

DOI: 10.5846/stxb201501260200

巫丽芸, 何东进, 游巍斌, 邓西鹏, 谭勇, 纪志荣. 福建东山岛灾害生态风险的时空演化. 生态学报, 2016, 36(16): - .

Wu L Y, He D J, You W B, Deng X P, Tan Y, Ji Z R. Disaster ecological risk assessment in Dongshan Island I: spatio-temporal evolution. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(16): - .

## 福建东山岛灾害生态风险的时空演化

巫丽芸<sup>1</sup>, 何东进<sup>1,\*</sup>, 游巍斌<sup>1</sup>, 邓西鹏<sup>2</sup>, 谭勇<sup>1</sup>, 纪志荣<sup>1</sup>

1 福建农林大学林学院, 福州 350002

2 福建省地质测绘院, 福州 350011

**摘要:**将福建省东山岛作为灾害的承灾系统,以 1994 年、2003 年及 2011 年 3 期遥感影像为基础,选择暴雨和大风作为东山岛主要灾害,从承灾系统脆弱性、承灾系统应灾力、承灾系统恢复力三个方面选择指标构建东山岛灾害生态风险评估指标体系,分别获得东山岛 1994 年、2003 年和 2011 年 3 期暴雨和大风灾害生态风险图,结果表明:东山岛 1994、2003、2011 年暴雨和大风灾害生态风险格局均随时间出现明显变化;总体来看,东山岛西北部主要低山森林地带风险值较低,整体生态环境和抗灾能力较好,东北部城镇集中区和沿海地带风险值较高,生态环境质量和抗灾能力较低;东山岛 17a 来的人为干扰存在正负效应,长期生态建设使得东山岛西北部主要低山森林地带风险值下降,但大规模的城镇建设,旅游、养殖、房地产等对沿海地带的干扰,造成东北部城镇集中区及东部沿海地带风险值上升。

**关键词:**灾害;生态风险;景观结构;时空动态;东山岛

## Disaster ecological risk assessment in Dongshan Island I: spatio-temporal evolution

WU Liyun<sup>1</sup>, HE Dongjin<sup>1,\*</sup>, YOU Weibin<sup>1</sup>, DENG Xipeng<sup>2</sup>, TAN Yong<sup>1</sup>, JI Zhirong<sup>1</sup>

1 Forestry College, Fujian Agricultural and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2 Fujian Geologic Surveying and Mapping Institute, Fuzhou 350011, China

**Abstract:** The assessment of disaster ecological risk was investigated using remote sensing images of Dongshan Island in China, from 1994, 2003, and 2011. It selected rainstorm and gale as major disaster. Based on the characteristics of rainstorm and gale disasters and regional characteristics of Dongshan Island, it established ecological risk indices from disaster vulnerability, disaster bearing capacity and disaster restoring force. The results showed that the spatial pattern of rainstorm and gale disaster ecological risk appeared obvious change with time; overall, the risk value of low mountain area which is forested in the northwest of Dongshan Island was low, the risk values of northeastern area which is mainly towns and coastal area were high. It was found that human interference during the 17-year period has had both positive and negative effects. Long-term ecological construction in the low mountain area of northwestern Dongshan Island has made this area be forested and has reduced ecological vulnerability, and the overall ecological environment and anti-disaster capability in this area have improved. However, economic development in the form of tourism, aquaculture, and real estate, in conjunction with poor growth of the protective coastal forest, has increased the risk of town area and the coastal area of Dongshan Island. As a result, this paper thinks that this evaluation method not only determines the disaster-bearing capacity and anti-disaster capability of regional ecological systems, but also it can provide scientific advice to regional government departments on disaster management and prevention.

**基金项目:**国家自然科学基金项目(31200365, 31370624, 30870435);福建农林大学林学院青年科学资助项目(6112C039V)

**收稿日期:**2015-01-26; **修订日期:**2016-03-21

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fjhdj1009@126.com

**Key Words:** disaster; ecological risk; landscape structure; spatio-temporal dynamics; Dongshan Island

随着城市化的快速推进、高强度的人类活动和不合理的土地利用,使得区域生态环境面临巨大压力,而日益严重且类型众多的自然灾害又加剧了生态系统的风险,已构成了对生态安全的巨大威胁。对灾害过程和结果的追溯表明灾害对生态系统的威胁是显著的,生态风险与灾害的联系十分紧密。国际全球环境变化人文因素计划中全球环境变化与人类安全研究项目已明确指出自然灾害是影响人类安全的环境变化的主要因素之一<sup>[1]</sup>。目前,区域生态风险评价作为生态风险评价的一个分支,成为了现阶段研究的热点<sup>[2]</sup>。区域生态风险评价涉及的层面相当广泛,既有探讨个别产业对环境的影响,如旅游开发对生态系统的冲击<sup>[3]</sup>;也有综合探讨区域生态系统面临的风险<sup>[4]</sup>;既有从景观角度分析生态风险<sup>[5]</sup>,也有讨论土地利用动态对区域产生的影响<sup>[6]</sup>;既有针对湿地<sup>[7]</sup>、海岛<sup>[8]</sup>、流域<sup>[9]</sup>等特定区域,也有大量研究分析城市的风险<sup>[10-11]</sup>。然而,关于灾害视角下的生态风险研究则较为零散,并未形成普遍共识。无论是国外的还是国内的灾害风险评估,往往聚焦于人类社会的应急响应和社会经济系统的损失,而很少关注社会-生态系统的灾害响应,很少从景观尺度研究灾害对区域生态系统的影响,以及生态系统的时空变化对灾害的响应<sup>[12]</sup>。

海岛生态系统是不同于大陆的独特自然生态系统。它是一个多功能、多界面、多过程的典型的生态环境脆弱带<sup>[13]</sup>。东山岛是典型的海岛生态系统,生态结构相对简单,稳定性较差,受到灾害的扰动频率较高,频繁受到暴雨、大风等灾害的干扰,因此,本文以福建省东山岛为研究对象,从承灾系统脆弱性、承灾系统应灾力、承灾系统恢复力三个方面选择指标,评估东山岛灾害生态风险的时空变化规律,为东山岛生态安全防护及防灾减灾等提供基础研究和理论支撑。

