

# 内蒙古生态环境敏感性综合评价

刘军会<sup>1</sup>,高吉喜<sup>2\*</sup>,马 苏<sup>1</sup>,王文杰<sup>1</sup>,邹长新<sup>2</sup>(1.中国环境科学研究院,北京 100012; 2.环境保护部南京环境科学研究所,江苏 南京 210042)

**摘要:** 针对内蒙古土地沙化、土壤侵蚀、土壤盐渍化和生物多样性减少等区域自然环境演变过程中出现的生态问题,采用遥感和地理信息系统技术,构建敏感性评价指标体系与评价模型,对内蒙古生态环境敏感性进行综合研究,定量揭示研究区生态环境敏感性程度和空间分布特征.结果表明:土地沙化不敏感区、极敏感区分别占研究区面积 35.9%和 10.1%;土地沙化敏感性等级高的区域集中分布在内蒙古辖区内主要沙漠边缘和沙地;土壤基质多为沙粒、冬春季节多大风且植被覆盖度较低是土地容易发生沙化的主要原因.土壤侵蚀轻度、中度和高度敏感区分别占研究区面积的 43.9%、30.2%和 19.2%;受降水空间差异影响,土壤侵蚀敏感性等级自东南向西北呈逐步下降趋势.土壤盐渍化不敏感区、极敏感区分别占研究区面积的 57.6%和 14.6%,盐渍化明显地区主要分布在内蒙古西北部和东部;蒸发量远大于降水量,人类活动影响较明显,是土壤盐渍化高发的主要原因.生境不敏感、高度和极敏感区分别占研究区面积的 30.5%、25.1%和 10.6%,敏感性等级高的区域主要分布在大小兴安岭地区;这些区域水热条件相对较好,植被覆盖度高,物种数量较为丰富,是生物多样性重点保护区域.综合生态环境高度和极敏感区分别占研究区面积的 27.9%和 9.6%;敏感性等级高的区域位于内蒙古中北部,等级较低的区域位于内蒙古西北、东北和东南部.

**关键词:** 生态环境敏感性; 土地沙化; 土壤侵蚀; 土壤盐渍化; 生境; 内蒙古

**中图分类号:** X826      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6923(2015)02-0591-08

**Comprehensive evaluation of eco-environmental sensitivity in Inner Mongolia, China.** LIU Jun-hui<sup>1</sup>, GAO Ji-xi<sup>2\*</sup>, MA Su<sup>1</sup>, WANG Wen-jie<sup>1</sup>, ZOU Chang-xin<sup>2</sup> (1.Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2.Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China). *China Environmental Science*, 2015,35(2): 591~598

**Abstract:** Using the integrated approach of GIS and RS technology, four factors including land desertification, soil erosion, soil salinization and biodiversity reduction were selected to establish the evaluation model of eco-environmental sensitivity in the present study. This paper analyzed the eco-environmental sensitivity and revealed its spatial characteristics in a quantitative way. The insensitive and extremely sensitive areas of land desertification made up 35.9% and 10.1% of the study area (1.183million square km), respectively. The surrounding areas of desertification in Inner Mongolia were the most environmentally sensitive regions. This was due to strong wind in winter and spring in these areas, and the soil mainly consists of sand and was seldom covered by vegetation. The slight, moderate and highly sensitive areas of soil erosion comprised about 43.9%, 30.2% and 19.2%, respectively. The trend of soil erosion sensitivity decreased gradually from Southeast to Northwest of Inner Mongolia, which was mainly a result of the vertical dropping slopes and spatial variation of precipitation. The insensitive and extremely sensitive areas of soil salinization made up 57.6% and 14.6%, respectively. The northwestern and eastern parts of Inner Mongolia were the most environmentally sensitive areas. The primary causes were negative impacts of arid climate and human activities. The insensitive, highly and extremely sensitive areas of bio-inhabitation comprise 30.5%, 25.1% and 10.6%, respectively. Highly sensitive areas are located in the northeastern parts of Inner Mongolia. The reason was that species richness was positively correlated with precipitation and vegetation cover in these areas. The highly and extremely sensitive areas of comprehensive eco-environment made up 27.9% and 9.6%, respectively. The high and extremely sensitive areas were located in the

收稿日期: 2014-05-19

基金项目: 国家“863”项目(2012AA12A310);国家环境保护公益性行业科研专项(201209027,201109025)

\* 责任作者, 研究员, gjx@nies.org

moderate and northern parts, and the insensitive, slight and moderate sensitive areas in the northwestern, northeastern and southeastern parts of Inner Mongolia.

