

# 基于 ESAI 的黄土高原荒漠化风险评估

张建香<sup>1,2</sup>, 张多勇<sup>3</sup>, 刘万锋<sup>1,2</sup>, 胡爱萍<sup>1</sup>, 王东<sup>1</sup>, 胡剑桥<sup>1</sup>

(1. 陇东学院 土木工程学院, 甘肃 庆阳 745000; 2. 甘肃省高校黄土的工程性质及工程应用省级重点实验室, 甘肃庆阳 745000; 3. 庆阳市荒漠化防治研究中心, 甘肃 庆阳 745000)

**摘要:** [目的] 对黄土高原荒漠化风险进行评估, 为黄土高原生态环境的恢复、建设和保护提供科学依据。[方法] 通过收集黄土高原的地形、气候、植被、土壤以及社会经济等方面的数据, 借助 RS 和 GIS 平台, 实现黄土高原荒漠化风险评估的空间化和数字化, 在此基础上分析荒漠化的成因, 构建荒漠化风险评价指标体系, 建立基于环境敏感性区指标(ESAI)的荒漠化风险评估模型, 分析荒漠化风险程度的空间格局, 探索黄土高原不同区域荒漠化形成的主要原因。[结果] (1) 基于土壤、气候、植被 3 种要素的环境敏感区生物物理指标显示: 黄土高原大约 1/4 的区域(25.2%)为高风险区, 属于严重荒漠化, 几乎 2/3 的区域(62.8%)是轻微荒漠化, 11.5%的地区为潜在荒漠化, 只有 0.5%的地区无荒漠化现象; (2) 加入人类诱发因素后, 改变了黄土高原荒漠化风险区的原有格局。其中, 极低、低度和极高度敏感区减少了 5.6%, 1.1% 和 3.8%; 与此同时, 较低和较高度敏感区增加了 4.4% 和 4.5%。[结论] (1) 该模型能很好地说明黄土高原荒漠化风险的空间分布格局, 其荒漠化程度由西北向东南地区逐渐减弱; (2) 人类活动已经在一定程度上打破了长期稳定的自然生态系统, 并且缩小了不同程度荒漠化之间的差距。

**关键词:** 荒漠化; 环境敏感性区指标(ESAI); 地理信息系统(GIS); 黄土高原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)02-0339-06

中图分类号: TP79, X171.1

**文献参数:** 张建香, 张多勇, 刘万锋, 等. 基于 ESAI 的黄土高原荒漠化风险评估[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2):339-344. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.051; Zhang Jianxiang, Zhang Duoyong, Liu Wanfeng, et al. ESAI Based Assessment of Desertification Risk in Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2):339-344. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.051

## ESAI Based Assessment of Desertification Risk in Loess Plateau

ZHANG Jianxiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Duoyong<sup>3</sup>, LIU Wanfeng<sup>1,2</sup>,  
HU Aiping<sup>1</sup>, WANG Dong<sup>1</sup>, Hu Jianqiao<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Longdong University, Qingyang, Gansu 745000, China;

2. Provincial Key Laboratory of Loess Engineering Properties and Applications in Gansu Province Universities, Qingyang, Gansu 745000, China; 3. Research Center of Desertification Prevention at Qingyan City, Qingyang, Gansu 745000, China)

**Abstract:** [Objective] The risk of desertification was evaluated in Loess Plateau to provide scientific basis for the restoration, construction and protection of ecological environment. [Methods] Data of landform, climate, vegetation, soil and other socio-economic data were collected. Spatialization and digitalization were conducted using GIS and remote sensing. Upon which, desertification reasons were analyzed, and evaluation indices and risk assessment model were framed based on index of environmentally sensitive areas. [Results] (1) According to the bio-physical index in the framed model, under the scenario only considering natural factors as soil, climate and vegetation, 25.2% of Loess Plateau was determined as high desertification risk area, where desertification was worst; 62.8% and 11.5% of Loess Plateau were determined as moderate and potential desertification risk areas; only 0.5% was considered having no risk. (2) If both natural factors and human interference were considered, risk area changed; coverages of extreme low, low and extreme high risk