## 1 研究区概况及数据准备

### 1.1 研究区概况

东山地理坐标为北纬 23°33′—23°47′,东经 117°17′—117°35′,位于福建省南部沿海、东海与南海交汇处,介于厦门与汕头两个经济特区之间。东临台湾海峡与台湾岛隔海相望,是大陆距台湾南部最近的县份,为全国第六、福建省第二大海岛。东山岛全境属丘陵地带,地势从东北向西南倾斜,海拔高度较小。气候属南亚热带海洋性季风气候,温暖舒适,光照充足,1 月份平均气温 13.1℃,7 月份平均气温 27.3℃,多年平均气温为 20.9℃,年平均降雨量 1224.9mm。

东山岛灾害频发。暴雨是东山常见的气象灾害,每年的 5—6 月份,副高北沿暖湿气流交汇形成的锋面雨是东山梅雨季节暴雨灾害诱发的主要原因,往往形成大暴雨和连续性暴雨,常常造成洪涝灾害和地质灾害。1983 年 6 月 19 日,由于受静止锋影响,带来有史以来罕见特大暴雨,该日雨量达 245.1mm,1—3h 降水量达 173.9mm,不少地方一片汪洋;2009 年 6 月 22 日 03 号热带风暴“莲花”所带来的暴雨造成东山直接经济损失 2.594 亿。大风是东山破坏性强、影响范围大的另一灾害性天气,在秋、冬、春三季中,因冷空气入侵,常引发 ≥ 8 级大风(风速 17.2m/s 以上),对海岸带环境有不同程度的危害。东山县年平均大风日数 108d,1958 年全年大风日数更高达 153d。

### 1.2 数据准备

为了研究东山岛灾害生态风险的动态变化,本文以 1994 年 TM 遥感影像(分辨率 30m)、2011 年和 2011 年 SPOT 遥感影像(分辨率 5m)作为基础数据,并收集了东山县行政区划图、东山 2010a 土地利用/覆盖图、1:50000 地形图、东山县土壤类型图等图件资料及东山暴雨、大风气象资料、相关社会经济统计资料、实地调研材料等。运用 ERDAS Imagine 进行遥感影像预处理、辐射纠正、几何精校正,并结合 ArcGIS 软件建立统一的投影坐标系,进行空间匹配。在充分考虑景观类型在影像上的可分性及东山岛区域特点基础上,通过监督分类与人机交互相结合方法分别提取三期影像的景观类型,将研究区景观类型划分为水域、林地、草地、耕地、

建设用地、道路、其他用地(包括未利用地、低覆盖地等)等 7 类,将三期景观分类图转化为 15m×15m 栅格形式(图 1)。

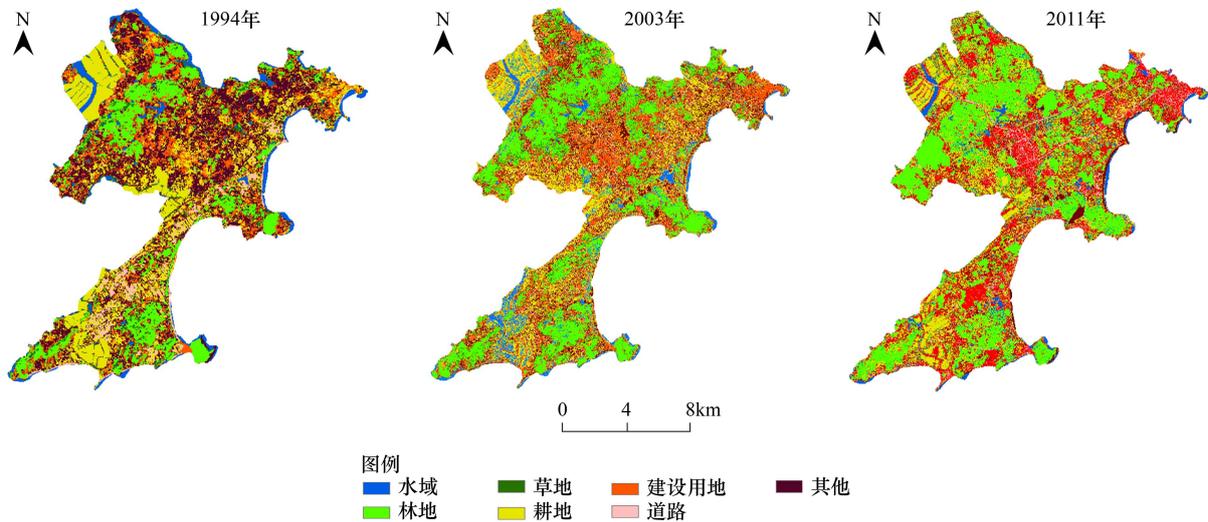


图 1 东山岛不同时期景观类型及其分布

Fig.1 Landscape types and distribution of Dongshan Island in different period

## 2 研究方法

### 2.1 评估指标体系的构建

生态系统在调节极端事件对人类系统影响方面扮演着重要角色<sup>[14]</sup>。景观的组成和空间结构直接影响区域生态系统功能<sup>[15]</sup>,被认为是研究人类活动对环境影响的适宜尺度<sup>[5]</sup>,因此,本研究以景观结构为基础将东山岛作为灾害的承灾系统。一般认为,灾害干扰下的生态风险主要评价三个方面,即系统减轻干扰的能力、系统吸收干扰的能力及系统快速恢复的能力<sup>[16-18]</sup>。因此,依据灾害发生的特点及东山岛区域特性,从承灾系统脆弱性、承灾系统应灾力、承灾系统恢复力三个方面构建东山岛灾害景观生态风险评估指标体系(图 2)。当评价暴雨灾害,选择景观干扰度指数和环境敏感性指数判断承灾系统的脆弱度;选择系统消纳力指数和景观连接度指数来反映灾害发生时承灾系统的防灾减灾能力;选择系统恢复力指数和人为恢复力指数来反映灾害发生后系统的恢复能力。当评价大风灾害,则选择景观干扰度指数、环境敏感性指数、土壤敏感度指数和土地利用敏感度指数判断承灾系统的脆弱度;选择景观连接度指数来反映灾害发生时承灾系统的防灾减灾能力;选择人为恢复力指数来反映灾害发生后系统的恢复能力。指标的具体方法如下:

### 2.2 评估指标测度

#### 2.2.1 景观干扰度指数

景观干扰度指数用来反映不同景观所代表的生态系统受到外部干扰的程度,区域所受干扰越大,生态风险越大。而不同景观类型所受外界干扰的大小可反映在其景观结构的变化上,因此,以景观破碎度  $C_i$ 、景观分离度  $N_i$  和面积周长分维度倒数  $D_i$  3 个景观结构指数(表 1),叠加构建景观干扰度指数<sup>[19-22]</sup>,计算公式如下:

$$S_i = aC_i + bN_i + cD_i$$

式中,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别表示  $C_i$ 、 $N_i$ 、 $D_i$  的权重。根据相关参考文献<sup>[19-22]</sup>及专家意见,将景观破碎度指数、景观分离度指数和面积周长分维度指数倒数的权重  $a$ 、 $b$  和  $c$  三个指标分别赋以 0.5、0.3 和 0.2 的权值。

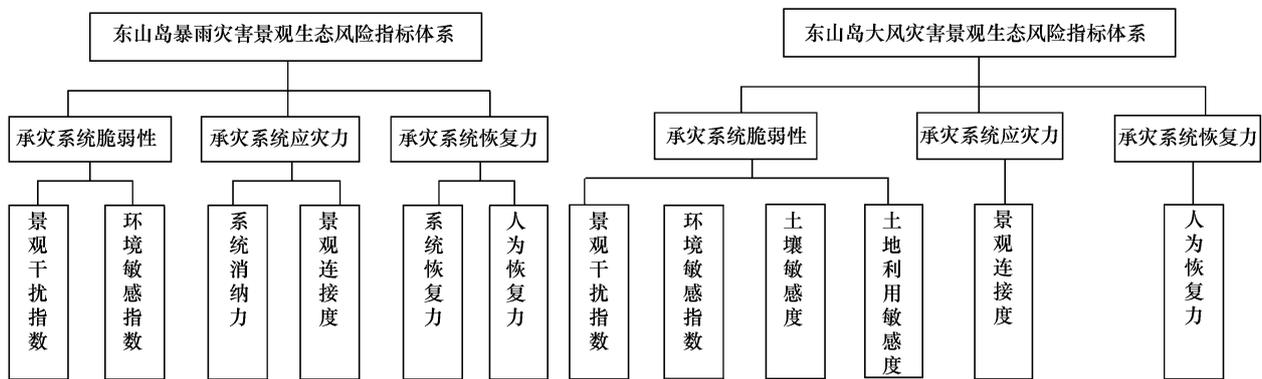


图2 东山岛灾害景观生态风险评估指标体系

Fig.2 Assessment index system for rainstorm disaster ecological risk of Dongshan Island

表1 景观格局指标<sup>[19]</sup>

Table 1 Indicators for landscape patterns<sup>[19]</sup>

指标 Index	表达式 Expression	生态意义 Ecological meaning
破碎度指数 Fragmentation index	$C_i = n_i/A$	表示景观被分割的破碎程度和空间结构的复杂性,其值用来表述整个景观或某一景观类型在给定时间和给定性质上的破碎化程度值越大,景观破碎程度越大,人为干扰作用越明显
分离度指数 Isolation index	$N_i = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{n_i}{A}} \times \frac{A}{A_i}$	表示某一景观类型中不同元素或斑块个体分布的分离度值越大,分离程度越大,表明景观在地域分布上越分散,景观分布越复杂,破碎化程度也越高
面积周长分维度 Perimeter-area fractal dimension	$G_i = \frac{2/[n_i \sum_{j=1}^n (\ln p_{ij} \times \ln a_{ij}) - (\sum_{j=1}^n \ln p_{ij})(\sum_{j=1}^n \ln a_{ij})]}{(n_i \sum_{j=1}^n \ln p_{ij}^2) - (\sum_{j=1}^n \ln p_{ij})^2}$	表示斑块组成的景观形状与面积大小之间的关系,反映了一定观测尺度上景观类型的复杂程度及人类活动干扰的程度面积周长分维度越小,景观越趋于规则,人类活动对景观的干扰越大

$i$ : 斑块类型 Patch types;  $j$ : 斑块数目 Patch number;  $A$ : 总的景观面积 Total area of the landscape;  $n_i$ : 景观类型的斑块总数 Total number of the landscape type  $i$ ;  $p_i$ : 斑块类型所占景观面积的比例 Proportion of the landscape type  $i$  in the total area of the landscape

运用 Fragstats3.3 分别计算东山岛 1994 年、2003 年和 2011 年的景观破碎度、景观分离度和面积周长分维度倒数 3 个景观结构指数,构建景观干扰度指数(表 2)。

表2 东山岛景观干扰度指数

Table 2 Landscape disturbance indexes of Dongshan Island

时间 Time		景观类型 Landscape types						
		水域 Water	林地 Forest	草地 Grass	农田 Farmland	道路 Road	建设用地 Construction	其他用地 Others
景观干扰度 Landscape disturbance index	1994 年	0.7157	0.4219	1.4526	0.5486	0.7798	1.2740	0.5201
	2011 年	1.8640	0.8702	4.2790	2.0190	2.0532	4.6993	2.4428
	2011 年	2.8756	0.9953	4.8116	2.1497	1.8398	3.3848	3.0505

### 2.2.2 环境敏感度指数

连续性暴雨、大雨持续作用于区域生态系统,使得生态系统遭受不断的干扰,而不同生态系统响应灾害风险的敏感程度存在空间差异性。持续性降雨会使得水域过满或溢出,使得周边区域出现滞水,因此,认为距离水域越近,风险越高;多日降水后不同用地可能出现内涝,其损失率各不相同,可看作不同用地对暴雨的敏感性。因此,选择与水域距离指标、用地损失率指标的叠加作为环境敏感度指数。与水域距离利用 ArcGIS 中 path distance 来实现;东山近 40 年气象记录出现连续 5 天的大雨,因此,假定滞水 5 天,水深<0.5m 情况下,根

据相关研究文献<sup>[23-24]</sup>及专家意见,水域、林地、道路、其他用地的损失率均为 0,草地的损失率为 0.5、耕地的损失率为 0.9、建设用地的损失率为 0.2。

大风灾害发生时,认为海拔越高,越易受大风侵扰;越靠近海岸线,灾害风险越大。因此,选择海拔高度指标、与海岸距离指标的叠加作为环境敏感度指数。海拔高度指标利用 1:50000 地形图生成 10m 的 DEM 获得;与海岸距离利用 ArcGIS 中 path distance 来实现。