**Key words:** eco-environment sensitivity; land desertification; soil erosion; soil salinization; habitat; Inner Mongolia

生态环境敏感性是指生态系统对各种环境变异和人类活动干扰的敏感程度,即生态系统在遇到干扰时,生态环境问题出现的概率大小<sup>[1-2]</sup>。生态环境敏感性评价实质就是在不考虑人类活动影响的前提下,评价具体的生态过程在自然状况下潜在的产生生态环境问题的可能性大小,敏感性高的区域,当受到人类不合理活动影响时,就容易产生生态环境问题,是生态环境保护和恢复建设的重点<sup>[2]</sup>。已有研究多关注我国西南湿润地区<sup>[3-7]</sup>和西北干旱地区<sup>[2,8-10]</sup>,对我国北方干旱-半干旱地区的生态环境敏感性研究相对较少,且多集中于对单一生态要素敏感性的分析,生态环境敏感性综合研究相对较少<sup>[1,6]</sup>。

内蒙古是我国重要的农牧业生产基地,人类活动强度较大,且大部分植被地处干旱、半干旱农牧交错地区,生态环境脆弱,是全球变化最为敏感的区域之一<sup>[11-12]</sup>。为此,本研究采用遥感和 GIS 技术,针对内蒙古土地沙化、土壤侵蚀、土壤盐渍化、生物多样性减少等区域自然环境演变过程中出现的生态问题,定量分析研究区生态环境敏感性的地理空间分异特征与规律,以期为建设北方生态安全屏障和划定内蒙古生态保护红线提供科学基础。

## 1 数据获取与处理

遥感数据:覆盖内蒙古的 2000~2010 年 MODIS13Q1 数据,来源于美国国家航空航天局(NASA)的 EOS/MODIS 数据产品(<http://e4ft101.cr.usgs.gov>),空间分辨率为 250m×250m,时间分辨率为 16d。由于 MODIS NDVI 产品经过水、云、重气溶胶等处理,保证了数据质量,加之较高的空间分辨率,被广泛应用于区域植被覆盖变化研究。首先,使用 MRT(MODIS Reprojection Tools)将下载的 MODIS NDVI 进行格式和投影转换;然后,为消除异常值的影响,采用最大合成法 MVC(Maximum Value Composites)合成月 NDVI

数据,进而将月 NDVI 数据合成年最大 NDVI 影像;最后,利用研究区边界裁切 NDVI 数据,获取 2000~2010 年逐年及逐月 NDVI 影像。

气象数据:研究区 2000~2010 年降雨量、温度、风速和大风日数资料来源于中国气象科学数据共享服务网中的中国地面气候资料数据集(<http://cdc.cma.gov.cn/>)。数据内容包括全国各个气象站点的编号、经纬度和海拔,以及每个气象站点在相应分析时间尺度内的降雨量(0.1mm)、温度(0.1℃)、风速(0.1m/s)。根据各气象站点的经纬度信息,采用 ArcGIS 的 Geostatistical Analyst 模块对气象数据进行 Kriging 空间插,获取与 NDVI 数据像元大小一致、投影相同的气象数据栅格图像。

高程数据:基于 1:25 万数字高程模型(DEM)提取,利用 DEM 提取坡度、坡长、地形起伏度数据。

土壤数据:土壤质地数据来源于中科院南京土壤研究所的中国 1:100 万土壤数据库。土壤属性数据库包括土壤表层粘粒、粉沙、沙粒、有机质含量等属性字段。

## 2 研究方法

借助 RS 与 GIS 技术,结合内蒙古的自然和社会经济实际情况,参照国家环保总局颁发的《生态功能区划技术暂行规程》<sup>[13]</sup>,选择研究区比较突出的土地沙化、土壤侵蚀、土壤盐渍化和生境 4 个生态环境要素建立敏感性评价模型与方法,对内蒙古生态环境敏感性进行综合研究,定量揭示研究区生态环境敏感性程度及其空间分布规律。

### 2.1 土地沙化敏感性评价方法

影响土地沙化的因素很多,根据《生态功能区划技术暂行规程》要求,并结合研究区实际情况,选取干燥度指数、起沙风天数、土壤质地、植被覆盖度等评价指标,并根据研究区的实际对

分级评价标准作相应的调整(表 1)。干燥度指数是表征一个地区干湿程度的指标,反映了某地、某时水分的收入和支出状况,采用修正的谢良尼诺夫公式<sup>[14]</sup>计算干燥度指数。风力强度是影响风对土壤颗粒搬运的重要因素。已有研究资料<sup>[15]</sup>表明,砂质壤土、壤质砂土和固定风砂土的起动风速分别为 6.0,6.6,5.1m/s,本研究选用冬春季节大于 6m/s 起沙风天数这个指标来评价土地沙化敏感性。不同粒度的土壤颗粒具有不同的抗蚀力,粘质土壤易形成团粒结构,抗蚀力增强;在粒径相同的条件下,沙质土壤的起沙速率大于壤质土壤的起沙速率;砾质结构的土壤和戈壁土壤的风蚀速率小于沙地土壤;基岩质土壤供沙率极低,受风蚀的影响不大。地表植被覆盖是影响沙化敏感性的一个重要因素,在水域、冰雪和植被覆盖高的地区,不会发生土壤的沙化;相反,地表裸露、植被稀少都会使土壤沙化的机会增加。

