

# 中国土地资源生态敏感性评价与空间格局分析

魏婵娟 蒙吉军<sup>†</sup>

北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871;

<sup>†</sup> 通信作者, E-mail: jijunm@pku.edu.cn

**摘要** 基于资源环境基础数据库, 构建土地生态敏感性评价指标体系, 进行中国土地资源生态敏感性评价, 揭示土地生态敏感性的空间分布特点, 进而对不同土地资源和不同农业区土地资源的生态敏感性进行差异分析, 得到如下结果。1) 中国土地资源生态敏感性空间差异显著, 高度生态敏感区集中在4个区域: 北方干旱/半干旱沙漠(地)的土地沙化敏感区、黄土高原土壤侵蚀敏感区、南方低山丘陵土壤侵蚀敏感区以及西南喀斯特地区的石漠化-土壤侵蚀双重敏感区。2) 耕地、林地和草地的生态敏感性差异显著, 耕地的敏感性整体上较低, 北方旱地高于南方水田; 林地的土壤侵蚀和石漠化敏感性较高, 以南方中西部疏林地、大兴安岭-长白山区为主; 草地的土地沙化敏感性较高, 以内蒙古中部、青藏高原中部和天山东段的中低覆盖草地为主。3) 九大农业区之间土地资源生态敏感性差异显著, 总体上呈现北方高、南方低的格局, 针对我国不同农业区的土地生态敏感性特点, 应实施不同的土地利用措施和生态保护策略。

**关键词** 土地资源; 生态敏感性; 空间格局; 农业区; 中国

## Ecological Sensitivity Assessment and Spatial Pattern Analysis of Land Resources in China

WEI Chanjuan, MENG Jijun<sup>†</sup>

Laboratory for Earth Surface Processes (MOE), College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871; <sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: jijunm@pku.edu.cn

**Abstract** Based on the basic database of resources and environment, an index system was constructed to evaluate the ecological sensitivity of land resources in China. We revealed its spatial distribution characteristics among different land use types and different agricultural areas. The main conclusions are as follows. 1) There are significant spatial differences in ecological sensitivity of land resources in China. Highly ecological sensitive areas are concentrated in four regions: the northern arid/semi-arid deserts with land desertification sensitivity, Loess Plateau with soil-erosion sensitivity, the southern hills with soil-erosion sensitivity, and the karst region in the southwest which is both sensitive to rocky desertification and soil erosion. 2) The ecological sensitivity of cultivated land, forests and grassland is significantly different. The sensitivity of cultivated land is lower than the others. Dry land in the north is more sensitive than paddy field in the south; forests are more sensitive to soil erosion and rocky desertification, mainly in the Greater Khingan Range-Changbai Mountains; grassland is highly sensitive to land desertification, mainly refers to the low-cover grassland in eastern Inner Mongolia. 3) The ecological sensitivity of land resources in the nine agricultural areas is generally high in the north and low in the south. According to the characteristics of land ecological sensitivity in different agricultural areas, various land use measures and ecological protection strategies should be implemented.

**Key words** land resources; ecological sensitivity; spatial patterns; agricultural zones; China

作为人类赖以生存的自然资源,土地资源是国家社会经济发展的重要基础,也是国家安全的重要保障。我国土地资源总量多但人均占有量少<sup>[1]</sup>,类型丰富但空间差异显著,后备土地资源数量有限且开发难度大。目前,我国面临的诸多生态环境问题均与土地资源的不合理利用有关<sup>[2-4]</sup>。尤其是改革开放以来,土地资源的过度开发和不合理利用,加剧了经济发展与生态保护之间的冲突,土壤侵蚀、土地沙化和石漠化等生态环境问题日益凸显<sup>[5-6]</sup>。随着中国城市化进程的进一步推进,未来很长时间内社会经济发展对土地资源的需求还将持续上升<sup>[7]</sup>。近年来,随着人们对生态安全和生态文明建设的高度重视,围绕着调整土地资源利用方式、保护生态环境和贯彻可持续发展战略,土地资源的生态敏感性已成为政府和科学界关注的热点<sup>[8-9]</sup>。

土地资源生态敏感性指土地生态系统对人类活动干扰和自然环境变化的响应程度,可以表征发生生态失衡和生态环境问题的难易程度或可能性大小<sup>[10]</sup>。近年来,相关研究集中在敏感性机制分析和生态过程敏感性评价两个方面<sup>[11]</sup>。评价方法有替代法<sup>[12-13]</sup>、模型法<sup>[14-15]</sup>和因子叠加法<sup>[16]</sup>等。其中,替代法将敏感性定义为土地系统随影响因素变化而产生响应的程度<sup>[17]</sup>,一般用研究对象变化率与因素变化率的比值来表征<sup>[12]</sup>,该方法只针对特定问题或单一敏感性,不具有普适性。模型法,如李双成等<sup>[14]</sup>构建多层感知器网络模型,对生态系统响应气候变化的敏感性进行评价,但模型法的不确定性和高精度要求限制了对敏感性状况反映的准确性及其在大中尺度区域研究的应用。GIS技术的快速发展使得生态敏感性研究对象逐渐从单一敏感性<sup>[11]</sup>扩展为区域综合敏感性<sup>[11]</sup>,因子叠加法成为主流方法<sup>[16]</sup>。在国内,基于《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价技术指南(试行)》(2020),众多研究者针对土壤侵蚀<sup>[18]</sup>、荒漠化<sup>[19]</sup>、盐渍化<sup>[20]</sup>和石漠化<sup>[21]</sup>等生态环境问题,在地区、城市和流域等尺度上开展单项敏感性或综合敏感性评价<sup>[11,22-23]</sup>,研究趋势逐渐从静态向时空动态演变转化<sup>[24-25]</sup>。在国外,基于地中海沿岸土地荒漠化评价创立的MEDALUS方法<sup>[26]</sup>为欧洲生态敏感性评价提供参考,该方法从气候质量指数、土壤质量指数、植被质量指数和土地管理质量指数4个方面选取对应的指标进行综合评价。目前,MEDALUS方法的适用范围已逐渐从土地荒漠化扩展到其他土地退化的

敏感性问题<sup>[27-29]</sup>。

近年来,我国高度重视自然资源生态敏感性的研究<sup>[30-31]</sup>,在《全国功能分区技术规范》(2014)、《全国生态功能区划》(2015)、《生态保护红线划定指南》(2017)和《资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价技术指南(试行)》(2020)(简称“双评价”指南)中,明确了识别生态敏感性的方法及其在相关资源环境领域工作中的意义。已有的生态敏感性研究以地区、市和省级尺度居多<sup>[20-22]</sup>,全国尺度的研究因所需数据量大且问题复杂而相对较少,尤其对不同生态问题的敏感性组合和不同土地资源类型的生态敏感性关注不多。此外,大多数研究以生态敏感性为基础,开展生态功能分区、生态红线划分和生态安全格局构建<sup>[32-34]</sup>,忽略了在区划基础上对不同区域生态敏感性的差异分析。基于上述背景,本研究通过构建土地资源的生态敏感性评价模型,诊断土地资源利用面临的生态环境问题,识别中国土地资源生态敏感性的区域差异和空间格局,为土地资源可持续利用和国土空间规划提供理论与数据支持。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据来源与处理

本文所用数据及说明见表1。数据处理工具主要为ArcGIS 10.5,栅格数据统一重采样到500 m×500 m的分辨率。

### 1.2 研究方法

本文从我国土地资源普遍面临的土壤侵蚀、土地沙化和石漠化3个方面展开中国土地资源生态敏感性评价,并对不同土地资源类型和不同农业区土地资源的生态敏感性进行空间差异分析。

#### 1.2.1 土地资源生态敏感性评价指标体系

本文以技术指南<sup>[30]</sup>和规范框架<sup>[31]</sup>为参考,结合现有的研究成果<sup>[35-39]</sup>,建立全国尺度的土地资源生态敏感性评价指标体系(表2)。