### 2.2.3 系统消纳力指数

系统消纳力指数用以评估不同土地类型吸收特定干扰的能力或维持其干扰前状态的能力,其值越大,说明系统更具有抵抗干扰的能力<sup>[16]</sup>。将暴雨带来的降水作为干扰,则土地贮水和排水能力成为衡量土地是否能消纳所有降水并保持原有状态的主要因素。系统消纳力指数为土壤最大蓄水能力与土壤入渗率的比值,土壤最大蓄水能力指土壤保持水分的能力,土壤入渗率用来评估在一个给定的时间内土壤吸收和传输水分的能力。系统消纳力指数的计算公式如下<sup>[17]</sup>:

$$SP = \frac{S}{IR} \quad (1)$$

$$S = \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \times 25.4 \quad (2)$$

式中,  $SP$  指系统消纳力指数(h);  $S$  指土壤最大蓄水能力(mm),公式来自于 SCS 产流模型;  $IR$  指土壤入渗率(mm/h);  $CN$  是曲线数值。

土壤入渗率  $IR$  分别为水域 500mm/h、森林 258.2 mm/h、草地 131.4mm/h、农田 89.3mm/h、人工地面 38.1mm/h、其他用地 80mm/h<sup>[25-26]</sup>。 $CN$  是反应降雨前流域特征的一个综合参数,也是 SCS 模型的主要参数,本研究假设前期土壤湿润程度为正常状态(AMC II),根据 SCS 模型的土壤分类标准,东山岛土壤进行了重新分类(表 3)。

表 3 东山岛土壤按 SCS 模型分类结果

Table 3 The hydrologic soil groups of different soil types in Dongshan Island

土壤类型 Soil type	魁岐属红壤 Kuiqi genus red loam soil	南园属红壤 Nanyuan genus red loam soil	溪口属黄红壤 Xikou genus yellow-red loam soil	同安属赤红壤 Tongan genus latosolic red soil	东园属黄赤土 Dongyuan genus latosolic red soil	长乐属盐土 Chanle genus saline soil	盐沙土 Salt sand soil
水文土壤组 Hydrologic soil group	B	C	C	B	C	D	A

根据土壤最小入渗率将土壤分为 A、B、C、D4 种类型,A 类主要为砂土或砾石土,B 类主要为砂壤土,C 类主要为壤土,D 类主要为黏土地、人工硬质地面等

根据 SCS 模型 CN 的查算表、研究东山岛土地利用分类结果,并参考国内外研究<sup>[27-30]</sup>,确定了东山岛土地利用的 CN 值矩阵(表 4)。

表 4 东山岛 AMC II 条件下的 CN 值

Table 4 Curve number (CN) for Dongshan Island

土地利用类型 land/use types	CN 的土壤水文分类 CN for hydrologic soil groups			
	A	B	C	D
森林 Forest	35	60	73	80
草地 Grass	49	64	77	84
农田 Farmland	63	74	82	85
建设用地 Construction	73	83	89	91
道路 Road	98	98	98	98
水域 Water	98	98	98	98
其他用地 Others	72	82	88	90

系统消纳力与区域土壤类型、土地利用现状、植被等有关,运用上述公式(1)、(2)计算东山岛系统消纳力指数,结果显示:自然生态系统的系统消纳力一般要高于人工生态系统,如盐沙土上的草地(CN=49,IR=131.4mm/h)和林地(CN=35,IR=258.2mm/h)的SP分别为2.01h和1.83h,为东山岛SP最高的两种类型;而建设用地(CN=91,IR=38.1mm/h)的SP为0.14h,为东山岛SP低的类型,与林地和草地的SP相差较大。可见,当土地利用从林地改变到建设用地,则土壤最大蓄水能力和土壤入渗率均下降,同时系统吸纳降水和维持它初始状态的能力也下降。

#### 2.2.4 景观连接度指数

景观连接度常用于衡量景观各类斑块之间生态结构、功能或生态过程的有机联系<sup>[31]</sup>。灾害作用下的自然生态系统并非仅仅被动地作为孕灾环境而存在,它可以缓冲或减轻灾害的破坏力。连接度高、连通性好的生态功能用地能更好地抵御大风、暴雨,减轻滑坡等次生灾害,因此选择景观连接度指数来反映各生态系统应灾的能力。景观连接度指数计算首先选择森林与草地为生态功能用地;其次,将耕地、道路、建设用地确定为东山岛3种人工障碍用地类型,并确定了东山岛3种人工障碍用地的权重参数及不同障碍类型对数函数曲线的形态调节参数,将研究区内所有景观类型作为人为影响传播介质类型,确定人工障碍物对7种景观类型产生影响的距离,并计算各景观类型的阻力值,运用ArcGIS的最小耗费距离模型,以3种人工障碍用地为源,以各景观类型的阻力值为阻力面,获得障碍影响指数;最后,以森林和草地为源,障碍影响指数为阻力面,计算得出东山岛景观连接度指数(图3)。具体计算方法可参见<sup>[32-33]</sup>。

对东山岛三期生态连接度(ECI)分级图结果(图3)进行分析,结果表明:东山岛三个时期ECI结构变化明显,极高连接度与高连接度区域比重从1994年到2011年有明显提高,从2011年到2011年又明显下降,中连接度、低连接度与无连接度区域均表现为从1994年到2011年先呈现下降,从2003到2011年又上升的状况,可见,总体ECI情况为1994年ECI状况一般,2011年总体情况有所好转,但到2011年又呈现下降。