评价。土壤侵蚀敏感性是自然因素所决定的生态系统对人为影响反应的敏感程度。农业措施因子是与人类活动密切相关的因子,与生态系统的自然敏感性关系不大,本文不做考虑。研究中借鉴周伏建等<sup>[16]</sup>研究成果,采用 1~12 月多年月均降雨量计算研究区各气象站点降雨侵蚀力,经误差修正后得到降雨侵蚀力的空间分布,并依据表 2 中的分级标准绘制土壤侵蚀对降水侵蚀的敏感性分级;参考已有的相关研究成果<sup>[17-23]</sup>,以内蒙古自治区土壤分布图为底图,按表 2 中的分级标准绘制土壤侵蚀对土壤可蚀性因子的敏感性分级图;应用地形起伏度,即地面一定距离范围内最大高差,作为区域土壤侵蚀敏感性评价的地形指标。然后,按表 2 的分级标准绘制土壤侵蚀的地形因子的敏感性分级图;根据研究区植被覆盖图对覆盖因子对研究区土壤侵蚀敏感性进行级赋值(表 2),并绘制植被对土壤侵蚀敏感性分级图。

表 1 土地沙化敏感性评价指标及分级赋值标准

Table 1 Categories of influence grades of each factor on land desertification sensitivity

类型	干燥度指数	>6m/s起沙风天数(d)	土壤质地	植被覆盖度(%)	分级赋值
不敏感	<1.0	<5	基岩	>80	1
轻度敏感	1.0~1.5	5~10	黏质	60~80	3
中度敏感	1.5~4.0	10~20	砾质	40~60	5
高度敏感	4.0~16.0	20~30	壤质	20~40	7
极敏感	>16.0	>30	沙质	<20	9

根据各指标敏感性分级赋值标准(表 1),利用地理信息系统的空间分析功能,将各单因子敏感性影响分布图进行乘积运算,得到评价区的土地沙化敏感性等级分布图,公式如下:

$$D_i = \sqrt[4]{I_i \cdot W_i \cdot K_i \cdot C_i} \quad (1)$$

式中: $D_i$  为  $i$  评价区域土地沙化敏感性指数; $I_i$ 、 $W_i$ 、 $K_i$ 、 $C_i$  分别为  $i$  评价区域干燥度指数、起沙风天数、土壤质地和植被覆盖的敏感性等级值。

### 2.2 土壤侵蚀敏感性评价方法

根据通用水土流失方程的基本原理,选择降雨侵蚀力、土壤可蚀性、坡长坡度因子以及地表植被覆盖因子,对研究区的土壤侵蚀敏感性进行

表 2 土壤侵蚀敏感性的评价指标及分级赋值

Table 2 Categories of influence grades of each factor on soil erosion sensitivity

类型	降雨侵蚀力	土壤可蚀性	地形起伏度(m)	植被覆盖(%)	分级赋值
不敏感	<25	石砾、沙	0~20	>80	1
轻度敏感	25~100	粗砂土、细砂土、黏土	20~50	60~80	3
中度敏感	100~400	面砂土、壤土	51~100	40~60	5
高度敏感	400~600	砂壤土、粉黏土、壤黏土	101~300	20~40	7
极敏感	>600	砂粉、粉土	>300	<20	9

根据各因子的分级及赋值,利用 ArcGIS 的空间叠加功能,将上述各单因子敏感性影响分布图进行乘积计算,公式如下:

$$SS_i = \sqrt[4]{R_i \cdot K_i \cdot LS_i \cdot C_i} \quad (2)$$

式中: $SS_i$  为  $i$  空间单元土壤侵蚀敏感性指数,评价因子包括降雨侵蚀力( $R_i$ )、土壤可蚀性( $K_i$ )、坡长坡度( $LS_i$ )、地表植被覆盖度( $C_i$ )。

$R$  值的估算:采用周伏建等<sup>[16]</sup>根据实测数据建立的  $R$  值计算公式:

$$R = \sum_{i=1}^{12} (-1.5527 + 0.1792P_i) \quad (3)$$

式中, $R$  为年降雨及径流因子; $P_i$  为月降雨量 (mm).

$K$  值的估算:应用 Wischmeier 等选用粉粒+极细砂粒含量、砂粒含量、有机质含量、结构和入渗 5 项土壤特征指标,与土壤可蚀性因子  $K$  值作出土壤可蚀性诺谟图<sup>[17,24]</sup>.

$$K = [2.1 \times 10^{-4} M^{1.14} (12 - OM) + 3.35(s - 2) + 2.5(p - 3)]/100 \quad (4)$$

式中: $M$  为美国粒径分级制中的(粉粒+极细砂)%与(100-黏粒)之积; $OM$  为土壤有机质含量; $s$  为结构系数; $p$  为渗透性系数.