收稿日期: 2016-03-25

修回日期: 2016-07-28

**资助项目:** 国家自然科学基金项目“清代同治以来黄土高原马莲河流域荒漠化风险评估与防治研究”(31460090); 2015 年甘肃省社科规划项目(YB095); 甘肃省社科规划项目(14YB108); 西峰区科技局科技计划项目(XK2016-06); 庆阳市科技局青年科技基金项目(ZJ2014-08); 甘肃省哲学社会科学规划项目(YB093)

**第一作者:** 张建香(1987—), 女(汉族), 甘肃省华池县人, 硕士, 讲师, 主要从事遥感与地理信息系统技术应用研究。E-mail: zhangjianxiang\_67@163.com。

**通讯作者:** 张多勇(1966—), 男(汉族), 甘肃省华池县人, 博士, 教授, 主要从事历史地理研究。E-mail: bbbjjj2@163.com。

levels decreased by 5.6%, 1.1% and 3.8%, respectively; whereas, coverages of lower and higher risk levels increased by 4.4% and 4.5%. [Conclusion] (1) The ESAI model can well explain the spatial distribution pattern of desertification risk of Loess Plateau, and the degree of desertification is gradually weakened from the northwest to the southeast. (2) Human activities have upset the long-term evolved stability of the natural eco-system to some extent, and have narrowed the gap between different risk levels of desertification.

**Keywords:** desertification; environmental sensitive areas index (ESAI); geographic information systems (GIS); Loess Plateau

1977 年联合国荒漠化会议召开以后,“荒漠化”作为一个生态环境问题被世界所公认。1991 年 9 月,联合国环境署在日内瓦召开了荒漠化防治第 8 次顾问会议,对世界荒漠化防治作了全面研究。近年来,学术界主要倾向于荒漠化的演变过程、荒漠化驱动机制、荒漠化监测与评估及其指标体系的建立等方面的研究,地理信息系统技术在荒漠化研究中被广泛应用<sup>[1]</sup>。尽管如此,目前研究尚存在诸多问题,荒漠化风险评估方法尚待进一步深化。第一,在研究深度上,应将传统的小尺度、静态的定性调查描述转向定位、定量地对荒漠化格局、过程及内在机制进行宏观、动态及具有辅助决策作用的系统研究;第二,在研究方式上,应更加注重学科的联合和渗透,同时应结合野外定点观测、遥感监测和 GPS/GIS 应用,实现荒漠化的动态自动监测<sup>[2]</sup>;第三,为研究土地退化程度, Kosmas 教授<sup>[3]</sup>于 1999 年提出了环境敏感区法 (environmentally sensitive areas, ESAs),该方法考虑了土壤、气候、植被、土地管理等质量指标,但随着人类活动对生态环境造成的干扰日益加大,ESAs 方法中的各项指标已不能充分反映环境质量的高低。为此,本研究以中国典型的生态环境脆弱区黄土高原为研究对象,在 ESAs 方法的基础上,综合地形、气候、植被、土壤、人口、经济等多种生物—物理方面的环境质量影响因素,建立基于环境敏感性评估指标的黄土高原区荒漠化风险评估模型 ESAI (environmental sensitive areas index)<sup>[4-5]</sup>,研究黄土高原不同程度荒漠化的空间分布格局,探索不同区域影响荒漠化的主要原因,进而为黄土高原生态环境的恢复、建设和保护提供科学的依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

黄土高原坐落在中国大陆的中北部,位于黄河流域的中游地带(33°41′—41°16′N, 100°52′—114°33′E),跨陕、甘、青、晋、宁、豫、内蒙古 7 个省(区),东起太行山,西至乌鞘岭—日月山,南达秦岭,北至阴山,东西长约 1 300 km,南北宽约 800 km,总面积约 6.23 ×