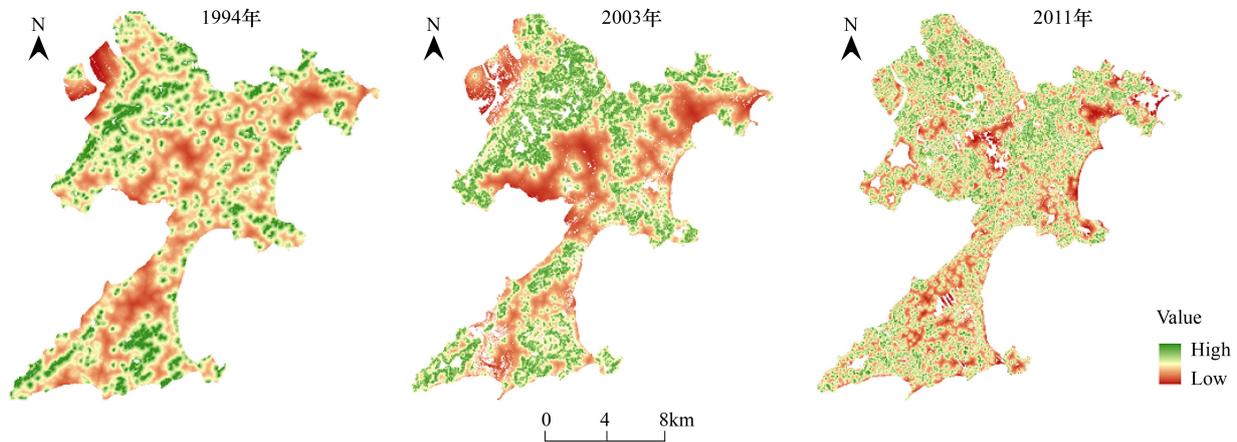


图3 东山岛景观连接度图

Fig.3 Landscape connectivity of Donshan island

#### 2.2.5 系统恢复力指数

如果降雨超过土地的最大蓄水能力时,地表径流将会产生并沿着地表流动。因此,选择地表径流流速来反映不同景观系统从洪水产生到恢复原始状态的差异,越快流出,反映系统的恢复速度越快,则恢复力越强。

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} \cdot d^{1/2} \quad (3)$$

$$R_h = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (4)$$

式中,  $V$  为地表径流流速(mm/s),  $n$  为曼宁系数,  $R_h$  为径流深度(mm),  $d$  为坡度(%),  $P$  为一次降雨的总量

(mm),选择暴雨最大日降水量 245.1mm(1983 年 6 月 19 日)作为东山岛一次降雨总量,  $S$  为土壤最大蓄水能力(mm)。研究区曼宁系数分别为水域 0.01、森林 0.85、草地 0.41、农田 0.24、人工地面 0.14、其他用地 0.15<sup>[34-35]</sup>。

系统恢复力与区域土壤类型、土地利用现状、植被、坡度等有关,运用上述公式(3)、(4)计算东山岛系统消纳力指数,结果显示:不考虑坡度影响的情况下,人工系统的流速一般要快于自然系统,如东山岛道路和建设用地的流速为 275.08mm/s(CN=98)和 258.20mm/s(CN=91),而林地和草地的流速则分别为 12.95mm/s(CN=35)和 45.63mm/s(CN=49),意味着系统恢复能力上建设用地、道路等人工系统更具有优势。考虑地形影响则情况会复杂一些。

### 2.2.6 人为恢复力指数

人类的干预可以帮助系统恢复到原来的状态,甚至在系统超过其消纳能力而无法自然恢复时阻止灾害损失。一般认为,越靠近人类聚居地和基础设施,越有可能获得人类快速的灾害恢复干预,因此,选择与城镇交通距离作为人类恢复力指数。

### 2.2.7 土壤敏感度指数

风沙危害的强度不仅取决于风速的大小,还受控于土壤的性质及状态。因此,选择土壤敏感度指数用以评估不同土壤类型抗大风干扰的能力,其值越大,说明该土壤类型对大风干扰更为敏感。土壤敏感度指数主要参考相关文献<sup>[10,11,36]</sup>及国家环保总局发布的《生态功能区划技术暂行规程》<sup>[37]</sup>,采用经验赋值的方法获得(表 5)。

### 2.2.8 土地利用敏感度指数

人类活动对风沙扩散的影响,主要是通过对风沙活动敏感区的土地利用、土地覆被状况来实现的。因此,选择土地利用敏感度指数反映不同土地利用对大风干扰的敏感程度,其值越大,说明该土地利用类型对大风干扰更敏感。土地利用敏感度指数主要参考相关文献<sup>[10-11,38-39]</sup>及东山区域特点,采用经验赋值的方法获得(表 6)。

表 5 研究区不同土壤类型的大风敏感度

Table 5 The wind sensitivity of different soil types in Dongshan Island

土壤类型 Soil type	盐沙土 Salt sand soil	同安属赤红壤 Tongan genus latosolic red soil	东园属黄赤土 Dongyuan genus latosolic red soil	溪口属黄红壤 Xikou genus yellow-red loam soil	魁岐属红壤 Kuiqi genus red loam soil	南园属红壤 Nanyuan genus red loam soil	长乐属盐土 Chanle genus saline soil
土壤质地 Soil texture	细砂 Fine sand	粘砂土 Sticky sand	砂质粘土 Sandy clay	砂粘土 Sandy clay	粉粘土 Silt clay	粉粘土 Silt clay	粘土 Clay
土壤敏感度 Soil sensitivity	1	0.8	0.6	0.6	0.4	0.4	0.2

表 6 研究区不同土地利用的大风敏感度

Table 6 The wind sensitivity of different land use types in Dongshan Island

土地利用类型 Land/use types	水域 Water	林地 Forest	草地 Grass	农田 Farmland	道路 Road	建设用地 Construction	其他用地 Others
敏感度 Sensitivity	0.1	0.4	0.5	0.8	0.6	0.6	1.0

## 2.3 评估指标权重的确定

运用层次分析法对 6 个指数分别赋权重,各指标权重如表 7。

## 3 结果与分析

以东山岛 1994 年、2003 年和 2011 年 3 期景观类型图为基础,以 10mDEM、东山土壤图为辅,运用 Fragstats3.3、ArcGIS10.0 分别计算东山岛 3 个时期灾害生态风险指数,并转成 15m×15m 栅格形式;为消除量

纲的影响和统一数据方向,进行了归一化处理;生态风险指数分别加权,最终获得东山岛暴雨和大风灾害生态风险图。为了便于分析灾害生态风险的空间分异,将东山岛灾害生态风险图分为5级,1—5分别表示风险水平为低风险度、次低风险度、中风险度、次高风险度、高风险度。

表 7 不同灾害生态风险指标权重

Table 7 Index weights of different disaster ecological risks

指标 Index	景观干扰度 Landscape disturbance	环境敏感性 Environmental sensitivity	系统消纳力 System performance	景观连接度 Ecological connectivity	系统恢复力 Recovery duration	人为恢复力 Human recovery
暴雨灾害权重 Weights of rainstorm	0.1241	0.0878	0.2213	0.2213	0.2213	0.1242
指标 Index	景观干扰度 Landscape disturbance	环境敏感性 Environmental sensitivity	土壤敏感度 Soil sensitivity	土地利用敏感度 Land/use sensitivity	景观连接度 Ecological connectivity	人为恢复力 Human recovery
大风灾害权重 Weights of gale	0.1253	0.0886	0.1406	0.2233	0.2233	0.1989