LS 值的估算:应用江忠善等<sup>[25]</sup>的 LS 计算公式:

$$LS = 1.07 \left( \frac{\lambda}{20} \right)^{0.28} \left( \frac{\alpha}{10^\circ} \right)^{1.45} \quad (5)$$

式中: $\lambda$  为坡长, $m$ ;  $\alpha$  为坡度, $^\circ$ .

$C$  值的估算:植被作用系数( $C$ )是根据地面植物覆盖状况不同而反映植被对土壤流失影响的因素,当地面完全裸露时, $C$  值为 1.0,如果地面得到良好保护时, $C=0.01$ .植被作用系数与植被类型、覆盖度有关.一般通过建立植被因子与植被覆盖度的关系求  $C$ <sup>[27]</sup>.

最后,采用自然分界法(Natural break, ArcGIS 的这种分类方法是利用统计学的 Jenk 最优化法得出的分界点,能够使各级的内部方差之和最小)将评价结果分为 5 级,绘制内蒙古土壤侵蚀敏感性等级综合评价图.

### 2.3 土壤盐渍化敏感性评价方法

盐渍化主要是由于气候干旱、排水不畅、地下水水位过高及不合理灌溉方式形成的<sup>[1]</sup>.内蒙古西北部存在大面积的戈壁荒漠,分布的土壤有棕钙土、荒漠灰钙土和灰棕色荒漠土,土中多沙砾.许多地方土壤含盐量很高,因缺少雨水冲刷,盐分板结在土壤表层,形成严重的盐渍化.由于地处蒸发率高的干旱区,高强度人类活动提高了地表水水平,引发了土壤次生盐渍化,从而导致生境恶化.为系统评价该区土壤盐渍化的敏感性,选择蒸发量与降水量比值、地下水矿化度指标进行综合评价,采用自然分界法将敏感性评价分为 5 级(表 3),

绘制内蒙古土壤盐渍化敏感性等级评价图.

表 3 土壤盐渍化敏感性等级分类标准

Table 3 Categories of soil salinization sensitivity in Inner Mongolia

等级	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感
蒸发量/降水量	<1	1~5	5~10	10~15	>15
地下水矿化度(g/L)	<1	1~3	3~10	10~50	>50

### 2.4 生境敏感性评价方法

《生态功能区划技术暂行规程》要求根据生境物种丰富度,即评价区国家与省级保护对象的数量来评价生境敏感性.但是,由于生物多样性的敏感性评价中,对动物和微生物的敏感度较难空间定量化,而物种多样性很大程度上反映在其赖以生存的生态系统的类型特征<sup>[6]</sup>.借鉴潘峰等<sup>[8]</sup>研究方法,结合内蒙古生态系统类型及生物多样性分布特征<sup>[27-30]</sup>,重点对物种赖以生存的地表植被进行生境敏感性分析.利用归一化植被指数(NDVI)(取 0~1 值)反映生态环境的原生状态保持程度和植被生长状况<sup>[8]</sup>,将内蒙古依植被生长状况及其在生物多样性保护中的敏感程度划分为 5 个等级(表 4),植被覆盖较高的森林、草原区也是生境保护的重要区域和特殊区域,生境敏感性也最高.

表 4 生境敏感性等级分类标准

Table 4 Categories of bio-inhabitation sensitivity in Inner Mongolia

等级	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感
NDVI 值	0~0.16	0.16~0.38	0.38~0.60	0.60~0.83	0.83~1.00

### 2.5 生态环境敏感性综合评价方法

单因子的生态环境敏感性仅反映了某一因子对生态环境的作用程度或敏感性,没有将研究区生态环境敏感性的空间变异特征综合反映出来.根据各因子的分级及赋值,利用 ArcGIS 的空间叠加功能,将上述各单因子敏感性影响分布图进行叠加计算,公式如下:

$$ES_i = \sum_{i=1}^4 W_i F_i \quad (6)$$

式中:  $ES_i$  为  $i$  空间单元生态环境敏感性指数,  $W_i$  为  $i$  生态环境因子的权重. 由于荒漠化是中国北方干旱、半干旱地区面临的主要生态环境问题<sup>[31]</sup>, 采用层次分析法, 结合专家知识与统计分析确定各生态环境因子的权重, 土地沙化敏感性因子权重设为 0.4, 土壤侵蚀、土壤盐渍化和生境敏感性因子权重均设为 0.2;  $W_i F_i$  为  $i$  生态环境因子敏感性等级值. 然后采用自然分界法将  $ES$  分为 5 级<sup>[3,32]</sup>, 绘制出内蒙古生态环境敏感性综合评价图.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 土地沙化敏感性评价