10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>,平均海拔 1 500~2 000 m<sup>[6-7]</sup>。黄土高原具有典型的大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季炎热潮湿。年平均温度由西北(4.3 ℃)向东南(14.3 ℃)逐渐递增。多年平均降水量约为 460 mm,且降水量的年际变化较大<sup>[8]</sup>。黄土高原被深厚的黄土层覆盖,大部分地区黄土厚度达 100 m,已成世界黄土层最厚、分布最广泛、最典型的黄土地貌。同时,由于该地区植被稀少,而黄土土质疏松,且暴雨多集中在夏秋两季,地形起伏大,极易出现水土流失,导致黄土高原成为全球生态退化最严重的地区之一<sup>[9-10]</sup>。

### 1.2 荒漠化风险评估模型

为适应综合地形、气候、植被、土壤、人口、经济等多种环境质量因素,在环境敏感区法(ESAs)基础上,提出基于环境敏感区指标的黄土高原荒漠化风险评估模型,建立对黄土高原不同区域荒漠化的评价机制。模型包含 5 组指标,即:土壤质量指数(SQI)、气候质量指数(CQI)、植被质量指数(VQI)、土地利用与管理质量指数(LU-MQI)和人类胁迫指数(HPI)。其中,土壤质量指数 SQI 的计算包含成土母质、土壤质地、碎石含量、土壤深度、排水条件和坡度等要素;气候质量指数 CQI,主要通过降水、干旱指数、坡向和降雨侵蚀力等指标得出;植被质量指数 VQI 包含植被覆盖度、火灾风险性、土壤侵蚀保护和植被耐旱性等要素;土地利用与管理质量指数 LU-MQI,主要通过耕地、草地、林地和灌丛的面积以及水土保持措施的重点区域计算得出;人类胁迫指数 HPI 主要根据人口数量、人口密度和农业人口所占比重来确定<sup>[11]</sup>。与 Gad 等<sup>[12]</sup>2008 年提出的荒漠化敏感指数模型(DSI)相比,ESAI 模型包含了两项新的指标,即土地利用与管理质量指数和人类胁迫指数,而 DSI 模型可以描述为包含土壤、气候和植被等生物物理要素的环境敏感区指标(ESAI\_SCV):

$$ESAI\_SCV = (SQI \cdot CQI \cdot VQI)^{1/3} \quad (1)$$

据此,基于环境敏感区指数(ESAI)的黄土高原荒漠化风险评估模型可以表示为:

$$ESAI = (SQI \cdot CQI \cdot VQI \cdot LU\_MQI \cdot HPI)^{1/5} \quad (2)$$

为了反映土地退化的程度,我们把 ESAI 模型按照敏感程度由高到低依次分为 8 类:极高、高度、较

高、较低、低度、极低、潜在敏感和不敏感。

其中, SQI(土壤质量指数)是在原来的环境风险指数模型 ESI<sup>[13]</sup>的基础上估算出来的,该模型考虑了母岩(PM)、土壤质地(ST)、碎石(RF)、土壤深度(SD)、排水条件(Drainage)和坡度(Slope)等 6 个影响因子(公式 3):

$$SQI=(PM \cdot ST \cdot RF \cdot SD \cdot Drainage \cdot Slope)^{1/6} \quad (3)$$

其中,母岩(PM)中酸性岩母质(含石英、正长石、白云母等浅色矿物)的抗风化能力较强,而基性和超基性岩母质(含角闪石、辉石、黑云母等深色矿物)的抗风化能力较弱。土壤质地(ST)是土壤颗粒的粗细状况,颗粒越粗,往往地表越贫瘠,对应的环境风险程度也比较高,反之亦然。土壤中碎石含量(RF)的多少会影响土壤受侵蚀的程度,当土体中存在中等风化程度变质岩碎石时,影响了坡面土体蓄水能力与产流方式,同一雨量下,雨强小且历时长的降雨径流系数可能小;对于存在风化程度高的沉积岩碎屑的土体,坡上土体易在沉积岩层或土岩界面形成壤中流,在坡下则有利于径流入渗;对于椭圆卵石存在的土体,坡上易形成壤中流,坡下浅层土体易蓄积水量<sup>[14]</sup>。土壤质量指数(SQI)的其余 3 项因素与土壤的环境质量关系表现为:当土壤深度越大,排水条件越好,坡度越小时,土壤的环境质量则越高。