本文指标层的建立主要参考“双评价”指南<sup>[30]</sup>,并结合实际进行部分调整。1)土壤侵蚀敏感性评价方面,选取降雨侵蚀力、土壤质地类型、地形起伏度和植被类型作为评价指标。其中,降雨侵蚀力采用谢云等<sup>[35]</sup>基于1986—2015年降水资料计算得到的多年平均降雨侵蚀力栅格数据;通过对照HSWD数据集集中的颗粒组成与中国土壤质地分类标准(1985)<sup>[36]</sup>,进行土壤质地分级;地形起伏度以5

表 1 数据来源及说明  
Table 1 Data sources and description

数据类型	数据产品	来源	空间分辨率
风速	中国地面气候资料日值数据集(2010—2017)	中国气象数据网	站点数据
降水量	中国逐年年降水量空间插值数据集(1980—2015)	中科院资源环境数据云平台	500 m
降雨侵蚀力	中国多年平均降雨侵蚀力数据(1986—2015)	国家地球系统科学数据中心	250 m
湿润指数	中国气象背景数据集	中科院资源环境数据云平台	500 m
植被类型	《1:100 万中国植被图》	中科院资源环境数据云平台	1:100 万
NDVI	MOD13Q1 数据产品(2010—2019)	美国国家航空航天局	250 m
土壤质地	基于 HWSO 的中国土壤数据集(2009)	国家冰川冻土沙漠科学数据中心	1:100 万
岩溶地质	《中国岩溶水文地质图》	地下水资源信息服务网	1:400 万
DEM	分省 DEM 数据(SRTM)	中科院资源环境数据云平台	90 m
土地利用	中国土地利用数据(2018)	中科院资源环境数据云平台	500 m
农业区划	中国综合农业区划(1981)	国家地球系统科学数据中心	—

表 2 土地资源生态敏感性评价指标体系  
Table 2 Evaluation index system of land resources ecological sensitivity

准则层	指标层	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极度敏感
土壤侵蚀	降雨侵蚀力	<1000	1000~4000	4000~6500	6500~10000	>10000
	土壤质地类型	I	II	III	IV	V
	地形起伏度/m	<20	20~50	50~100	100~300	>300
	植被类型	I	II	III	IV	V
土地沙化	湿润指数	>40	0~40	-30~0	-60~-30	<-60
	起沙风天数	<3	3~5	5~10	10~15	>20
	土壤质地	基岩	粘质	砾质	壤质	沙质
	冬春季植被覆盖度/%	>70	50~70	30~50	15~30	<15
石漠化	岩性	I	II	III	IV	V
	坡度/(°)	<8	8~15	15~25	25~35	>35
	植被覆盖度/%	>70	50~70	30~50	15~30	<15
	多年平均降水量/mm	<400	400~800	800~1500	1500~2000	>2000
分级赋值	1	3	5	7	9	
分级标准	(1.0, 2.0]	(2.0, 4.0]	(4.0, 6.0]	(6.0, 8.0]	(8.0, 9.0]	

说明：土壤质地类型分为 I 石砾和沙，II 粗砂土、细砂土和黏土，III 面砂土和壤土，IV 砂壤土、粉黏土和壤黏土，V 砂粉土和粉土；植被类型分为 I 水体、草本沼泽和稻田，II 萌阔叶林、针叶林、草甸、灌丛和生矮林，III 稀疏灌木草原、一年二熟粮作和一年水旱两熟，IV 荒漠、一年一熟粮作，V 无植被；岩性类型分为 I 埋藏性可溶性岩、非可溶性岩和无碳酸盐岩，II 次不纯灰岩，III 次不纯灰岩，IV 白云岩，V 灰岩、灰岩和白云岩。

km×5 km 为提取单元<sup>[37]</sup>。2) 土地沙化敏感性评价方面，选取湿润指数、起沙风天数、土壤质地和植被覆盖度作为评价指标。根据风速监测站点数据，计算多年平均起沙风天数(冬、春季日平均风速>6 m/s 为起沙风天)<sup>[38]</sup>，通过克里金差值得到栅格数据；植被覆盖度由最大合成法获得的多年平均 NDVI 数据<sup>[40]</sup>计算得到。3) 石漠化敏感性评价中，增加“多年平均降水量”指标，采用“不同碳酸盐岩组合类型”代替“碳酸盐岩出露比例”作为岩性指标来区分不同碳酸盐岩类型的石漠化敏感性，根据肖荣波

等<sup>[39]</sup>的研究，将不同岩性组合的石漠化敏感性分为 5 类。评价过程中，首先根据是否有碳酸盐岩分布，将非碳酸盐岩区和埋藏型碳酸盐岩区划为不敏感区，然后再对裸露型碳酸盐岩区进行评价分级。数据标准化处理采用 ArcGIS 栅格计算器，利用自然断点法与经验知识相结合，将各指标分为不敏感、轻度敏感、中度敏感、高度敏感和极度敏感 5 个级别，分别赋值为 1, 3, 5, 7, 9。

### 1.2.2 土地资源生态敏感性指数

1) 单因子生态敏感性。根据“双评价”指南<sup>[30]</sup>

评价模型, 敏感性指数计算公式为

$$A_i = \sqrt[4]{a_{i1} \times a_{i2} \times a_{i3} \times a_{i4}} \quad (i = 1, 2, 3), \quad (1)$$

式中,  $A_i$  表示第  $i$  类敏感性指数,  $a_{i1} \sim a_{i4}$  分别为对应的评价指标。

2) 综合生态敏感性。由于不同生态问题均对土地资源生态敏感性产生影响, 本研究分别利用综合敏感性指数和敏感性组合, 对土地资源综合生态敏感性进行表征。

① 综合敏感性指数。为突出高敏感性生态问题对区域土地资源综合敏感性的影响, 根据“短板效应”原理, 采用极值法计算土地资源的综合敏感性指数( $I$ ):

$$I = \max(A_i). \quad (2)$$

根据综合敏感性指数, 按照等间距法将敏感性分为 5 级:  $[0, 2.0]$  为不敏感,  $(2.0, 4.0]$  为轻度敏感,  $(4.0, 6.0]$  为中度敏感,  $(6.0, 8.0]$  为高度敏感,  $>8.0$  为极度敏感。

② 敏感性组合。为进一步揭示区域土地资源敏感性的内在差异, 将敏感性归并为低(不敏感和轻度敏感)、中(中度敏感)、高(高度和极度敏感) 3 个等级, 按照土壤侵蚀、土地沙化和石漠化顺序进行组合, 共获得 4 类敏感性组合(图 1)。

### 1.2.3 基于农业区划的土地资源敏感性空间分析

《中国综合农业区划》(1981 年)<sup>[41]</sup> 将我国分为九大农业一级区(简称“农业区”): 东北区、内蒙古长城沿线区、甘新区、青藏区、黄土高原区、黄淮海区、西南区、长江中下游区和华南区。为揭示不同农业区土地资源生态敏感性的空间特征, 在 9 个农业区各生成 1000 个随机点, 利用 ArcGIS 中的

Extract values to points 工具提取每个点对应的生态敏感性指数和生态敏感性组合类型; 将 9 组随机点的数据导入 SPSS 软件, 进行 K-W 检验(Kruskal-Wallis test), 探究多个独立样本之间的差异性, 并分别给出各农业区生态敏感性指数和组合类型的成对比较结果。若  $p < 0.05$ , 说明两组数据分布之间的差异达到统计意义; 若  $p > 0.05$ , 说明两组数据分布没有显著性差别。