由表 5 可见, 内蒙古土地沙化以不敏感区为主, 所占比例为 35.9%; 轻度、中度和高度敏感区分别占 19.0%、19.4% 和 15.7%; 极敏感区占 10.1%. 由图 1 可见, 空间上, 高度和极敏感地区位于内蒙古辖区内 8 个主要沙漠、沙地(自西向东依次为巴丹吉林、腾格里、乌兰布和、库布齐沙漠与毛乌素、浑善达克、科尔沁、呼伦贝尔沙地)的周边区域, 包括阿拉善盟中西部、巴彦淖尔市北部、鄂尔多斯市西部、包头市北部、乌兰察布市北部、锡林郭勒盟西北部、赤峰市中东部、通辽市南部、呼伦贝尔市中部等区域. 这些地区位于大兴安岭、阴山山脉的西北方向, 冬春季节常年多大风, 降水少, 地表干旱, 土壤基质多为沙粒, 植被覆盖度低, 这些自然要素导致土地沙化敏感性很高. 中度敏感区位于高度敏感区和极敏感区的外围,

包括阿拉善盟东、西两侧、巴彦淖尔市中部、鄂尔多斯市东北部和南部、包头市南部、呼和浩特市南部、乌兰察布市南部、锡林郭勒盟中部、赤峰市中北部、通辽市中北部、兴安盟东南部、呼伦贝尔市西部等. 轻度和不敏感地区位于阿拉善盟的荒漠地区、巴彦淖尔市南部、呼和浩特市中部、乌兰察布市南部、锡林郭勒盟东部、赤峰市北部和南部、通辽市中北部、兴安盟中北部和呼伦贝尔市中东部. 这些区域位于大兴安岭、阴山山脉的东南部, 风速较小, 气候相对湿润, 植被覆盖度高, 土地沙化程度不高. 此外, 过度放牧、滥垦草原、矿产过度开发等人为活动对土地沙化形成起到了重要作用.

#### 3.2 土壤侵蚀敏感性评价

由表 5、图 1 可见, 内蒙古土壤侵蚀以轻度、中度和高度敏感区为主, 所占比例分别为 43.9%、30.2% 和 19.2%; 极敏感区占 4.0%; 不敏感区占 2.7%. 空间上, 研究区土壤侵蚀敏感性具有明显的水平地带性分布, 自东南向西北敏感性等级逐步下降. 高度和极敏感地区主要位于内蒙古东南部, 包括呼和浩特市、包头市、乌海市、鄂尔多斯市东部、乌兰察布市、赤峰市、巴彦淖尔市东部、呼伦贝尔市东部以及兴安盟、通辽市的一部分, 这些区域降水相对较多, 地形坡降迅速, 水力侵蚀较强. 中度、轻度和不敏感地区位于内蒙古西北部, 包括阿拉善盟、巴彦淖尔市西部、鄂尔多斯市西部、锡林郭勒盟、通辽市东部以及呼伦贝尔市西部等区域, 这些地区降水少, 地形平缓, 降雨侵蚀力弱, 土壤侵蚀敏感性很低.

表 5 内蒙古生态环境敏感性综合评价结果

Table 5 Area and proportion of each eco-environmental sensitivity type in Inner Mongolia

敏感等级	土地沙化敏感性		土壤侵蚀敏感性		盐渍化敏感性		生境敏感性		综合敏感性	
	面积(km <sup>2</sup> )	比例(%)								
不敏感	424613.6	35.9	31857.6	2.7	681005.8	57.6	360761.4	30.5	153599.0	13.0
轻度敏感	224389.9	19.0	518891.3	43.9	132037.1	11.2	204429.4	17.3	297993.2	25.2
中度敏感	229103.0	19.4	357161.3	30.2	72757.7	6.2	195244.8	16.5	287211.4	24.3
高度敏感	185736.6	15.7	227195.0	19.2	125011.2	10.6	297304.4	25.1	330160.8	27.9
极敏感	119156.7	10.1	47894.5	4.0	172188.2	14.6	125260.5	10.6	114035.2	9.6

