网络首发时间：2020-06-24 17:39:06
网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1912.N.20200624.1501.006.html

自然资源学报, 2020, 35(6): 1288-1300 http://www.jnr.ac.cn
Journal of Natural Resources DOI: 10.31497/zrzyxb.20200603

张家口地区生态脆弱性及其影响因素

徐超璇[1]，鲁春霞[2,3]，黄绍琳[2]

（1. 辽宁师范大学地理科学学院，大连 116029；2. 中国科学院地理科学与资源研究所，北京 100101；
3. 中国科学院大学资源与环境学院，北京 100049）

摘要：生态脆弱性是国际社会面对一系列生态问题时无法回避的重点议题，也是生态文明建设与绿色发展研究的热点之一。基于SRP模型，以张家口地区为研究区域，选取14项指标构建张家口地区生态脆弱性评价指标体系，把主成分分析法和地理探测器结合起来，进行张家口地区生态脆弱度以及主要影响因素研究。结果表明：2008—2016年间，张家口地区生态脆弱性明显下降，2008年、2012年和2016年轻度脆弱面积占比分别为27.24%、29.54%和35.57%，生态系统结构与功能正在向良性方向发展；研究区域内生态脆弱性空间分布差异主要与坡度、干旱指数、植被覆盖度和气温等因素的变化有关。基于评价结果，对张家口市生态治理与绿色发展提出建议。

关键词：张家口地区；生态脆弱性；主成分分析；地理探测器；GIS

20世纪60年代的国际生物学计划（IBP）、70年代的人与生物圈计划（MAB）以及80年代开始的生物圈计划（IGBP）都把生态脆弱性作为重要的研究领域[1]，生态脆弱性已成为国际社会面对生态环境问题时不可回避的重点议题，更是当下社会提倡生态文明建设和绿色发展的研究热点。王小丹等[2]综合分析诸多前人对生态脆弱性的解释与定义，总结认为生态脆弱性是一个涉及多学科的综合性概念，指生态环境受到外界干扰作用超出自身的调节范围，而表现出对干扰的敏感程度。当前生态脆弱性研究的内容主要包括系统变化分析、系统自身的敏感性与外部扰动的潜在影响，人地系统的适应性等方面[3]，生态脆弱性评价的主要研究方法包括灰色关联度评价法[4]、层次分析评价法[5]、主成分分析法[6,7]、基于3S技术的综合评价方法等。

从20世纪70年代起，首都圈的环境问题如大气污染、永定河断流等，引起了国家的重视。由于我国环境治理一直按照行政区实施与管理，长期以来忽视了北京及其周边区域生态环境的整体性，极大地影响了生态环境综合治理的效果[8]。张家口毗邻京津，是我国首都圈的生态功能核心区，北京市与张家口地区生态关联极为紧密。随着2015年《京津冀协同发展规划纲要》出台，同年七月北京携手张家口赢得2022年第24届冬季奥林匹克运动会的举办权，张家口迎来了史上前所未有的发展契机，同时也面临来自生态环境保护的更大挑战。

近些年来，张家口地区的生态环境已经成为研究的热点与重点。研究者从不同的角度切入，采用不同的方法分析张家口地区所面临的一系列生境问题。王玫[9]对坝上脆弱生

收稿日期：2019-07-24；**修订日期：**2019-12-13
基金项目：国家水体污染控制与治理科技重大专项（2017ZX07101001）
作者简介：徐超璇（1994- ），女，浙江绍兴人，硕士，研究方向为地理信息系统应用。E-mail: cxhsu@qq.com
通讯作者：鲁春霞（1965- ），女，陕西宝鸡人，博士，副研究员，研究方向为资源开发利用及其生态环境效应。E-mail: lucx@igsnrr.ac.cn

态以及人类干扰活动进行了多角度的描述分析，对坝上地区多年来生态修复工程及经验予以回顾总结，最后提出对策建议。刘超等[10]分析了张家口生态退耕前后的耕地变化，并运用多项Logistic回归模型研究了影响耕地变化的主要因素。田雅楠等[11]基于“源—汇”理论构建张家口景观生态安全格局，针对张家口市生态安全现状提供建构新思路。贾巨才等[12]基于协调发展度模型，构建旅游经济与生态环境指标体系，对2005—2016年张家口市旅游经济与生态环境协调发展度进行定量测度。徐晨曦[13]基于PSR模型构建生态安全评价指标体系，采用层次分析法确权，使用综合指数模型对冀北山区三个时空格局进行生态安全综合评价。总体来看，目前对张家口地区进行整体脆弱性评价的相关研究仍较为薄弱。

本文以张家口地区为研究区域，运用GIS空间主成分分析功能及地理探测器等研究方法，对张家口地区生态脆弱性及其时空分异特征进行评估分析，对影响生态系统脆弱性的因子进行探测，揭示影响区域生态系统的关键因子。其结果可为张家口市的生态保护与生态建设以及京津冀一体化协同发展提供科学依据。