### 3.1 东山岛暴雨灾害景观生态风险动态分析

对东山岛暴雨灾害生态风险分级图(图4)和东山岛暴雨灾害景观生态风险分级的结构分别进行了分析和统计(表8)。

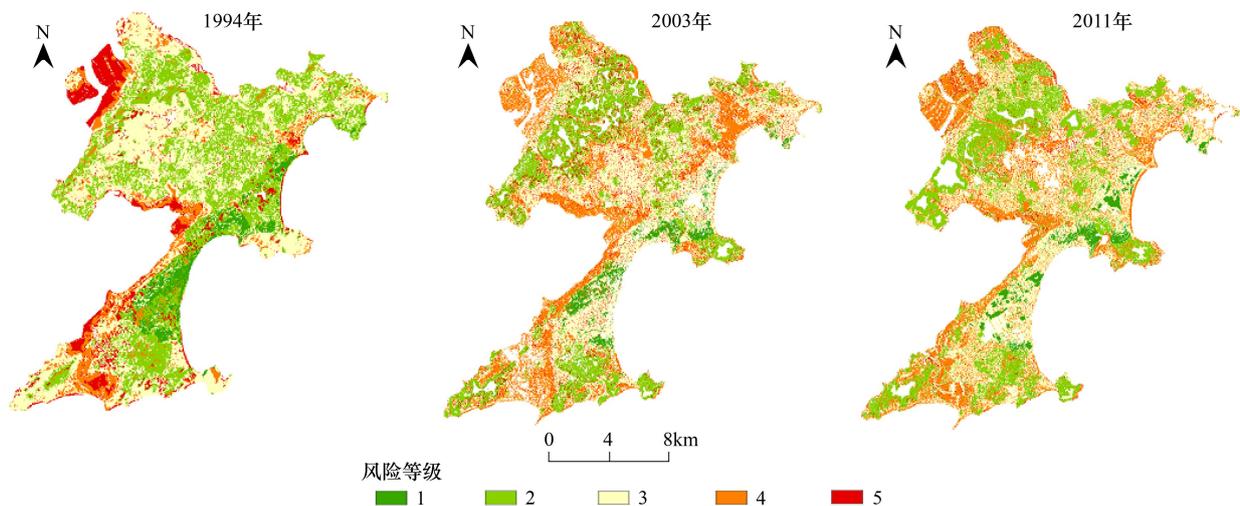


图 4 东山岛暴雨灾害生态风险图

Fig.4 Rainstorm disaster ecological risk of Dongshan Island

表 8 三期东山岛暴雨灾害生态风险分级结果

Table 8 The Results of rainstorm disaster ecological risk classification in Dongshan Island

风险分级 Level	风险水平 Risk degree	1994 年		2011 年		2011 年	
		面积/hm <sup>2</sup> Area	面积比例/% Percentage	面积/hm <sup>2</sup> Area	面积比例/% Percentage	面积/hm <sup>2</sup> Area	面积比例/% Percentage
1	低风险度	916.74	5.0	673.13	3.8	772.83	4.3
2	次低风险度	5766.26	31.4	4438.42	24.9	4824.36	26.9
3	中风险度	7943.22	43.2	7552.46	42.4	7158.02	39.9
4	次高风险度	1991.59	10.8	3757.70	21.1	4552.83	25.4
5	高风险度	1762.54	09.6	1406.39	7.9	643.61	3.6

表 8 可看出,从 1994 年到 2011 年,低风险度区域和次低风险度区域面积先下降后又小幅增加,中风险度

区域面积持续降低,次高风险度区域面积大幅增加,而高风险度区域面积却明显下降。从图 4 中,可以看出 1994 年低风险区主要集中在东山岛东部的沿海地带,次低风险区和中风险区分布于全岛,次高风险区和高风险区则零散分布于东山岛西北、东北、南部沿海地带;2011 年和 2011 年的风险区域分布总体格局基本一致,表现为低风险区主要集中于东部的沿海地带,次低风险区主要集中于西北低山森林地带及南部的林地,高风险区则分散分布于全岛,难以找到集中区域,次高风险区在西北、东北及南部沿海地带存在较为密集的分布。分析可知,高风险区趋向于零散,生态安全有所提高,但是,次高风险度区显著增加,并且从 2011 年至 2011 年有明显增加趋势,同时东部沿海地带的风险值呈现上升,由 1994 年大面积低风险区转为 2011 年、2011 年的大面积中风险区,今后风险管理的重点应是降低这些区域的风险值。