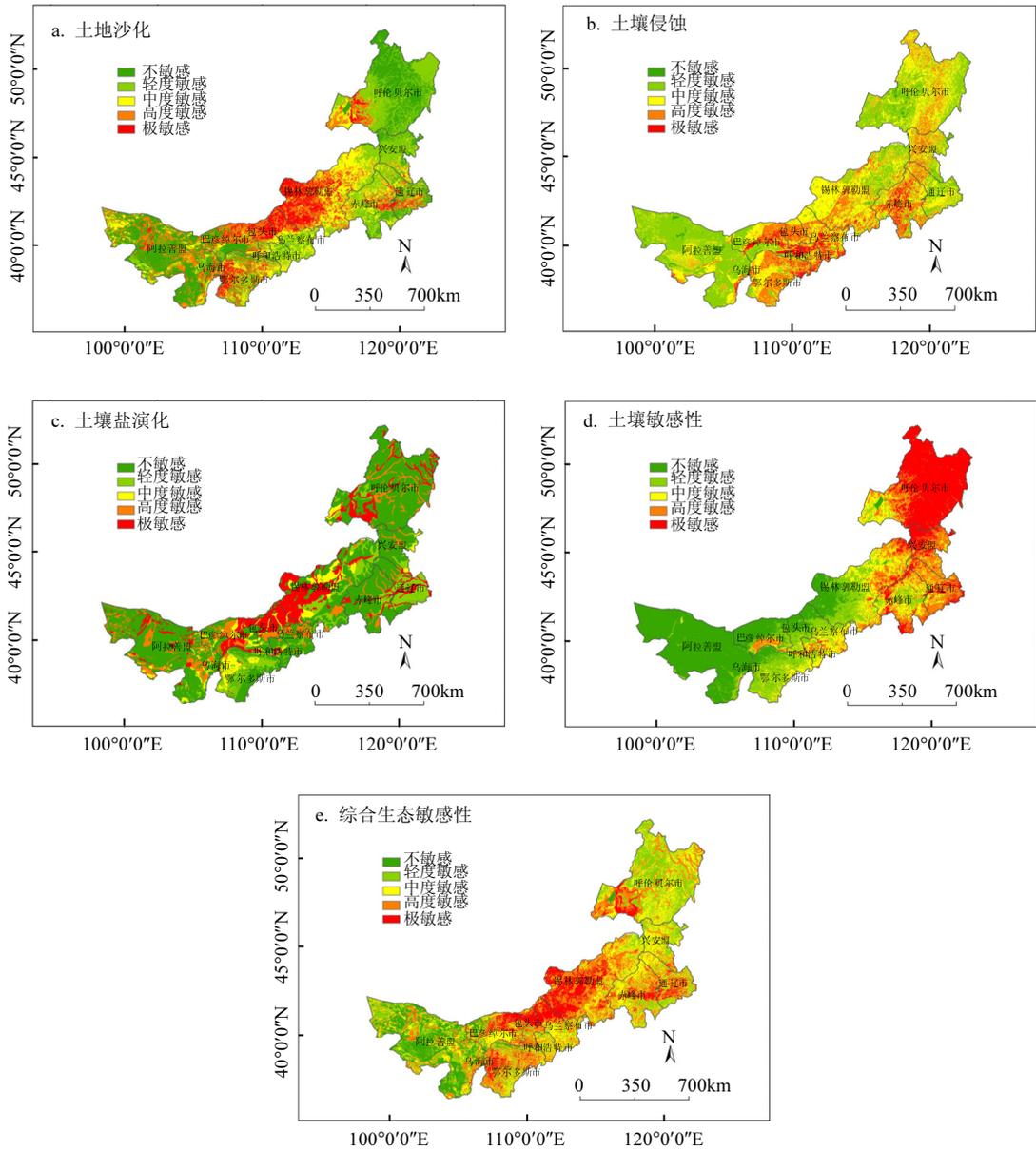


图1 土地沙化、土壤侵蚀、土壤盐渍化、生境和综合生态敏感性评价

Fig.1 Sensitivity assessment of land desertification, soil erosion, soil salinization, bio-inhabitation and integrated eco-environment in Inner Mongolia

### 3.3 土壤盐渍化敏感性评价

由表 5、图 1 可见,内蒙古土壤盐渍化以不敏感区为主,所占比例达 57.6%;其次是极敏感、轻度敏感和高度敏感区,所占比例分别为 14.6%、11.2%与 10.6%;中度敏感区面积最小,所占比例达 6.2%。空间上,极敏感区与高度敏感区分布在

内蒙古西北部和东部,包括阿拉善盟北部、乌海市、巴彦淖尔市中南部、包头市北部、乌兰察布市北部、锡林郭勒盟西北部、呼伦贝尔市西部以及通辽市的一部分,这些地区土壤含盐量高,蒸发量与降水量比值大,缺少雨水冲刷,盐分板结在土壤表层上,容易形成盐渍化。中度敏感区分布在极

敏感和高度敏感区的外围,轻度和不敏感区分布在内蒙古东南部和西部,包括阿拉善盟南部、鄂尔多斯市、包头市南部、呼和浩特市、乌兰察布市南部、锡林郭勒盟东南部、赤峰市、兴安盟以及呼伦贝尔市中东部。

