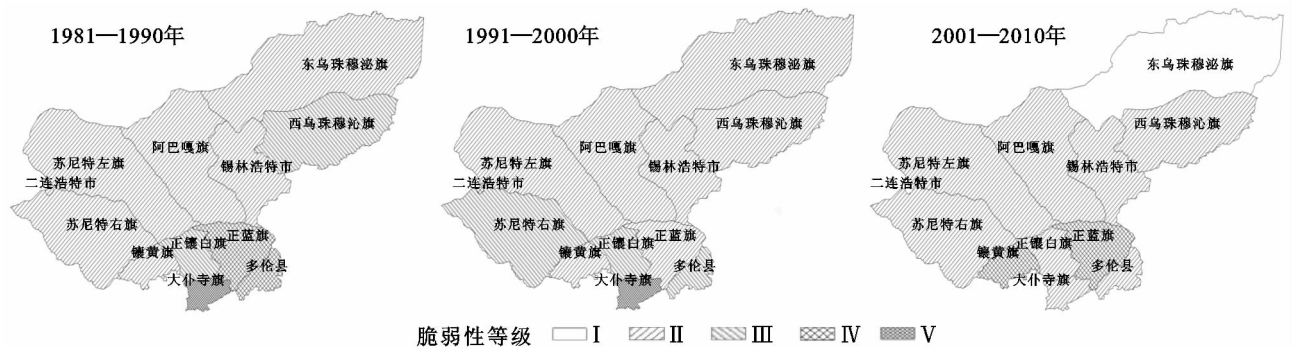


图 3 锡林郭勒盟沙尘暴承灾体脆弱性等级分布

4 结论

本文基于灾害系统理论,从自然成因和表现结果两个方面出发构建承灾体脆弱性评价体系,采用 GIS 地图代数和模糊综合评价法得到锡林郭勒盟草原区沙尘暴灾害承灾体脆弱性评价图。由于沙尘暴灾害形成的复杂性,影响因子众多,完全定量分析承灾体脆弱性有一定的困难,本文的工作只是一个初步探索。

(1) 运用模糊数学对草原区沙尘暴承灾体脆弱性评价,根据脆弱度大小划分为 5 个区,评价结果与各地区的生态环境特点及社会经济等表现一致,证明了该评价方法的可行性,可以应用此法对其他地区进行脆弱性评价。

(2) 将草原区沙尘暴承灾体脆弱性划分为 5 个等级,根据承灾体脆弱性变化的主要因素,可以提出相应的对策,提高承灾体的抵御和恢复能力,为防灾减灾工作提供依据,为生态恢复建设工作提供治理方向。

参考文献:

- [1] 丁国栋. 风沙运动学[M]. 2 版. 北京:中国林业出版社, 2010.
- [2] 史培军. 再论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(4): 6-17.
- [3] 李锋. 沙尘暴灾害风险评估指标体系初探[J]. 灾害学, 2011, 26(4): 8-13, 23.
- [4] 黄富祥. 张新时. 徐永福. 毛乌素沙地气候因素对沙尘暴频率影响作用的模拟研究[J]. 生态学报, 2001, 21(11): 1875-1884.
- [5] 杨根生, 拓万全. 关于宁蒙陕农牧交错带重点地区沙尘暴灾害及防治对策[J]. 中国沙漠, 2002, 22(5): 452-465.
- [6] 吴焕忠. 我国沙尘暴灾害述评及减灾对策[J]. 农村生态环境, 2002, 18(2): 1-5.
- [7] 范一大, 史培军, 朱爱军, 等. 中国北方沙尘暴与气候因素关系分析[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(5): 12-18.
- [8] 岳耀杰, 王静爱, 易湘生, 等. 中国北方沙区城市风沙灾害危险度评价: 基于遥感、地理信息系统和模型的研究[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(1): 15-20.
- [9] 杨秋珍, 徐明, 李军. 对气象致灾因子危险度诊断方法的

探讨[J]. 气象学报, 2010, 60(2): 277-284.

- [10] 罗敬宁, 郑新江, 朱福康, 等. 中国沙尘暴发生的气象危险度研究[J]. 中国沙漠, 2011, 31(1): 185-198.
- [11] 李锦荣. 基于 RS 和 GIS 的沙尘暴灾害风险评价研究: 以内蒙古锡林郭勒盟为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [12] 武健伟, 李锦荣, 孙涛, 等. 锡林郭勒地区沙尘暴气候致灾因子危险性评价[J]. 干旱区研究, 2011, 20(6): 936-943.
- [13] 李宁, 杜子璇, 刘忠阳. 沙尘暴发生过程中的风速和土壤湿度变化[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 28-30.
- [14] Mc Tainsh G H. Climatic controls upon dust storm occurrence in eastern Australia[J]. Journal of Arid Environments, 1998, 39(3): 457-466.
- [15] 顾卫, 蔡雪鹏, 谢峰, 等. 植被覆盖与沙尘暴日数分布关系探讨: 以内蒙古中西部地区为例[J]. 地球科学进展, 2002, 17(2): 273-277.
- [16] 顾卫, 蔡雪鹏, 李彰俊, 等. 内蒙古中西部地区沙尘暴日数分布的地貌特征[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(4): 131-136.
- [17] 郭妮, 张杰, 韩涛, 等. 西北特殊地形与沙尘暴发生的关系探讨[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 576-581.
- [18] 李彰俊, 李宁, 顾卫, 等. 内蒙古中西部地区土壤水分对沙尘暴的贡献[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 24-28.
- [19] 郝璐, 李彰俊, 郭瑞清. 冬春季积雪与沙尘天气发生日