CQI(气候质量指数)是由年平均降水量  $P$ 、坡向(Aspect)、干旱指数 BGI(Bagnouls-Gaussens aridity index)<sup>[15]</sup>(公式 5)和通用土壤流失方程(USLE)中的降雨侵蚀力因子( $R$ )<sup>[16]</sup>共同决定的(公式 4)。

$$SQI=(P \cdot Aspect \cdot BGI \cdot R)^{1/4} \quad (4)$$

降水量( $P$ )是衡量区域气候的重要标志,但不是唯一的:气温会影响当地的蒸散量,故需要结合降水和气温 2 个要素来反映区域的干旱程度;由于不同坡向(Aspect)的植被种类不同,使得热量和水分交换在时间和空间上存在显著差异,多项研究表明,阳坡具有更南地区的气候特点,而阴坡则具有更北地区的气候特点。因此坡向也成为反映气候质量的一个重要指标。

$$BGI=\sum_{i=1}^{12}(2t_i - p_i)k_i \quad (5)$$

式中: $t_i$ ——月平均气温( $i=1 \sim 12$ );  $p_i$ ——月平均降雨量;  $k_i$ ——系数,表示一年中各月降雨量在数值上小于两倍气温时月份的个数。

VQI(植被质量指数)根据植被覆盖度(VC),火灾风险性(FR),土壤侵蚀保护(SEP)和植物耐旱性(VRD)等要素估算得出(公式 6),而后三者都是依据植被类型直接进行量化的<sup>[16]</sup>,其中:就火灾风险性

(FR)来说,果园和作物相比草地、灌木和落叶林等植被发生火灾的可能性较小,而针叶林发生火灾的可能性最大;对土壤侵蚀保护(SEP)能力而言,由强到弱依次是针叶林、灌丛、草原、落叶林、果园和农作物;植物的耐旱性(VRD)最强的是针叶林和落叶林,果园和草原的次之,农作物的耐旱性最差。

$$VQI=(VC \cdot FR \cdot SEP \cdot VRD)^{1/4} \quad (6)$$

LU\_MQI(土地利用与管理质量指数)包含土地利用(LUI)和土地管理政策(MQI)2 种指标(公式 7)。而土地利用指标(LUI)又分为作物用地(CLUI)、牧场用地(PLUI)和森林用地(FLUI)3 种指标(公式 8)。其中,CLUI(作物用地)是综合农作物的耕作强度、灌溉强度、农业机械化程度、农用化肥使用数量以及植被保护产品的使用等 5 项指标得到的;PLUI(牧场用地)考虑了整个研究区内牧业用地的面积和牲畜头数;FLUI(森林用地)是通过森林覆盖度估算得出的。MQI 表示对土地的保护,主要通过退耕还林、修建梯田和淤地坝等水土保持措施<sup>[17]</sup>估算出来的。

$$LU\_MQI=(LUI \cdot MQI)^{1/2} \quad (7)$$

$$LUI=(CLUI \cdot PLUI \cdot FLUI)^{1/3} \quad (8)$$

人类胁迫指数(HPI)表示人类对环境的负面影响。由于黄土高原地区相比中国其他地区游客数量较少,没有考虑原有 HPI 指标中旅游业对土地退化的影响。因此,将 ANPA 的人类胁迫指数(HPI)<sup>[18]</sup>进行了修订(公式 9)。

$$HPI=(PD \cdot RP \cdot EA)^{1/3} \quad (9)$$

式中:PD——人口密度; RP——年底常住人口; EA——农业人口。

### 1.3 数据采集和等级划分标准

通过查阅数据库和基层调研,我们获取了一系列的自然地理和社会社会经济数据,主要有地形、气候、土壤、植被等遥感数据,人口、经济等统计数据以及政策方面的历史资料等(表 1)。