### 3.4 生境敏感性评价

由表 5、图 1 可见,内蒙古生境敏感性以不敏感和高度敏感区为主,所占比例分别为 30.5%与 25.1%;轻度、中度和极敏感区分别占 17.3%、16.5%与 10.6%。空间上,极敏感区分布在内蒙古东北部的大小兴安岭山地,包括呼伦贝尔市中东部、兴安盟北部、通辽市东部、赤峰市南部、锡林郭勒盟东南部地区,这些区域水热条件较好,植被生长茂盛,物种数量较为丰富。高度敏感地区分布在极敏感区的外围、巴彦淖尔市南部和呼和浩特市中部,是研究区植被发育相对较好的区域。中度敏感区分布在鄂尔多斯市南部、呼和浩特市南部、乌兰察布市南部、锡林郭勒盟中东部、赤峰市以及呼伦贝尔市西部,这些区域降水较少,生物多样性较低。轻度敏感区分布在鄂尔多斯市中部、包头市南部、乌兰察布市中部、锡林郭勒市中部以及赤峰市中部,这些区域植被较少且植被覆盖低。不敏感区主要分布在阿拉善盟、乌海市、鄂尔多斯市北部、巴彦淖尔市北部、包头市北部、乌兰察布市北部以及锡林郭勒盟西北部,这些区域以荒漠植被为主,植被覆盖度及生物多样性很低。

### 3.5 生态环境敏感性综合评价

由表 5、图 1 可见,内蒙古生态环境综合敏感性以高度、轻度和中度敏感区为主,分别占研究区面积的 27.9%、25.2%和 24.3%;不敏感区占 13.0%;极敏感区面积最小,占 9.6%。空间上,研究区生态环境综合敏感性空间分布的总体特征与其他几个单项因子敏感性的空间分布特征基本一致。极敏感和高度敏感分布在巴彦淖尔市北部、鄂尔多斯市西部、包头市北部、乌兰察布市北部、锡林郭勒盟西北部、赤峰市中部、通辽市中部以及呼伦贝尔市中西部等区域。中度敏感区分布在高度、极敏感区的外围,主要包括阿拉善盟中部、巴彦淖尔市南部、鄂尔多斯市东南部、呼和浩特市、锡林郭勒盟中东部、赤峰市西北部、

通辽市北部、兴安盟西部、呼伦贝尔市东南部。轻度敏感和不敏感区位于阿拉善盟、巴彦淖尔市西部、鄂尔多斯市北部、锡林郭勒盟东北部、赤峰市南部、通辽市南部、兴安盟东部和呼伦贝尔市中东部区域。

生态环境敏感性等级高的区域是内蒙古生态环境问题多发地区,也是京津风沙源治理的重点区域,应纳入国家生态保护红线划定范围。针对生态环境敏感性等级高的区域,应通过改革生态环境保护管理体制,划定生态保护红线并实施强制性保护,以遏制区域生态环境退化趋势,为我国北方构筑牢固的生态安全屏障。

## 4 结论

4.1 土地沙化不敏感区面积比例达 35.9%;敏感性等级高的区域集中分布在内蒙古辖区内的 8 个主要沙漠、沙地的周边区域。

4.2 土壤侵蚀轻度、中度和高度敏感区分别占 43.9%、30.2%和 19.2%;受降水空间差异影响,研究区土壤侵蚀敏感性具有明显的水平地带性分布,自东南向西北敏感性等级逐步下降。

4.3 土壤盐渍化不敏感区比例达 57.6%,其次是极敏感、轻度敏感和高度敏感区,中度敏感区所占比例最小,占 6.2%。盐渍化明显地区主要分布在内蒙古西北部和东部的部分地区。

4.4 生境不敏感和高度敏感地区比例分别为 30.5%与 25.1%,其次为轻度敏感、中度敏感和极敏感区。水热条件相对较好,植被覆盖度高的区域,生物多样性较为丰富,生境敏感性高。

4.5 综合生态环境高度、轻度和中度敏感区所占比例分别为 27.9%、25.2%和 24.3%;极敏感区面积最小,占 9.6%。空间上,内蒙古辖区内的主要沙漠、沙地的周边区域的综合生态环境敏感性等级高,西北部、东北部和东南部敏感性等级相对较低。

### 参考文献:

- [1] 欧阳志云,王效科,苗 鸿.我国生态环境敏感性及其区域差异规律研究 [J]. 生态学报, 2000,20(1):9-12.
- [2] 刘 康,欧阳志云,王效科,等.甘肃省生态环境敏感性评价及其