数关系的探讨: 以内蒙古中部地区为例[J]. 中国沙漠, 2006, 26(5): 797-801.

- [20] 杜子璇, 李宁, 刘忠阳, 等. 层次分析法在下垫面因子影响沙尘暴危险度研究中的应用[J]. 干旱区地理, 2007, 30(2): 184-188.
- [21] 樊运晓, 罗云, 陈庆寿. 区域承灾体脆弱性评价指标体系研究[J]. 现代地质, 2001, 15(1): 113-116.
- [22] 樊运晓, 高朋会, 王红娟. 模糊综合评判区域承灾体脆弱性的理论模型[J]. 灾害学, 2003, 18(3): 20-23.
- [23] 樊运晓, 罗云, 陈庆寿. 区域承灾体脆弱性综合评价指标权重的确定[J]. 灾害学, 2001, 16(1): 85-87.
- [24] 叶宗裕. 关于多指标综合评价中指标正向化和无量纲化方法的选择[J]. 浙江统计, 2005, (4): 24-25.
- [25] 韩胜娟. SPSS 聚类分析中数据无量纲化方法比较[J]. 科技广场, 2008(3): 229-231.
- [26] 张卫华, 赵铭军. 指标无量纲化方法对综合评价结果可靠性的影响及其实证分析[J]. 统计与信息论坛, 2005, 20(3): 33-36.
- [27] 陈松林, 王天星. 等间距法和均值—标准差法界定城市热岛的对比研究[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(2): 145-150.
- [28] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006.
- [29] 杜娟, 何飞, 史培军. 湘江流域洪水灾害综合风险评价[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 38-44.

(上接第 107 页)

- [4] 方向京, 李贵祥, 张正海. 滇东北不同退耕还林类型生物生产量及水土保持效益分析[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 229-232.
- [5] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 149-152.
- [6] 杨建波, 王利. 退耕还林生态效益评价方法[J]. 中国土地科学, 2003, 17(5): 54-58.
- [7] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1986.
- [8] 魏强, 柴春山. 半干旱黄土丘陵沟壑区小流域水土流失治理综合效益评价指标体系与方法[J]. 水土保持研究, 2007, 14(1): 87-89.

(上接第 112 页)

- [8] 吴立忠, 郭世乾, 张保田. 基于 GIS 的黄土高原丘陵沟壑区的耕地地力评价研究: 以天水市麦积区耕地地力评价为例[J]. 中国农业资源与区划, 2009, 30(6): 35-41.
- [9] 陈颖, 吴柏清, 邹卓阳, 王广杰. 基于 GIS 的土地适宜性评价: 以四川省马尔康县为例[J]. 水土保持研究, 2010, 17(4): 100-103.
- [10] 傅伯杰. 土地评价的理论和实践[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991.

- [9] 古丽努尔·沙布尔哈孜, 尹林克, 热合木都拉·阿地拉, 等. 塔里木河中下游退耕还林还草综合生态效益评价: 以新疆生产建设兵团农二师 33 团为例[J]. 干旱区研究, 2004, 21(2): 161-165.
- [10] 张勇, 李有华, 杜轶, 等. 区域退耕还林(草)工程综合效益评价研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(6): 108-111.
- [11] 任春燕. 基于层次分析法的纸坊沟流域农业生态经济系统效益评价[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 214-217, 222.
- [12] 姚清亮. 河北省退耕还林工程效益评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009: 43-44.
- [13] 闫德仁, 薛英英, 韩凤杰, 等. 沙漠生物土壤结皮国外研究概况[J]. 内蒙古林业科技, 2007, 33(1): 39-40.

- [11] 戴旭. 农业土地评价的理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [12] 庄锁法. 基于层次分析法的综合评价模型[J]. 合肥工业大学学报, 2000, 23(4): 582-590.
- [13] 农肖肖, 何政伟, 吴柏清. ARCGIS 空间分析建模在耕地质量评价中的应用[J]. 水土保持研究, 2009, 16(1): 234-236.
- [14] 王蓉芳, 曹富友, 彭世琪, 等. 农业部行业标准: 全国耕地类型区、耕地地力等级划分[R]. 1996.