### 3.2 东山岛大风灾害景观生态风险动态分析

对 3 期东山岛大风灾害生态风险分级图(图 5)和 3 期东山岛大风灾害景观生态风险分级的结构分别进行了分析和统计(表 9)。

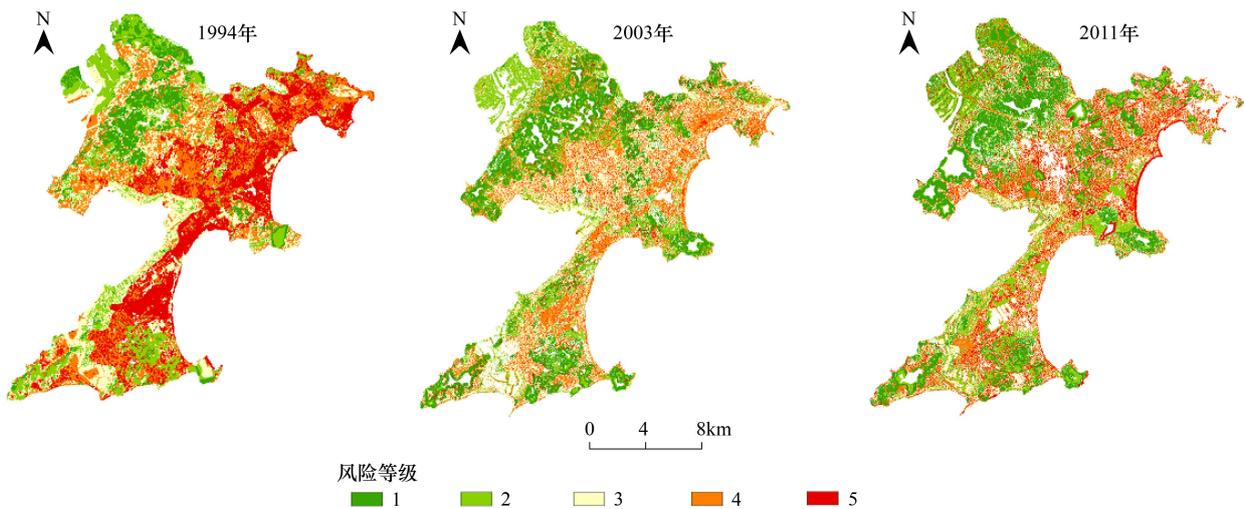


图 5 东山岛大风灾害生态风险图

Fig.5 Strong wind disaster ecological risk of Dongshan Island

表 9 三期东山岛大风灾害生态风险分级结果

Table 9 The Results of strong wind disaster ecological risk classification in Dongshan Island

风险分级 Level	风险水平 Risk degree	1994 年		2011 年		2011 年	
		面积/hm <sup>2</sup> Area	面积比例/% Percentage	面积/hm <sup>2</sup> Area	面积比例/% Percentage	面积/hm <sup>2</sup> Area	面积比例/% Percentage
1	低风险度	1933.88	10.3	4347.38	24.1	4556.34	25.3
2	次低风险度	2876.67	15.3	2869.99	15.9	2917.69	16.2
3	中风险度	4220.98	22.4	5253.95	29.1	4711.28	26.2
4	次高风险度	5157.86	27.4	3834.88	21.2	3166.09	17.6
5	高风险度	4641.12	24.6	1767.80	9.8	2623.52	14.6

从表 9 中看出,从 1994 年到 2011 年,低风险度区域随时间显著增加,次低风险度区域面积变化不大,中风险度区域面积先增加又降低,次高风险度区域面积大幅下降,而高风险度区域面积明显下降,后又有所上升。从图 5 中,可以看出 1994 年低风险区主要集中在东山岛西北部,次低风险区和中风险区分布于全岛,在东北部和南部及西南沿海有所集中,次高风险区则零散分布于东山岛全岛,难以找到主要集中区,高风险区则集中分布于整个东部沿海地带;2011 年和 2011 年的风险区域分布总体格局基本一致,表现为低风险区和次低风险区主要集中于东山岛西北低山森林地带及南部的林地,高风险区则分散分布于全岛,难以找到集中区

域,次高风险区在东部沿海地带存在较为密集的分布。分析可知,东山岛大风生态风险值持续趋好,尤其是东部沿海地带生态风险值明显下降,森林持续建设使得森林地带连通性提高,生态风险值持续下降,然而,2011年至2011年北部城镇集中区和沿海地带的风险值却呈现升高趋势。

总之,东山岛灾害生态风险变化的主要原因可能是东山岛持续的获得国家支持的生态建设,森林建设面积持续增加,使得全岛生态风险总体有所改善,但东山岛旅游开发、养殖发展、房地产建设蓬勃兴起,使得人为干扰不断加剧,导致东山岛灾害生态风险随时间有所变化。可见,17a 来的人为干扰存在正负效应,长期生态建设使得东山岛西北部主要低山森林地带风险值下降,整体生态环境和抗灾能力趋好,但经济的发展又使得东山岛城镇和沿海地带成为开发的热点地区,旅游、养殖、房地产等的干扰加上沿海防护林二代更新生长不良等问题,造成东北部城镇集中区和东部沿海地带风险值总体上升,生态环境质量和抗灾能力下降。

#### 4 结论

灾害干扰下区域景观格局改变所带来的风险评估议题是十分复杂的,它涉及人类影响下的生态系统和社会经济系统的各种相互过程<sup>[16]</sup>。本研究考虑承灾系统的三个因素,即灾害发生前承灾系统的脆弱性、灾害发生时承灾系统自身的应灾能力以及灾害发生后承灾系统的恢复力,从这三个方面来构建东山岛暴雨和大风灾害生态风险评估指标体系,较好地反映了灾害干扰下区域景观变化所带来的生态风险的时空变化。结果表明东山岛无论暴雨和大风灾害生态风险格局均随时间出现明显变化,生态风险总体有所改善;东山岛长期的生态建设、森林面积增加,使得东山岛西北和南部森林地带灾害生态风险值均较低,表现出持续提高的生态安全;然而,大规模的城镇建设、旅游、养殖、房地产等人类干扰,造成东北部城镇集中区和东部沿海地带暴雨和大风灾害的风险值均上升,生态环境质量和抗灾能力下降;且2011年到2011年生态风险有上升趋势。因此,今后东山岛的风险管理的重点应是东北部城镇集中区及东部沿海地带。这种灾害生态风险评价方法不仅能够快速评价区域生态系统的抵抗干扰的能力,还能反映景观改变对生态系统服务功能的影响。这项研究表明灾害生态风险变化是与景观改变相互响应的,而人为干扰则是景观改变的主导因子,因此,建设多样化的景观以及更合理的管理和开发城镇和沿海地带等策略,能够提升东山岛生态系统弹性,增强抗干扰能力以及减轻极端天气对生态系统影响。