所有这些数据都是为了建立基于 ESAI 的荒漠化风险评估模型。不同数据或图层的创建都是为了构建 5 种环境质量指数(SQI, CQI, VQI, LU\_MQI 和 HPI),而这些质量指数都是借助 GIS 平台计算的。每个环境质量指标中不同变量的量化主要依据 Ferrara 等<sup>[15]</sup>2005 年提出的方案。为了对量化以后的环境质量数据进行等级划分,参考意大利学者 Lardisa<sup>[1]</sup>的划分标准,结合黄土高原的实际情况,最终确定了 ESAI 模型中各项指标的等级划分标准(表 2)。

表 1 ESAI 模型中相关数据及其来源

数据类别	图层名称	数据来源
地形	坡向,坡度	30 m 分辨率的 DEM 数字高程模型
气候	降水,干旱指数,降雨侵蚀力因子	中国气象科学数据共享服务网站下载的气温和降水月数据(1980—2010 年)
土壤	母质,碎石,土壤深度,排水条件	基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(v1.1)
植被	植被覆盖,抗蚀性,抗旱性	MODISIKM 地表温度产品(MOD11A2)和地表覆盖类型 96 d 合成数据产品(MOD12Q1)
土地管理	土地利用强度,政策	黄土高原社会经济数据集(1980—2010 年)和实地调研
社会经济	人口总数,人口密度,农业人口	黄土高原社会经济数据集(1980—2010 年)和实地调研

表 2 ESAI 模型各项指标的等级划分标准

指标分类	等级	描述	范围	指标分类	等级	描述	范围
SQI (土壤质量指标)	1	高质量	<1.1	LU_MQI (土地利用与管理指标)	1	极高质量	<1.0
	2	中等质量	1.1~1.3		2	高质量	1.0~1.3
	3	低质量	>1.3		3	中等质量	1.3~1.5
CQI (气候质量指标)	1	高质量	<1.3		4	低质量	>1.5
	2	中等质量	1.3~1.5	HPI (人类胁迫指标)	1	轻微胁迫	<1.0
	3	低质量	>1.5		2	中等胁迫	1.0~1.5
VQI (植被质量指标)	1	高质量	<1.3		3	高度胁迫	>1.5
	2	中等质量	1.3~1.5				
	3	低质量	>1.5				

## 2 结果与分析

### 2.1 不同环境质量指数分析

由于受各种自然条件和人类活动的影响,所以荒漠化是一个复杂的过程。通过 ESAI 模型对黄土高原荒漠化风险各指标进行评估,结果如附图 9a—9e 所示(SQI,CQI,VQI,LU\_MQI 和 HPI)。

**2.1.1 土壤质量指数(SQI)** 附图 9a 表明,黄土高原 1/2 以上的土壤为中等质量(52.5%),接近 1/2 (44.2%)的为高品质土壤,而低质量土壤仅占了 3.3%。其中,高质量区主要分布在黄土高原的中心地段。分布如此广泛的高质量土壤是因为黄土高原土层深厚,被称为世界上黄土层最厚的地方,在人类频繁的黄土高原活动作用下黄土岩石被改造成为土壤,多数地区有效土壤厚度达 100 cm。对于小面积的低质量土壤,主要是由于其土层较浅,地表贫瘠且土壤排水条件较差。

**2.1.2 气候质量指数(CQI)** 通过对全国 61 个气象站点的气温和降水数据进行空间插值,并经过一系列的计算得到气候质量指数,并进行气候质量等级划分(附图 9b)。附图 9b 表明,气候质量呈东南向西北递减的趋势,同时在宁夏—兰州—海原—定边—绥德—河曲—呼和浩特等地区存在一条明显的界限。其中,低质量气候区主要分布在边界以北(23.7%),高质量气候区主要分布在边界以南(29.8%),而中等质量气候区镶嵌分布在以上两者之间(46.5%)。这种空间格