## 2 结果与分析

### 2.1 土地资源生态敏感性

1) 土壤侵蚀敏感性。中国土地资源土壤侵蚀以轻度敏感为主, 超过陆地面积的 50% (表 3)。总体来看, 土壤侵蚀敏感区主要分布于东部季风区, 受季节性降雨影响较大。全国敏感区大致分为 4 个区域: 东北山区、黄土高原区、南方红壤丘陵区和西南喀斯特地区(图 2(a))。其中, 东北山区以中度敏感为主, 大兴安岭-小兴安岭-长白山地区最为典型, 高敏感地区在山脉边缘呈带状分布; 黄土高原区以高度敏感为主, 集中在甘肃省东南部和陕西省北部; 南方丘陵区的中、高度敏感区相间分布, 华南地区极度敏感区零星分布, 以秦巴山地、两广丘陵、浙闽丘陵和黄山地区为主; 西南喀斯特地区的敏感区主要位于川西横断山区、云贵高原的东部和南部。这些敏感区地势起伏较大, 降水丰沛, 植被以稀疏灌木和草原为主, 受季节性暴雨的影响, 自然侵蚀较为频繁。同时, 由于毁林开垦、陡坡耕作等过度土地开发利用活动, 造成林草退化, 加快了自然侵蚀的过程。

2) 土地沙化敏感性。中国土地资源沙化以轻度敏感(43.28%)为主, 主要分布在北方地区。高度

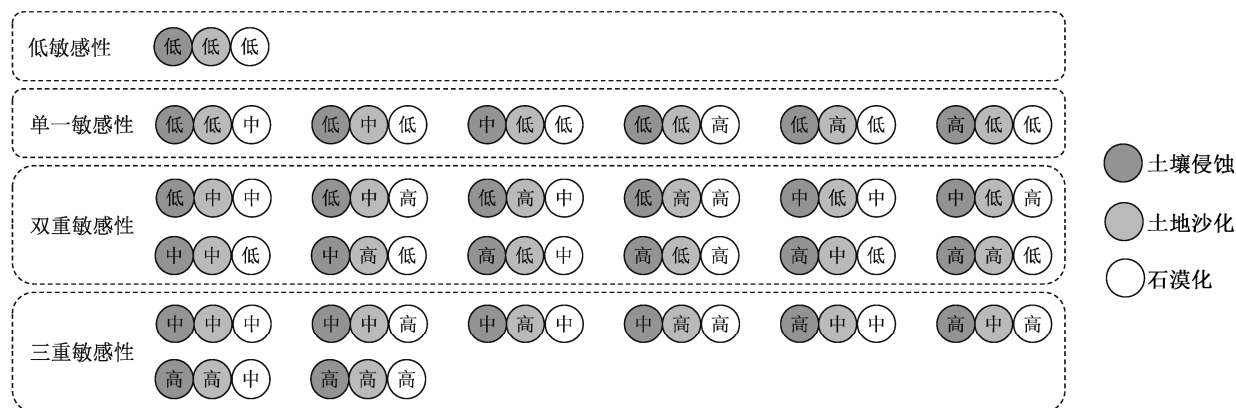


图 1 土地资源生态敏感性组合  
Fig. 1 Ecological sensitivity combination of land resources

表 3 中国土地资源生态敏感性结构  
Table 3 Ecological sensitivity structure of land resources in China

敏感性等级	土壤侵蚀敏感性		土地沙化敏感性		石漠化敏感性		综合敏感性	
	面积/10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	比例/%	面积/10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	比例/%	面积/10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	比例/%	面积/10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	比例/%
不敏感	57.3803	5.9771	123.2274	12.8362	899.6726	93.7159	1.3544	0.1411
轻度敏感	588.8218	61.3356	415.4499	43.2760	15.4982	1.6144	294.9511	30.7241
中度敏感	201.7555	21.0162	266.2551	27.7349	24.9350	2.5974	384.4838	40.0504
高度敏感	109.7131	11.4284	143.9847	14.9984	18.6106	1.9386	264.5321	27.5554
极度敏感	2.3294	0.2426	11.0830	1.1545	1.28350	0.1337	14.6785	1.5290

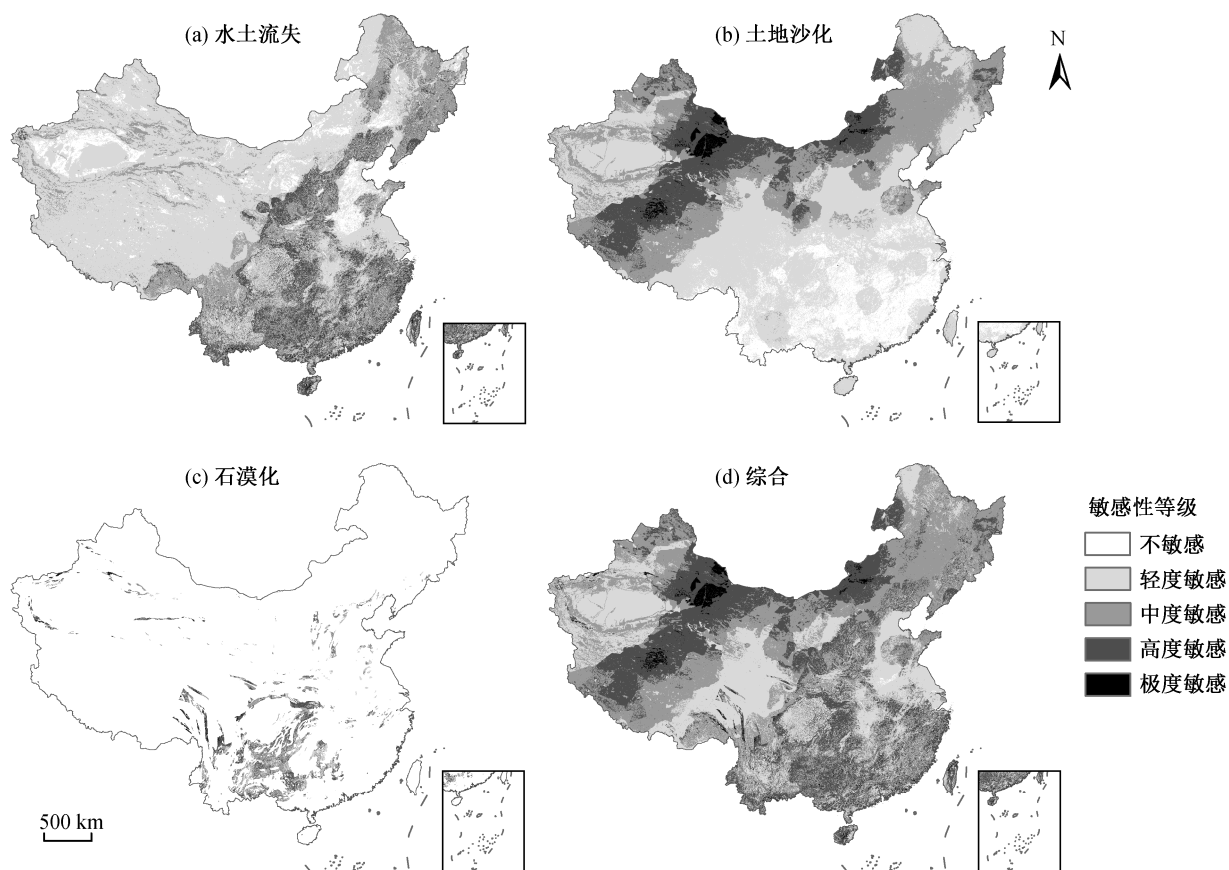


图 2 中国土地资源生态敏感性空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of ecological sensitivity of land resources in China

和高度敏感区集中在三大强风区：新疆、内蒙古和甘肃交界的戈壁、藏北高原和内蒙古中部沙地，这些区域为砂质土壤，降水稀少，植被覆盖度差，大风吹蚀下极易退化为荒漠景观。此外，高敏感区在准噶尔盆地、黄土高原和三江平原也有少量分布，中度敏感区以西北和内蒙古的沙漠(地)为主，包括古尔班通古特沙漠及其北部、库姆塔格沙漠、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、库布齐沙漠与乌兰布和沙漠