#### 参考文献 (References):

- [1] 王耕, 高香玲, 高红娟, 丁晓静, 王利. 基于灾害视角的区域生态安全评价机理与方法——以辽河流域为例. 生态学报, 2010, 30(13): 3511-3525.
- [2] 颜磊, 许学工. 区域生态风险评价研究进展. 地域研究与开发, 2010, 29(1): 113-118.
- [3] Petrosillo I, Zurlini G, Grato E, Zaccarelli N. Indicating fragility of socio-ecological tourism-based systems. *Ecological Indicators*, 2006, 6(1): 104-113.
- [4] 曾勇. 区域生态风险评价-以呼和浩特市为例. 生态学报, 2010, 30(3): 668-673.
- [5] 高宾, 李小玉, 李志刚, 陈玮, 何兴元, 齐善忠. 基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析. 生态学报, 2011, 31(12): 3441-3450.
- [6] 孙洪波, 杨桂山, 苏伟忠, 朱天明, 万荣荣. 沿江地区土地利用生态风险评价-以长江三角洲南京地区为例. 生态学报, 2010, 30(20): 5616-5625.
- [7] Malekmohammadi B, Blouchi L R. Ecological risk assessment of wetland ecosystems using Multi Criteria Decision Making and Geographic Information System. *Ecological Indicators*, 2014, 41: 133-144.
- [8] Gilman E, Owens M, Kraft T. Ecological risk assessment of the Marshall Islands longline tuna fishery. *Marine Policy*, 2014, 44: 239-255.
- [9] 王娟, 崔保山, 刘杰, 姚华荣, 翟红娟. 云南澜沧江流域土地利用及其变化对景观生态风险的影响. 环境科学学报, 2008, 28(2): 269-277.
- [10] Perrodin Y, Boillot C, Angerville R, Donguy G, Emmanuel E. Ecological risk assessment of urban and industrial systems: A review. *Science of The Total Environment*, 2011, 409(24): 5162-5176.
- [11] Zhang X C, Ma C, Zhan S F, Chen W P. Evaluation and simulation for ecological risk based on emergy analysis and Pressure-State-Response

- Model in a coastal city, China. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 221-231.
- [12] 巫丽芸, 何东进, 洪伟, 纪志荣, 游魏斌, 赵莉莉, 肖石红. 自然灾害风险评估与灾害易损性研究进展. *灾害学*, 2014, 29(4): 129-135.
- [13] Fan Z J. Marine pollution legislation in China: Retrospect and prospect. *Marine Pollution Bulletin*, 1989, 20(7): 333-335.
- [14] World Resources Institute. *Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment*. Washington D. C.: Island Press, 2003.
- [15] 付在毅, 许学工, 林辉平, 王宪礼. 辽河三角洲湿地区域生态风险评价. *生态学报*, 2001, 21(3): 365-373.
- [16] Wang S H, Huang S L, Budd W W. Resilience analysis of the interaction of between typhoons and land use change. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 106(4): 303-315.
- [17] Sandia National Laboratories. *Energy and system analysis infrastructure: A framework for critical infrastructure resilience analysis, discovery at the interface of science and engineering: Science matter!*. New Mexico: Sandia National Laboratories, 2009.
- [18] Yao L V. Urban land carrying capacity evaluation and resilience analysis. In *Proceeding of the Vulnerability and Resilience of Land System in Asia Beijing, China*, 2009.
- [19] 石浩朋, 于开芹, 冯永军. 基于景观结构的城乡结合部生态风险分析-以泰安市岱岳区为例. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 705-712.
- [20] 吴健生, 乔娜, 彭建, 黄秀兰, 刘建政, 潘雅婧. 露天矿区景观生态风险空间分异. *生态学报*, 2013, 33(12): 3816-3824.
- [21] 方广玲, 香宝, 王宝良, 金霞, 胡钰, 张立坤. 苏南经济快速发展地区人类活动生态风险评价-以镇江市丹徒区为例. *应用生态学报*, 2014, 25(4): 1076-1084.
- [22] 游魏斌, 何东进, 巫丽芸, 洪伟, 詹仕华, 覃德华, 游惠明. 武夷山风景名胜景观生态安全度时空分异规律. *生态学报*, 2011, 31(21): 6317-6327.
- [23] 鲍鑫, 贺治国, 王振宇, 吴钢锋, 刘国华, 钱镜林. 台风暴雨影响区溃坝洪灾淹没损失评估. *浙江大学学报: 工学版*, 2012, 46(9): 1638-1646.
- [24] 李春. 区域性洪涝灾害的灾情评估. *自然灾害学报*, 2004, 13(4): 75-81.
- [25] 赵锦梅, 张德罡, 刘长仲. 东祁连山土地利用方式对土壤持水能力和渗透性的影响. *自然资源学报*, 2012, 27(3): 422-429.
- [26] 杨金玲, 张甘霖, 袁大刚. 南京市城市土壤水分入渗特征. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 363-368.
- [27] 刘敏, 权瑞松, 许世远. *城市暴雨内涝灾害风险评估: 理论、方法与实践*. 北京: 科学出版社, 2012.
- [28] Fu B, Wang Y K, Xu P, Yan K. Mapping the flood mitigation services of ecosystems-A case study in the Upper Yangtze River Basin. *Ecological Engineering*, 2013, 52: 238-246.
- [29] Xiao B, Wang Q H, Fan J, Han F F, Dai Q H. Application of the SCS-CN model to runoff estimation in a small watershed with high spatial heterogeneity. *Pedosphere*, 2011, 21(6): 738-749.
- [30] French R H, Miller J J, Dettling C, Carr J R. Use of remotely sensed data to estimate the flow of water to a playa lake. *Journal of Hydrology*, 2006, 325(1/4): 67-81.
- [31] Tischendorf L, Fahrig L. How should we measure landscape connectivity? *Landscape Ecology*, 2000, 15(7): 633-641.
- [32] Marulli J, Mallarach J M. A GIS methodology for assessing ecological connectivity: application to the Barcelona Metropolitan Area. *Landscape and Urban Planning*, 2005, 71(2/4): 243-262.
- [33] 武剑峰, 曾辉, 刘雅琴. 深圳地区景观生态连接度评估. *生态学报*, 2008, 28(4): 1691-1701.
- [34] Engman E T. Roughness coefficients for routing surface runoff. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1986, 112(1): 39-53.
- [35] Prakash A. *Water Resources Engineering: Handbook of Essential Methods and Design*. Reston: ASCE Press, 2004.
- [36] 刘新颜, 曹晓仪, 董治宝. 基于 T-S 模糊神经网络模型的榆林市土壤风蚀危险度评价. *地理科学*, 2013, 33(6): 741-747
- [37] 中华人民共和国环境保护部, 生态功能区划暂行规程, (2003-08-15) [2014-10-20]. [http://sts.mep.gov.cn/stbh/stglq/200308/t20030815\\_90755.htm](http://sts.mep.gov.cn/stbh/stglq/200308/t20030815_90755.htm).
- [38] 何文清, 赵彩霞, 高旺盛, 陈源泉, 秦红灵, 樊秀荣. 不同土地利用方式下土壤风蚀主要影响因子研究——以内蒙古武川县为例. *应用生态学报*, 2005, 16(11): 2092-2096.
- [39] 海春兴. 河北坝上土地利用与土壤风蚀的动力学过程研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2003.