局和黄土高原年平均降水量的分布格局基本一致,但因考虑了气温要素,使得气候质量的空间差距进一步缩小;另外,不同的坡向导致降水和热量重新分配,使整个气候质量在微观尺度上也表现出空间差异性。

**2.1.3 植被质量指数(VQI)** 植被质量指数显示,不到 1/5 的黄土高原地区植被质量较高(19.0%),将近 1/2 的地区是中等质量(42.1%),大约 38.0%的区域植被质量较差(附图 9c)。高质量植被区位于黄土高原东南部,主要由分布在秦岭,子午岭和太行山北部的高植被覆盖率的森林决定。由于黄土高原整体的植被覆盖度较低,大部分地区都属于中等或低植被质量区,尤其是以草地为主的内蒙古河套平原。另外,从东南向西北的过渡地带由于分布了大量的农作物,其脆弱的植被类型无论从耐旱性或是保护地表不被侵蚀等方面都比较差,因此,导致了大面积低植被质量区域的分布。

**2.1.4 土地利用与管理质量指数(LU\_MQI)** 有关土地利用与管理质量的高低,主要通过县域尺度上耕地面积、放牧面积和造林面积等进行估算(附图 9d)。土地利用和管理质量指数显示:黄土高原几乎 1/2 的区域(48.3%)处于高水平甚至极高水平,主要分布在黄土高原中部由东北向西南延伸的广阔地带。因为该区域是中国科学院(CAS)划分的水土保持重点区域,自 20 世纪 80 年代以来,实施了大规模的坡改梯、淤地坝等水土保持工程措施以及大量的植树造林、退耕还林还草生态措施。研究结果显示,中等质量占

36.1%,与高质量区所占比例较为接近,主要分布在黄土高原的东南部渭河平原一带,另外在陇中、青东、山西和蒙北均有分布。只有 12.2%的低质量集中分布在内蒙古鄂托克旗、鄂托克前旗和乌审旗等区域,该区域分布了大面积的荒漠用地,其次是牧业用地,但因单位牧草地面积上的载畜量较大极易造成土地退化。鉴于此,在加强水土保持重点区域的土地利用管理的同时,也必须重视黄土高原其他地区尤其是内蒙古地区的土地管理工作。

2.1.5 人类胁迫指数(HPI) 人类胁迫指数等级图中显示,黄土高原近 1/2 区域(46.2%)受人类干扰程度较弱,39.8%属于中等胁迫,只有约 14.0%为高度胁迫(附图 9e)。黄土高原几乎涵盖了整个黄河流域,流域良好的土壤和水分条件,形成了黄土高原几千年的农耕文化,农业人口比重较大,同时也产生了撂荒制、压青休闲制、粗放轮作制、保护性耕作制等多种耕作制度。因此,人口密度、农业人口数量的空间差异性以及农业耕作制度的多样化共同决定了黄土高原 HPI 的空间分布格局。

## 2.2 黄土高原荒漠化风险评价

2.2.1 基于生物物理要素的黄土高原荒漠化风险评价 土壤、气候和植被决定了黄土高原荒漠化风险程度的基本格局,为此,我们综合 SQI、CQI 和 VQI 3 种环境质量指标,得到环境敏感区生物物理指标 ESAI-SCV,但该指标仅表示黄土高原荒漠化的生物物理因素。ESAI-SCV 等级图显示:黄土高原大约 1/4 的区域(25.2%)为高风险区,属于严重荒漠化,几乎 2/3 的区域(62.8%)是轻微荒漠化,11.5%的地区为潜在荒漠化,只有 0.5%的地区无荒漠化现象(附图 9f)。总体来看,黄土高原荒漠化程度在西北地区显著高于东南地区。其中,内蒙古杭锦旗是荒漠化严重的地方,其次是陕西省的榆林市。相比之下,陕西、山西的许多县市都是荒漠化的低风险区,主要表现为微弱或潜在沙漠