的交界、浑善达克沙地以及呼伦贝尔草原西部等。干旱沙漠气候条件下植物发育较差，大风吹蚀对植被的破坏作用十分强烈，常常形成固定、半固定沙丘，土地沙化的潜在风险大。

3) 石漠化敏感性。中国大部分地区属于非碳酸盐岩或埋藏型碳酸盐岩区，为石漠化不敏感区。石漠化敏感区主要分布在西南地区(图 2(c))，包括四川、云南、贵州、广西、湖南、湖北和重庆。敏感性分布以中度敏感为主(2.6%)，中度敏感区呈片状分布，集中在云贵高原东部(贵州省、云南省东部)，且在燕山-太行山、吕梁山、岷山、秦岭南北缘呈

带状分布, 这些区域以白云岩、灰岩-白云岩或不纯、次纯碳酸盐岩为主, 且地势较高, 多为山区。高度和极度敏感区大多呈点状分布在中度敏感区内, 在云贵高原北部、广西中北部集中分布, 在横断山区和秦巴山地呈带状分布。这些地区为纯灰岩分布区, 基岩裸露, 地势陡峭, 雨量充沛, 为石漠化的形成提供了充足的条件。此外, 天山、昆仑山和祁连山区也因地势起伏大, 有少量次纯碳酸盐岩分布, 也呈现一定的石漠化敏感性, 但由于西北地区降水量较少, 石漠化的风险较低。

4) 土地综合敏感性。基于极值法获得中国土地资源综合生态敏感性(图 2(d)和表 3)。可以看出, 土地资源生态敏感性空间差异显著, 以中度敏感为主(40.05%), 轻度敏感(30.72%)和高度敏感(27.56%)次之, 不敏感和极度敏感占比很小, 总和不足 2%。总体来看, 我国土地资源高度生态敏感区集中在 4 个区域: 北方干旱与半干旱沙漠(地)的土地沙化敏感区、黄土高原土壤侵蚀敏感区、南方低山丘陵土壤侵蚀敏感区以及西南喀斯特地区的石漠化-土壤侵蚀双重敏感区。中度敏感区相对集中于北方地区, 如东北地区、山东半岛、准噶尔盆地和塔里木盆地外缘, 在南方地区则零星分布。轻度敏感区分布在青藏高原东部、黄淮海平原东部、长江中下游平原北部、四川盆地、准噶尔盆地、塔里木盆地、大兴安岭北部和鄂尔多斯高原。

中国土地资源敏感性组合类型和空间分布见图 3。首先, 低敏感性土地资源面积占 30.81%, 说明我国有 1/3 的土地资源三类敏感性均为不敏感或轻度敏感。其次, 单一敏感性所占面积最大(57.36%),

说明我国一半以上土地资源至少面临一种敏感性问题, 且北方土地沙化主导的敏感区面积略大于南方土壤侵蚀主导的敏感区面积。第三, 双重敏感性面积约占 11.61%, 主要包括: ①“中中低”型, 涉及大兴安岭、三江平原、燕山地区、山东半岛、天山西段和昆仑山西段等地区, 这些地区土壤侵蚀和土地沙化敏感性均为中度敏感; ②“中高低”型, 涉及天山东段、昆仑山东段和祁连山等地区, 这些地区存在普遍的土壤侵蚀中度敏感和较高的土地沙化敏感性; ③“高中低”型, 涉及黄土高原的东北部、西南部和燕山北麓地区, 这些地区存在土地沙化中度敏感和较高的土壤侵蚀敏感性; ④“中低中”型, 涉及横断山区南部、云贵高原和四川盆地边缘, 这些地区同时存在土壤侵蚀和石漠化中度敏感性; ⑤“高低中”型, 主要涉及云贵高原地区, 兼具土壤侵蚀高敏感性和石漠化中敏感性。由于面临双重生态环境问题的影响, 土地资源开发利用尤其需要关注。最后, 三重敏感区仅占 0.22%, 主要位于我国北方山脉地区, 如天山、昆仑山和太行山等地。

## 2.2 主要地类生态敏感性

1) 耕地的生态敏感性。我国耕地综合生态敏感性相对较低(图 4(d)), 这与耕地分布在地势低平、水热条件较好、土壤肥力较高的平原地区有关。图 5(a)~(c)显示, 华北平原和长江中下游平原属于不敏感区或低敏感区, 东北平原属于中度敏感区。耕地的土壤侵蚀敏感区呈零星点状分布在北方旱地和南方水田, 在黄土高原相对集中; 土地沙化敏感区集中在北方, 位于黄土高原西南部、阴山和三江平原。

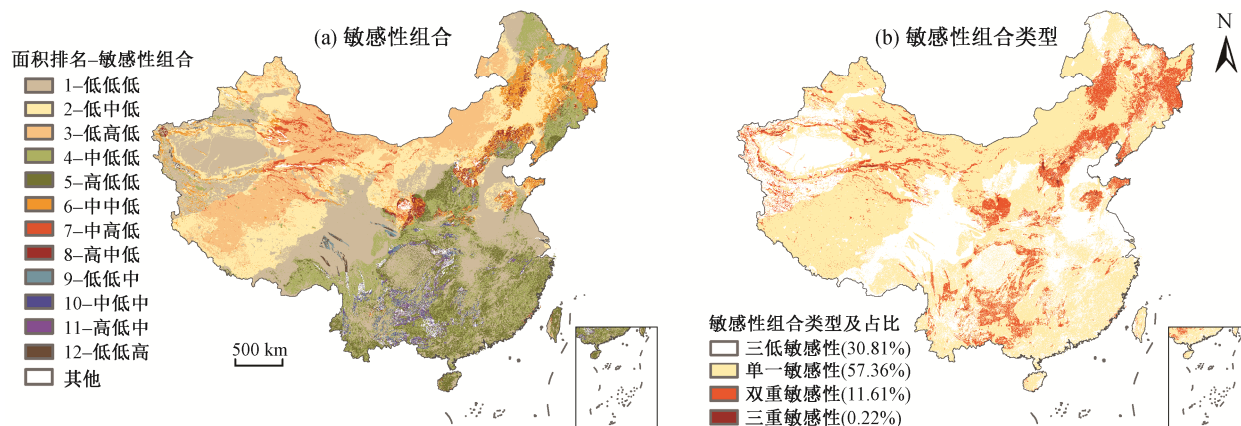


图 3 中国土壤侵蚀、土地沙化和石漠化敏感性组合空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the combination of soil erosion, land desertification and rocky desertification sensitivity of land resources in China