- 空间分布 [J]. 生态学报, 2003,23(12):2712-2718.
- [3] 王小丹,钟祥浩,范建容.西藏水土流失敏感性评价及其空间分异规律 [J]. 地理学报, 2004,59(2):183-188.
- [4] 肖荣波,欧阳志云,王效科,等.中国西南地区石漠化敏感性评价及其空间分析 [J]. 生态学杂志, 2005,24(5):551-554.
- [5] 李东梅,吴晓青,于德永,等.云南省生态环境敏感性评价 [J]. 生态学报, 2008,28(11):5270-5278.
- [6] 刘春霞,李月臣,杨 华,等.三峡库区重庆段生态与环境敏感性综合评价 [J]. 地理学报, 2011,66(5):631-642.
- [7] 凡非得,王克林,熊 鹰,等.西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征 [J]. 生态学报, 2011,31(21):6353-362.
- [8] 潘 峰,田长彦,邵 峰,等.新疆克拉玛依市生态敏感性研究 [J]. 地理学报, 2011,66(11):1497-1507.
- [9] 刘 康,徐卫华,欧阳志云,等.基于 GIS 的甘肃省土地沙漠化敏感性评价 [J]. 水土保持通报, 2002,22(5):29-35.
- [10] 刘耀龙,王 军,许世远,等.黄河靖南峡一黑山峡河段的生态敏感性 [J]. 应用生态学报, 2009,20(1):113-120.
- [11] 孙根年,王美红.内蒙古植被覆盖与土地退化关系及空间结构研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2008,22(2):140-144.
- [12] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等.2001-2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征 [J]. 地理学报, 2012,67(9):1255-1268.
- [13] 国家环境保护总局.生态功能区划暂行规程.2003. <http://www.zhb.gov.cn/>.
- [14] 中国科学院自然区划工作委员会:《中国气候区划》(初稿),科学出版社,北京,1959.
- [15] 刘连友,王建华,李小雁,等.耕作土壤可蚀性颗粒的风洞模拟测定 [J]. 科学通报, 1998,43(15):1663-1666.
- [16] 周伏建,黄炎和,陈明华,等.福建省降雨侵蚀力指标  $R$  值 [J]. 水土保持学报, 1995,9(1):13-18.
- [17] 张科利,彭文英,杨红丽.中国土壤可蚀性值及其估算 [J]. 土壤学报, 2007,44(1):7-13.
- [18] 金争平,史培军,侯福昌,等.黄河黄甫川流域土壤侵蚀系统模型和治理模式 [M]. 北京:海洋出版社, 1992.
- [19] 张宪奎,许靖华,卢秀琴,等.黑龙江省土壤流失方程的研究 [J]. 水土保持通报, 1992,12(4):1-9.
- [20] 杨艳生,史德明.关于土壤流失方程中  $K$  因子的探讨 [J]. 中国水土保持, 1982,4:39-42.
- [21] 陈明华,周福建,黄炎和,等.土壤可蚀性因子的研究 [J]. 水土保持学报, 1995,9(1):19-24.
- [22] 林素兰,黄 毅,聂振刚,等.辽北低山丘陵区坡耕地土壤流失方程的建立 [J]. 土壤通报, 1997,28(6):251-253.
- [23] 蒋定生,李新华,范兴科,等.论晋陕蒙接壤地区土壤的抗冲性与水土保持措施体系的配置 [J]. 水土保持学报, 1995,9(1):1-7.
- [24] Wischmeier W H, Johnon C B, Cross B V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction cites [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1971,26(5):189-193.
- [25] 江忠善,李秀英.黄土高原土壤侵蚀流失预报方程中降雨侵蚀力和地形因子的研究 [J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988 年第 7 集,40-45.
- [26] 王万忠,焦菊英.中国的土壤侵蚀因子定量评价研究 [J]. 水土保持通报, 1996,16(5):1-20.
- [27] 白可喻,戎郁萍,杨云卉,等.北方农牧交错带草地生物多样性与草地生产力和土壤状况的关系 [J]. 生态学杂志, 2013,32(1):22-26.
- [28] 王庆锁,冯宗炜,罗菊春.河北北部、内蒙古东部森林—草原交错带生物多样性研究 [J]. 植物生态学报, 2000,24(2):141-146.
- [29] 胡云锋,艳 燕,阿拉腾图雅,等.内蒙古东北—西南草地带植物多样性变化 [J]. 资源科学, 2012,34(6):1024-1031.
- [30] 马文静,张 庆,牛建明,等.物种多样性和功能群多样性与生态系统生产力的关系—以内蒙古短花针茅草原为例 [J]. 植物生态学报, 2013,37(7):620-630.
- [31] 殷 贺,李正国,王仰麟,等.基于时间序列植被特征的内蒙古荒漠化评价 [J]. 地理学报, 2011,66(5):653-661.
- [32] 汤小华,王春菊.福建省土壤侵蚀敏感性评价 [J]. 福建师范大学学报:自然科学版, 2006,22(4):1-4.

**作者简介:** 刘军会(1976-),男,河北保定人,副研究员,博士,主要从事区域生态学研究.发表论文 20 余篇.