化。黄土高原位于中国半湿润气候区与半干旱干旱气候区的过渡带,既是气候变化的敏感区,又是环境脆弱区。根据《联合防治荒漠化公约》对荒漠化的定义,干旱半干旱和亚湿润地区是荒漠化发生的源地,在全球变暖的大背景下,干旱半干旱区的气候变化是影响荒漠化的一个重要原因。植被和土壤相互影响,且两者都在不同的气候条件下表现出空间异质性。

2.2.2 黄土高原荒漠化风险综合评价 为了制定黄土高原荒漠化防治的有效措施,还需要考虑人类活动对荒漠化的影响。因此,将土地利用与管理 and 人类胁迫等社会经济指标同土壤、气候、植被等生物物理指标相结合,最终建立了荒漠化风险评估的环境敏感性评估指标(ESAI)(附图 9g)。列入人类诱发因素后,改变了黄土高原荒漠化风险区的原有格局。其中,极低、低度和极高度敏感区减少了 5.6%,1.1%和 3.8%;与此同时,较低和较高度敏感区增加了 4.4%和 4.5%(附图 9h,表 3)。结合黄土高原环境敏感区生物物理指标 ESAI-SCV(附图 9f)和环境敏感区指标 ESAI(附图 9g)发现,在黄土高原的西北部的大部分地区,荒漠化风险程度在考虑人类指标后明显降低,但在黄土高原东南部人口相对较稠密的地区,荒漠化风险程度略有增加。以上结果表明,一方面,人类活动缩小了不同程度荒漠化之间的差距,说明人类实施的水土保持措施(植树造林、封山禁牧生态措施、坡改梯和淤地坝工程措施等)在荒漠化防治过程中已经发挥作用;另一方面,较高的人口压力和农业人口比重可能加强荒漠化的风险程度,在黄土高原西北部内蒙古地区人口稀少,因人类活动对环境产生的负面影响较低,相反,在黄土高原地区其他城市(如:兰州、西安、宝鸡、咸阳、洛阳等地区)的人口压力较大,人类对环境的过渡索取导致了荒漠化风险程度加剧。因此,在人类活动的影响下,ESAI 与 ESAI-SCV 比较,形成了 ESAI 的新格局。

表 3 ESAI 和 ESAI-SCV 之间的差异

敏感性等级	范围	ESAI-SCV/10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	比例/%	ESAI/10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	比例/%	变化量/%
不敏感	<1.25	0.32	0.5	0.99	1.6	1.1
潜在	1.25~1.34	7.15	11.5	7.35	11.8	0.3
极低	1.35~1.45	18.99	30.5	15.50	24.9	-5.6
低度	1.45~1.50	11.57	18.6	10.87	17.5	-1.1
较低	1.50~1.55	8.50	13.7	11.23	18.0	4.4
较高	1.55~1.60	7.18	11.5	9.97	16.0	4.5
高度	1.60~1.65	4.45	7.1	4.58	7.4	0.2
极高	>1.65	4.09	6.6	1.76	2.8	-3.8
总计		62.26	100.0	62.26	100.0	0.0

### 3 结论

(1) 基于土壤、气候、植被 3 种要素的环境敏感区生物物理指标(ESAI\_SCV)决定了黄土高原荒漠化风险程度的基本格局。其中,土壤因素在某种程度上降低了黄土高原中部的荒漠化风险程度,气候因素决定了黄土高原荒漠化风险程度由东南向西北递减的趋势;植被是指示荒漠化风险程度最显著的指标,因为植被质量指数图和环境敏感区指标图之间具有相似的空间分布模式。

(2) 黄土高原南部荒漠化风险程度较高,这主要归因于较大的人口密度和人类作用于土地的程度,而在北部黄土沟壑区由于实施了水土保持工程措施和生态措施,大幅度地降低了荒漠化风险程度。因此,在加强荒漠化防治工程的同时,还需要控制人口数量来降低人口压力,才能最终减弱荒漠化风险程度。