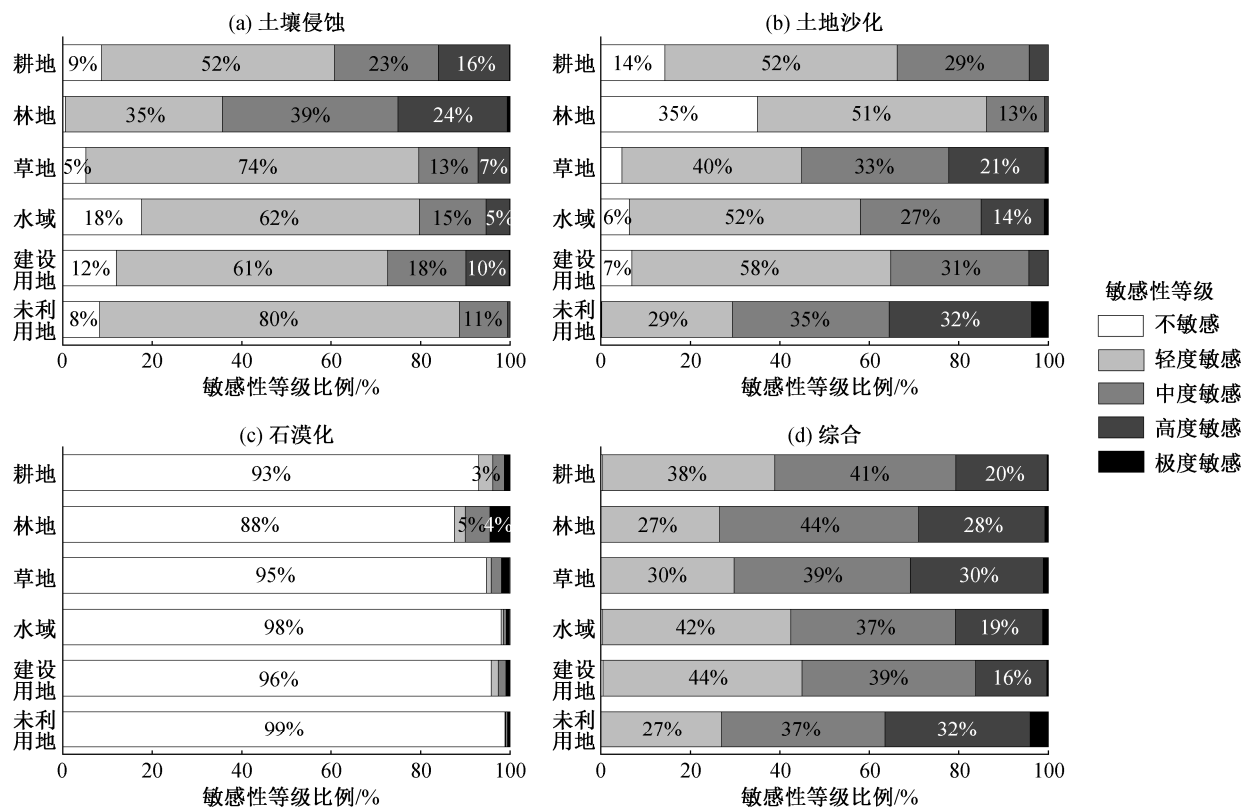


图 4 中国不同土地资源利用类型生态敏感性占比  
Fig. 4 Ecological sensitivity structure of different land use in China

2) 林地的生态敏感性。林地敏感性以土壤侵蚀和石漠化为主(图 4(a)和(c))。图 5(d)和(f)显示,高敏感区主要分布在南方丘陵土壤侵蚀敏感区、大兴安岭-长白山土壤侵蚀敏感区和西南喀斯特石漠化敏感区。南方林地中,中西部的灌木林和疏林地敏感性较高,如云贵高原、大巴山、巫山和大别山等,这些地区大多为山区,地势高,雨量大,降雨侵蚀力较强。

3) 草地的生态敏感性。草地的土地沙化敏感性较高(图 4(b))。高敏感区集中在内蒙古中部、青藏高原中部和天山东段的中低覆盖草地(图 5(h)),这些区域大风日数多,植被覆盖度较低,极易受到风蚀。阿尔泰山和呼伦贝尔大草原的高覆盖草地也面临较高的土地沙化敏感性。以低覆盖草地为主的天山西段、青藏高原东缘以及大兴安岭南段生态敏感性相对较低。此外,黄土高原北部的低覆盖草地还面临土壤侵蚀的风险。

从整体上看,耕地、林地和草地的综合生态敏感性均以中度为主;水域和建设用地的生态敏感性较低,以不敏感和轻度敏感为主;未利用地的生态

敏感性以中度和高度为主,主要位于西北区和青藏高原区的荒漠、苔原、冰雪覆盖和其他裸地,存在不同程度的土地沙化和土壤侵蚀潜在风险。

### 2.3 农业区土地资源生态敏感性差异

根据 K-W 检验结果(图 6(b)),在 95%的置信区间,9 个农业区的土地资源生态敏感性具有显著差异( $p < 0.01$ )。土地资源综合敏感性从高到低排序为内蒙古及长城沿线区>甘新区>青藏区>黄土高原区>东北区>华南区>长江中下游区>西南区>黄淮海区。除东北区敏感性较低外,从北到南,敏感性有先下降后略微上升的趋势,内蒙古及长城沿线区、甘新等北方干旱区敏感性最高,其次为青藏区和黄土高原区,黄淮海区敏感性最低,再往南到长江中下游区、西南区和华南区,敏感性再次增加。

根据生态敏感性指数成对比较显著性检验结果(图 6(c)),大多农业区两两之间具有显著差异。除东北区外,北方农业区和南方农业区两两之间均具有显著差异。无显著差异的地区主要为南方农业区内部、北方农业区内部或与青藏区之间,如黄土高原区和青藏区、西南区和长江中下游区,这些区域

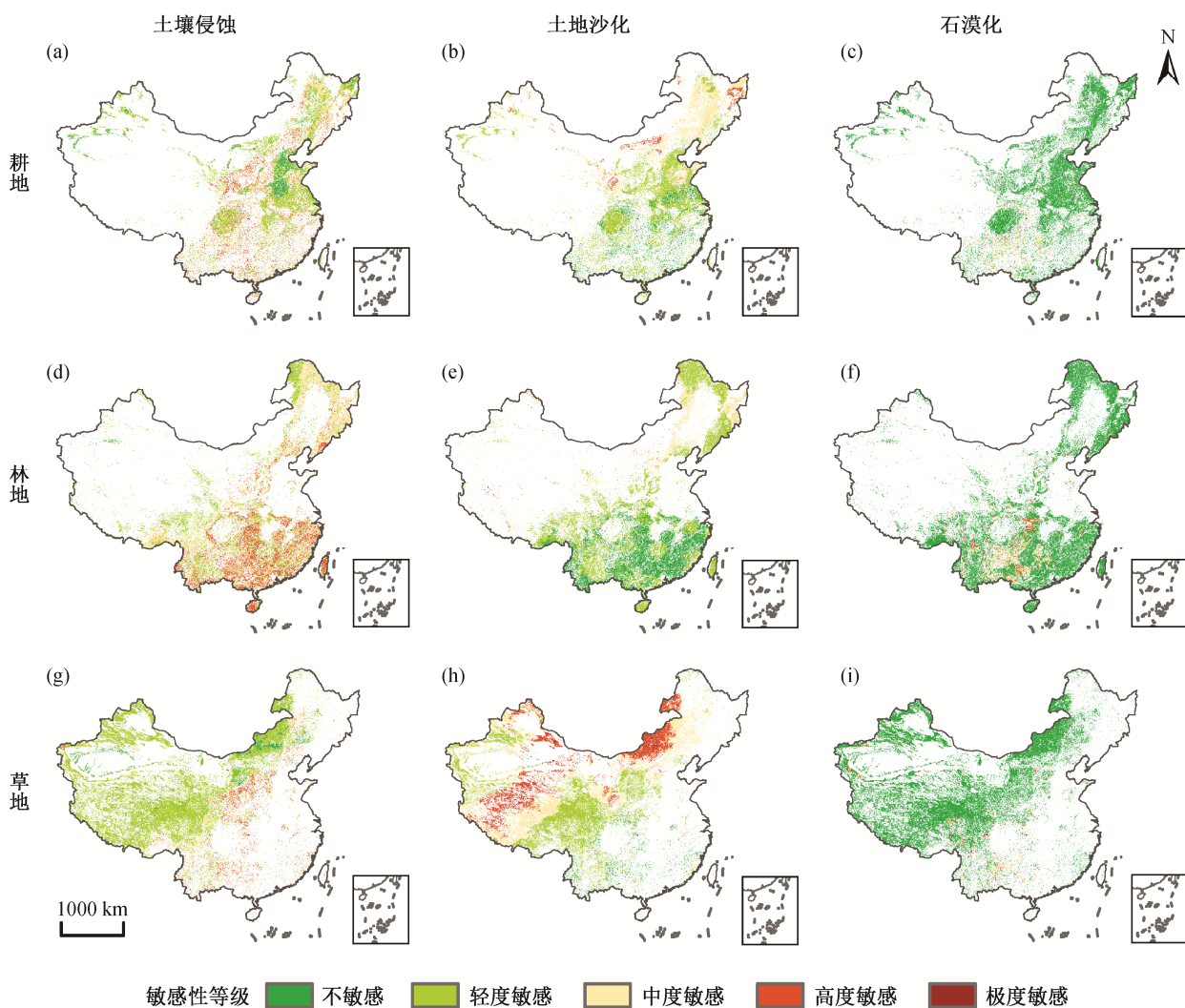


图 5 中国耕地((a)~(c))、林地((d)~(f))和草地((g)~(i))生态敏感性分布

Fig. 5 Spatial distribution of ecological sensitivity of cultivated land ((a)~(c)), forest ((d)~(f)) and grassland ((g)~(i)) in China

两两位于同纬度范围, 自然条件相近, 敏感性指数差异不大, 但仍能从极差看出差异, 如黄土高原的生态敏感性均值与青藏高原无显著差异, 但其极差小, 区域异质性低, 而青藏高原面积广阔, 区域异质性较高, 生态敏感性在较大范围内波动, 主要体现在中部、北部和东南缘部敏感性较高, 而东部敏感性较低。这说明, 我国土地资源生态敏感性指数的空间分布整体上受到自然地带性的控制。

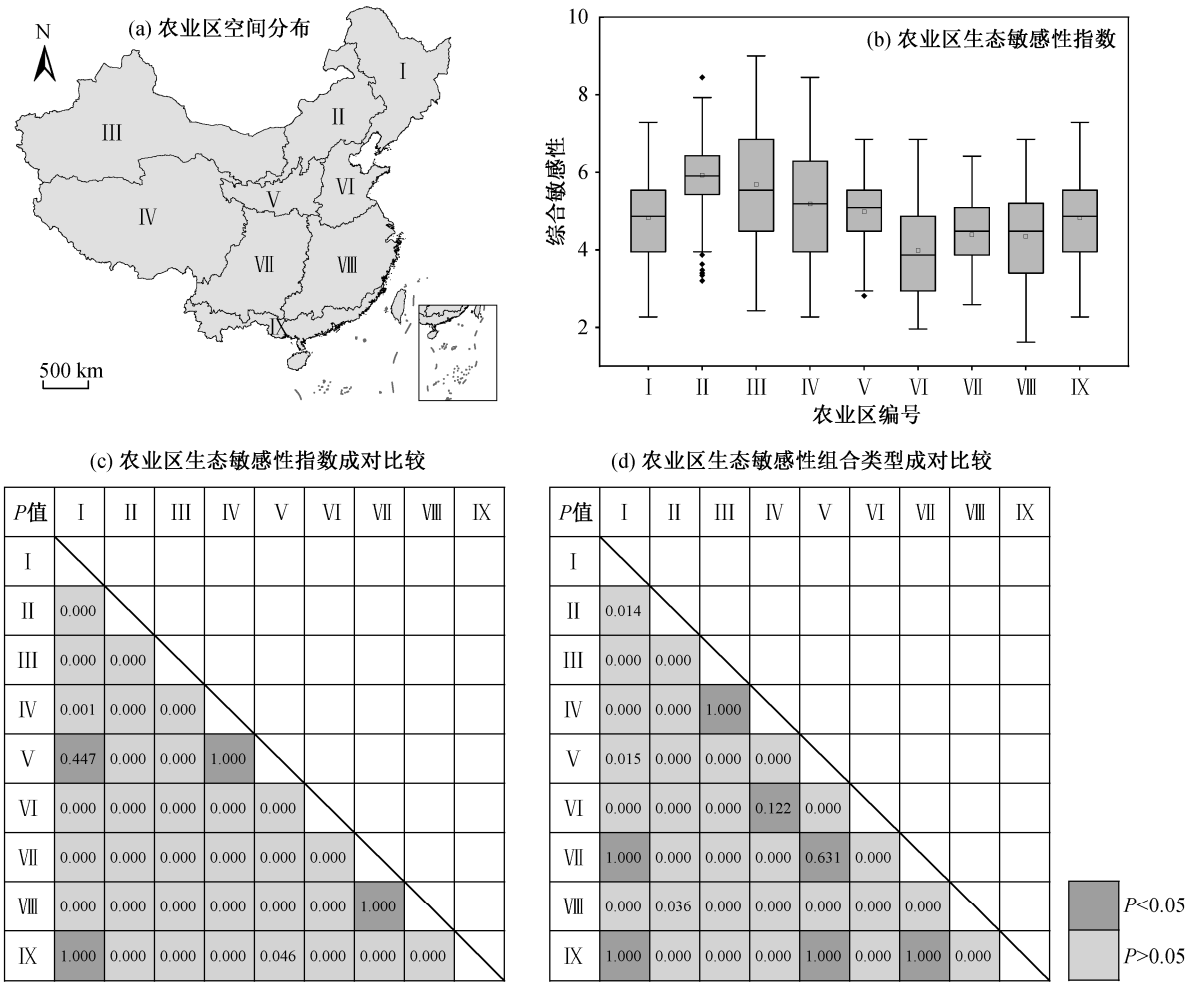
结合生态敏感性组合类型成对比较结果(图 6(d))发现, 生态敏感性指数和敏感性组合的空间分异不完全一致。一方面, 虽然部分地区生态敏感性指数差异显著, 但其敏感性组合无显著差异。如甘新区和青藏区, 这两个农业区均为土地沙化敏感区, 但敏感程度不同, 且甘新区敏感性更高, 类似的结

果还存在于青藏区与黄淮海区(均以低敏感区为主)、黄土高原区和西南区(以土壤侵蚀为主)。另一方面, 虽然少数地区生态敏感性指数无显著差异, 但其敏感性组合差异显著, 如西南区和长江中下游区, 二者的敏感性整体较低, 但西南区的石漠化更为严重。这说明, 生态敏感性在自然带控制整体分布格局的基础上, 由于地形坡度等因素表现为局部地区的不同敏感性组合。这也揭示了单用敏感性的均值或最大值来衡量区域敏感性的缺陷, 明确各区不同敏感性组合显得十分必要。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

我国土地资源生态敏感性空间分异显著。1)



I 东北区, II 内蒙古及长城沿线区, III 甘新区, IV 青藏区, V 黄土高原区, VI 黄淮海区, VII 西南区, VIII 长江中下游区, IX 华南区

图 6 中国农业区分布及各区土地资源生态敏感性比较

Fig. 6 Distribution of China's agricultural areas and the comparison of ecological sensitivity of land resources

从不同的生态问题来看, 中国土地资源土壤侵蚀和石漠化敏感性呈现低敏感区集中连片分布、高敏感区点状零星分布的特点, 高敏感区分布在季风气候区。土地沙化敏感区连片分布在北方干旱与半干旱区的沙漠(地), 且在强风区敏感性更高。土地资源面临的生态问题的高敏感区空间分布呈重叠少、分散多的特点, 即各区域土地资源均存在不同程度、不同方向的退化风险, 少数地区土地资源面临多重敏感性, 如黄土高原、大兴安岭和燕山-太行山等。

2) 从不同的土地资源来看, 中国耕地资源的生态敏感性整体较低, 北方高于南方, 且敏感区主要位于黄土高原西南部、阴山山麓和三江平原; 林地资源的生态敏感性以土壤侵蚀和石漠化为主, 敏感区主要分布在南方丘陵灌木林和疏林地和大兴安岭-长白山区的有林地; 草地资源的土地沙化敏感性较高,

敏感区集中分布在内蒙古中部、青藏高原中部和天山东段的中低覆盖草地。3) 从不同的农业区来看, 中国北方农业区土地资源生态敏感性整体上高于南方, 且各区差异显著。南北方之间的差异大于南北方内部差异, 各农业区面临不同的土地生态问题或具有相同土地生态问题的不同敏感性程度。

### 3.2 讨论

本文结果与高志强等<sup>[42]</sup>揭示的中国土地资源生态环境质量东南部较好、西北部较差的格局相符, 与欧阳志云等<sup>[10]</sup>提出的中国生态环境各敏感区面临的主要问题基本上一致, 与刘军会等<sup>[43]</sup>针对我国陆地生态系统的水土流失、土地沙化和石漠化敏感性评价结果大致相同, 说明我国生态环境敏感性的整体空间格局在时间上相对稳定, 但局部变化明显。与刘军会等<sup>[43]</sup>关于我国北方风沙区的识别结