(3) 通过对比 ESAI 和 ESAI\_SCV 两种荒漠化风险指标发现,一方面,包含人类社会的生态系统比自然生态系统更加多变;另一方面,人类活动缩小了不同程度荒漠化之间的差距。因此,我们应该时刻关注人类活动对黄土高原荒漠化的影响,及时制定包括人类活动因素在内的积极有效的荒漠化防治措施。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Ladisa G, Todorovic M, Trisorio L G. A GIS-based approach for desertification risk assessment in Apulia region, SE Italy[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2012,49(3):103-113.
- [2] 杨军. 柴达木盆地荒漠化成因分析及产生机理探讨[D]. 陕西 西安:长安大学,2004.
- [3] Kosmas Costas, Ferrara Agostino, Briassouli Helen, et al. Methodology for mapping ESAs to desertification [M]// Kosmas C, Kirkby M, Geeson N. The MEDA-LUS Project-Mediterranean Desertification and Land Use. Manual on Key Indicators of Desertification and Mapping Environmentally Sensitive Areas to desertification, EUR18882, 1999:31-47.
- [4] Coscarelli Roberto, Minervino Ivana. Methods for the characterization of areas sensitive to desertification; An application to the Calabrian territory [C] // Sorriso-Valvo. Proceedings of the international conference held at Solsona[J]. Catalonia; IAHS, 2005:298-299.
- [5] 张希彪,上官周平,王金成,等. 陇东黄土高原农牧交错带土地荒漠化过程中自然与人为因素的定量分析[J]. *水土保持通报*,2013,33(2):203-208.
- [6] 中国科学院黄土高原综合科学考察队. 黄土高原地区资源环境社会经济数据集[M]. 北京:中国经济出版社,1992.
- [7] Zhao Yifei, Zou Xinqing, Zhang Jianxiang, et al. Spatio-temporal variation of reference evapotranspiration and aridity index in the Loess Plateau region of China, during 1961—2012 [J]. *Quaternary International*, 2014, 349(10):196-206.
- [8] Li Zhi, Liu Wenzhao, Zhang Xunchang, et al. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2009,377(1/2):35-42.
- [9] Zhang Xunchang, Liu Wenzhao. Simulating potential response of hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tableland region on the Loess Plateau of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005,131(3/4):127-142.
- [10] Sun Wenyi, Shao Quanqin, Liu Jiyuan, et al. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China[J]. *Catena*, 2014, 121(7):151-163.
- [11] Agostino F, Luca S, Adele S A, et al. Performance evaluation and cost assessment of a key indicator system to monitor desertification vulnerability[J]. *Ecological Indicators*, 2012,23(5):123-129.
- [12] Gad A, Lofty I. Use of remote sensing and GIS in mapping the environmental sensitivity areas for desertification of Egyptian territory[J]. *Earth Discussions*, 2008,3(2):41-85.
- [13] Ferrara Agostino. Expert system for evaluating the Environmental Sensitivity Index(ESI) of a local area [EB/OL]. (2005-02-03)[2005-10-23]. [http://www.kcl.ac.uk/projects/desertlinks/indicator system/index. htm](http://www.kcl.ac.uk/projects/desertlinks/indicator%20system/index.htm).
- [14] 王慧芳,邵明安,王国丽. 黄土高原土石山区碎石分布特征及其导水性质分析[J]. *灌溉排水学报*,2010,29(3):116-120.
- [15] Bagnouls Franco. L'indice xéothermique[R]. Paris: Bulletin de l' Association de Géographes français, 1952.
- [16] Sharply A N, Williams J R. Epic-erosion Productivity Impact Calculator (I): Model Documentation [M]. Washington D C: US Department of Agriculture,1990.
- [17] 石建华,喻理飞,孙保平. 陕北地区退耕还林生态健康评价分析研究:以吴起县为例[J]. *水土保持学报*, 2015,29(6):332-336.
- [18] ANPA. Centro Tematico Nazionale Conservazione della Natura. Selezione di indicatori ambientali per itemi relativi alla biosfera[C]. Roma: RTI CTN\_CON, 2000.