果对比, 本文揭示了三江平原垦区的土地沙化潜在敏感性, 该地区春季大风日数较多的自然条件和过度垦荒等经济活动造成其较高的土地沙化敏感性; 生态敏感性识别的时效性还体现在, 鄂尔多斯高原及其南部的毛乌素沙地近年来实施的生态修复措施使得敏感性显著降低, 在本文结果中得到体现。王国强等<sup>[44]</sup>也对我国生态系统敏感性进行了评价, 他们更关注生态环境质量评价, 未针对土地资源的生态敏感性进行分类探讨, 且对石漠化敏感性识别的区分度不够高, 指标选取时未考虑碳酸盐岩出露比例或碳酸盐岩组类型, 因此西南地区几乎全部被识别为中度敏感性。本文通过可溶性岩组分类, 将我国西南喀斯特地区的石漠化敏感性做了分级。

已有的生态敏感性研究中, 多以景观或生态系统为研究对象<sup>[43]</sup>, 在分析多个生态环境问题的综合效应时, 多采用极值法或加权法<sup>[11,22]</sup>获得综合生态

敏感性指数, 忽略了不同生态环境问题的组合。本研究主要关注土地资源的生态敏感性, 通过改进生态敏感性评价指标体系和敏感性组合, 识别出我国不同土地资源生态敏感性重合区, 一方面为自然资源生态功能分区提供参考, 另一方面为指导不同区域不同土地资源采取差别性的管理措施提供依据。为探究不同农业区土地敏感性的主导因子<sup>[44]</sup>, 我们在每个农业区生成 1000 个随机点, 并利用 ARCGIS 的 Extract values to points 工具, 提取每个点对应的年降雨侵蚀力、坡度、植被覆盖、土壤质地、岩性和大风日数这 6 项指标值, 并进行极差标准化, 对比各区取值与全国均值, 用来识别各农业区土地资源敏感性的主导因子(图 7)。结果表明, 除黄淮海区敏感性较低外, 各农业区均至少有一个主导因子。降水量是普遍主导因子, 在北方影响土地沙化, 在南方影响土壤侵蚀和石漠化; 植被覆盖和大风日

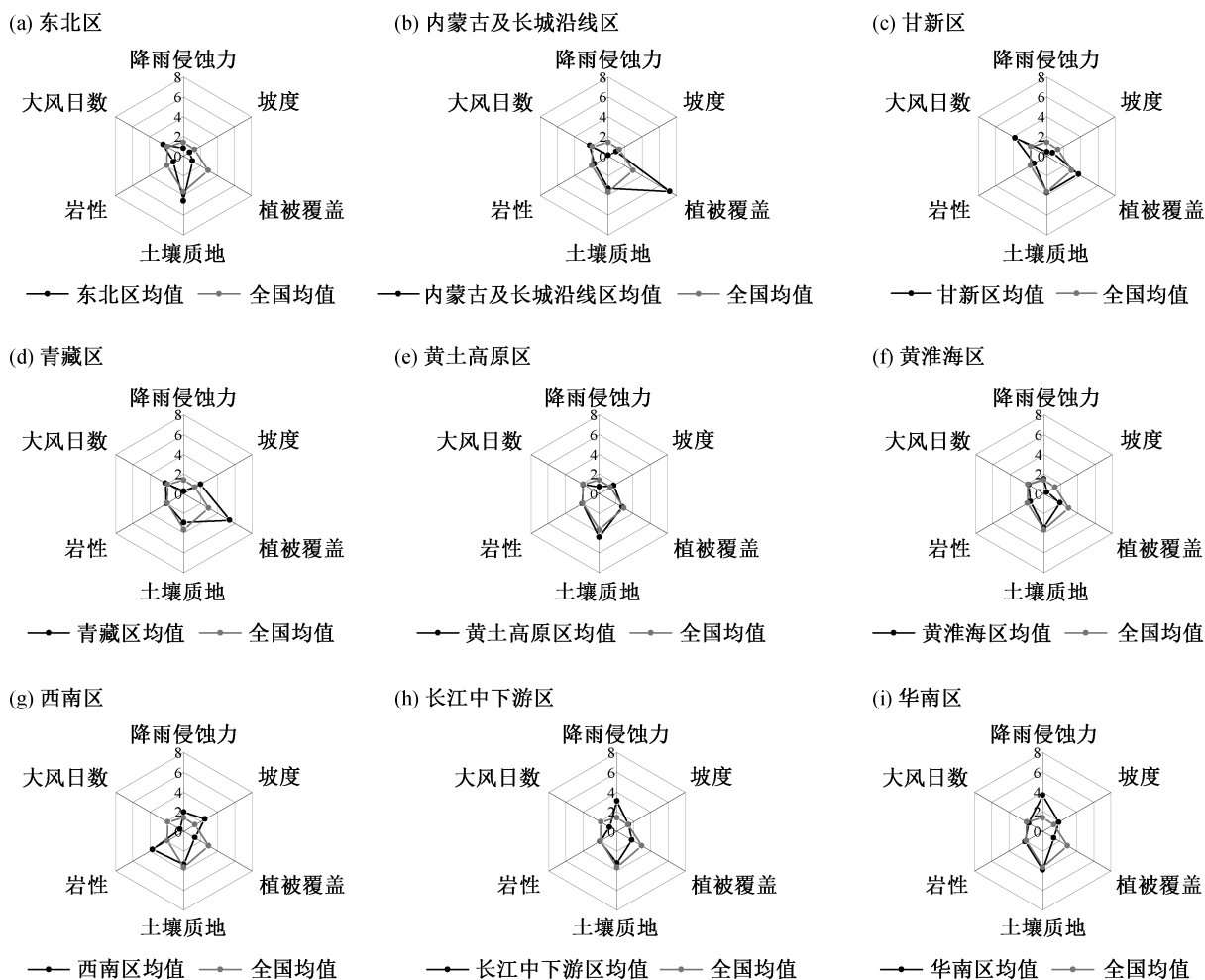


图 7 中国各农业区土地资源生态敏感性主导因子

Fig. 7 Influencing factors of ecological sensitivity of land resources in China's agricultural areas

数是北方土地敏感性的主导因子;土壤质地和岩性则是南方土地敏感性的主导因子;地形坡度是北方高原或南方丘陵农业区的主导因子。针对不同农业区的生态敏感性结果,结合其主导因子,国土空间开发和土地资源利用应采取相应的措施。例如,对于黄土高原区土壤侵蚀的防治,应从植被覆盖和地形坡度两方面考虑:一方面实施生态建设工程,通过林草工程建设,提高植被覆盖度;另一方面,实施等高耕作,对于坡度25°以上的地区,严格实施退耕还林还草措施。

尽管“双评价”指南中生态敏感性评价还存在诸多不完善之处,比如区域评价中存在由于评价指标和阈值等选取不科学,导致结果与实际不符等问题<sup>[45]</sup>。然而,全国范围的研究需要考虑普适性,“双评价”中明确的评价内容和指标体系仍是识别全国生态敏感性空间格局的首选参考。在全国生态敏感性评价的基础上识别重点地区,并结合当地实际情况调整指标和阈值,来展开区域敏感性评价,是国土空间规划的基本流程。未来,在进行自然资源生态敏感性评价时,应当重视耦合效应<sup>[45]</sup>,既包括不同资源的耦合(比如关注水土资源在空间上的组合对生态敏感性的影响),也包括人地耦合,在生态敏感性的动态监测中挖掘人类活动驱动因子,并通过广泛的公众参与,展开更切合实际的评价,实现资源环境与经济社会协同发展的目标。此外,随着景观可持续性科学理论逐渐成为土地可持续利用的重要理论基础<sup>[46]</sup>,今后的研究中可以结合景观生态,加强对景观破碎度和生物多样性较高区域的土地生态敏感性研究,深入探讨景观格局对生态敏感性的影响。

### 参考文献

- [1] 石玉林. 关于我国土地资源主要特点及其合理利用问题. 资源科学, 1980, 2(4): 1-10
- [2] 庄立, 刘洋, 梁进社. 论中国自然资源的稀缺性和渗透性. 地理研究, 2011, 30(8): 1351-1360
- [3] 张雷, 刘慧. 中国国家资源环境安全问题初探. 中国人口·资源与环境, 2002, 12(1): 43-48
- [4] Dai X, Li Z, Lin S, et al. Assessment and zoning of eco-environmental sensitivity for a typical developing province in China. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2012, 26(8): 1095-1107
- [5] 俞孔坚, 李海龙, 李迪华, 等. 国土尺度生态安全格局. 生态学报, 2009, 29(10): 5163-5175
- [6] 陈万旭, 李江风, 曾杰, 等. 中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理. 地理研究, 2019, 38(9): 2173-2187
- [7] 沈镭, 张红丽, 钟帅, 等. 新时代下中国自然资源安全的战略思考. 自然资源学报, 2018, 33(5): 721-734
- [8] 靳利飞, 刘天科, 周璞. 新形势下我国国土资源环境承载能力研究进展. 国土资源情报, 2018, 210(6): 18-23
- [9] 沈镭, 钟帅, 胡纾寒. 新时代中国自然资源研究的机遇与挑战. 自然资源学报, 2020, 35(8): 1773-1788
- [10] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究. 生态学报, 2000, 20(1): 10-13
- [11] 尤南山, 蒙吉军. 基于生态敏感性和生态系统服务的黑河中游生态功能区划与生态系统管理. 中国沙漠, 2017, 37(1): 186-197
- [12] Ding Z, Yao S. Theoretical analysis and model design of search for ecological conservation redlines based on the sensitivity assessment of ecosystem services. Land Use Policy, 2020, 97: 104745
- [13] 郭年冬, 陈召亚, 李恒哲, 等. 基于土地利用变化下的县域生态敏感性及其灰色预测——以河北省平山县为例. 水土保持研究, 2016, 23(5): 229-234
- [14] 李双成, 吴绍洪, 戴尔阜. 生态系统响应气候变化脆弱性的人工神经网络模型评价. 生态学报, 2005, 25(3): 621-626
- [15] 邱海军, 曹明明, 刘闻, 等. 基于三种不同模型的区域滑坡灾害敏感性评价及结果检验研究. 地理科学, 2014, 34(1): 110-115
- [16] Leman N, Ramli M F, Khirotidin R P K. GIS-based integrated evaluation of environmentally sensitive areas (ESAs) for land use planning in Langkawi, Malaysia. Ecological Indicators, 2016, 61: 293-308
- [17] 马育军, 黄贤金, 许妙苗, 等. 江苏省沿海滩涂开发的生态系统服务价值响应研究. 中国土地科学, 2006, 20(4): 28-34
- [18] Zhang R H, Liu X, Heathman G C, et al. Assessment of soil erosion sensitivity and analysis of sensitivity factors in the Tongbai-Dabie mountainous area of China. Catena, 2013, 101: 92-98
- [19] Xu D Y, You X G, Xia C L. Assessing the spatial-temporal pattern and evolution of areas sensitive to land desertification in North China. Ecological Indicators, 2019, 97: 150-158
- [20] 王宏, 塔西甫拉提·特依拜, 谢霞, 等. 新疆艾比湖地区不同土地利用类型的土壤盐渍化敏感性评价. 地理科学进展, 2011, 30(5): 593-599

- [21] 闫利会, 周忠发, 谢雅婷, 等. 贵州高原石漠化敏感性与宏观地貌的空间关联分析. 中国岩溶, 2018, 37(3): 400–407
- [22] 杜悦悦, 胡熠娜, 杨昉, 等. 基于生态重要性和敏感性的西南山地生态安全格局构建——以云南省大理白族自治州为例. 生态学报, 2017, 37(24): 8241–8253
- [23] 黄静, 崔胜辉, 李方一, 等. 厦门市土地利用变化下的生态敏感性. 生态学报, 2011, 31(24): 7441–7449
- [24] 徐玲玲, 延昊, 钱拴. 基于 MODIS-NDVI 的 2000—2018 年中国北方土地沙化敏感性时空变化. 自然资源学报, 2020, 35(4): 925–936
- [25] 魏伟, 周陶, 郭泽呈, 等. 基于遥感指数的干旱内陆河流域土地生态敏感性时空演变特征——以石羊河流域武威市为例. 生态学杂志, 2020, 39(9): 3068–3079
- [26] Kosmas C, Kirkby M, Geeson N. Manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification // European Commission. Energy, Environment and Sustainable Development (EUR 18882). Bruxelles, 1999: 87
- [27] Prăvălie R, Patriche C, Tişcovschi A, et al. Recent spatio-temporal changes of land sensitivity to degradation in Romania due to climate change and human activities: an approach based on multiple environmental quality indicators. Ecological Indicators, 2020, 118: 106755
- [28] Lee E J, Piao D, Song C, et al. Assessing environmentally sensitive land to desertification using MEDALUS method in Mongolia. Forest Science and Technology, 2019, 15(4): 210–220
- [29] Karamesouti M, Panagos P, Kosmas C. Model-based spatio-temporal analysis of land desertification risk in Greece. Catena, 2018, 167: 266–275
- [30] 自然资源部. 资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价技术指南(试行)[EB/OL]. (2020–01–19) [2020–04–18]. [http://gi.mnr.gov.cn/202001/t20200121\\_2498502.html](http://gi.mnr.gov.cn/202001/t20200121_2498502.html)
- [31] 中国环境科学研究院, 北京科技大学, 中国科学院大学, 等. 生态功能分区技术规范(征求意见稿)[EB/OL]. (2014–05–15) [2020–04–18]. [https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201405/t20140521\\_275396.htm](https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201405/t20140521_275396.htm)
- [32] Duan Y Q, Zhang L D, Fan X Y, et al. Smart city oriented ecological sensitivity assessment and service value computing based on Intelligent sensing data processing. Computer Communications, 2020, 160: 263–273
- [33] LIU Q Q, YU H. Functional zoning mode and management measures of Qianjiangyuan National Park based on ecological sensitivity evaluation. Journal of Resources and Ecology, 2020, 11(6): 617–623
- [34] Gao J B, Du F J, Zuo L Y, et al. Integrating ecosystem services and rocky desertification into identification of Karst ecological security pattern. Landscape Ecology, 2021, 36(7): 2113–2133
- [35] 谢云, 岳天雨, 刘宝元. 中国降雨侵蚀力因子 R 栅格数据集[DB/OL]. 北京师范大学地理科学学部地理数据与应用分析中心数字水土保持数据共享平台, 2018 [2020–04–18]. <http://www.geodata.cn>
- [36] 吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨. 土壤学报, 2019, 56(1): 227–241
- [37] 刘新华, 杨勤科, 汤国安. 中国地形起伏度的提取及在水土流失定量评价中的应用. 水土保持通报, 2001, 21(1): 57–59
- [38] 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. 科学通报, 1998, 43(15): 1663–1666
- [39] 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. 生态学杂志, 2005, 24(5): 551–554
- [40] Yang Y J, Song G, Lu S A. Study on the ecological protection redline (EPR) demarcation process and the ecosystem service value (ESV) of the EPR zone: a case study on the city of Qiqihaer in China. Ecological Indicators, 2020, 109: 105754
- [41] 陈佑启, 邹金秋. 中国农业资源区划数据集. 中国科学数据, 2018, 3(2): 22–31
- [42] 高志强, 刘纪远, 庄大方. 中国土地资源生态环境质量状况分析. 自然资源学报, 1999, 14(1): 94–97
- [43] 刘军会, 高吉喜, 马苏, 等. 中国生态环境敏感区评价. 自然资源学报, 2015, 30(10): 1607–1616
- [44] 王国强, 王红旗, 田雅楠. 中国生态安全格局构建与评价. 北京: 科学出版社, 2020: 66–72
- [45] 郝庆, 邓玲, 封志明. 面向国土空间规划的“双评价”: 抗解问题与有限理性. 自然资源学报, 2021, 36(3): 541–551
- [46] Xie H, Zhang Y, Zeng X, et al. Sustainable land use and management research: a scientometric review. Landscape Ecology, 2020, 35(11): 2381–2411