1　研究方法与数据来源

1.1　研究区概况

张家口市地处113°50′~116°30′E、39°30′~42°10′N之间，位于河北省西北部，与北京市、山西省、内蒙古自治区毗邻。全市南北长289.2 km，东西宽216.2 km，幅员面积3.68万km^2，包括桥东区、桥西区、宣化区、下花园区、万全区、崇礼区、张北县、康保县、沽源县、尚义县、蔚县、阳原县、怀安县、怀来县、涿鹿县、赤城县等6个市辖区和10个县（图1）。该地区主要由两大地貌类型组成，其西北部属于内蒙古高原的一部分，俗称“坝上”，海拔在1300~1600 m；其南部、东南部的坝下地区属于山地和冀西北山间盆地地貌形态，大部分地区海拔为500~1000 m[8]。张家口市属温带大陆性季风气候，四季分明，雨热同季，年降水量为330~400 mm，是典型的农牧交错带。植被地域性差异显著，坝上高原区分布少量森林地，大部分地区为温带草原；坝下丘陵盆地地区自然植被较少，植被类型以灌木为主[14]。

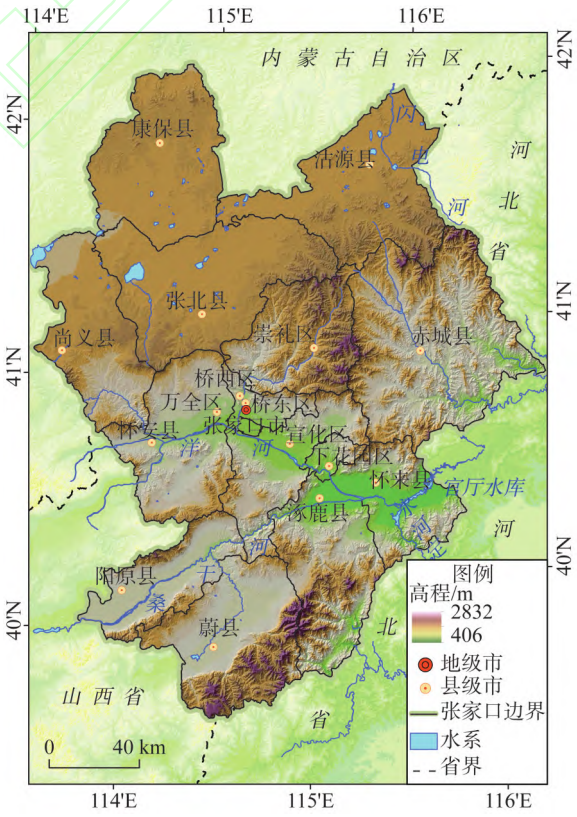

图1　研究区域

Fig. 1　Study area

张家口地处京津冀的上风上水生态区，是冀西北区风沙进入的主要通道，是京津平原地区重要的生态功能涵养

区，是2022年冬奥会的举办城市之一，生态建设与生态安全保障任务十分艰巨。过去几十年来随着经济的迅速发展、城镇规模的不断扩大，张家口地区河流湿地生态系统萎缩、草原退化和耕地沙化现象依然存在，生态系统抗干扰能力差，自我恢复能力低；水资源短缺和水土流失，导致生态环境压力增加，使得生态系统脆弱性问题愈加突出，并已成为制约张家口地区社会经济发展与京津冀生态功能涵养区建设的瓶颈问题之一。开展张家口市生态系统脆弱性研究是维护和提升生态涵养功能，促进生态系统良性发展的基础和关键。

1.2 数据来源与处理

数据主要包括2008年、2012年和2016年张家口地区气象数据、地形数据、社会经济与人口数据以及其他数据等。

气象数据包括气温、降水量、风速风向和蒸散数据等，来自中国气象数据网（http://data.cma.cn/），利用张家口市及周边数个国家气象站点的观测值在ArcGIS软件支持下使用克里金插值法获得栅格数据集，并计算干旱指数。

地形数据包含高程和坡度数据，来自地理空间数据云网站（http://www.gscloud.cn/），根据ArcGIS数字高程模型（DEM）计算获得。

社会经济与人口数据分别由人口密度、经济密度、单位面积生态用地面积占比、单位面积农用地面积占比和人均水资源量等数据组成。人口数据和GDP数据来自中国科学院资源环境科学数据中心提供（http://www.resdc.cn）。各类土地面积数据均从张家口地区土地利用类型数据中提取，土地利用类型数据与水资源数据由中国科学院遥感与数字地球研究所提供。

其他数据包括植被覆盖度、植被净初级生产力（NPP）和土壤侵蚀量等数据。植被覆盖度数据是利用研究年份对应的张家口地区NDVI数据，通过MATLAB像元二分模型计算所得；利用通用土壤流失方程（RUSLE）[15]和北师大风蚀模型计算土壤侵蚀量；NPP数据是基于Thamthwaite Memorial模型结合温度和降水数据计算获得[16]。

1.3 研究方法

1.3.1 评价指标

SRP模型是通过选取与某空间区域和生态脆弱性紧密相关的指标，分别设置每项指标的权重及指数进行相乘，多项累加以求得生态脆弱性指数的一项综合性评价模型，该模型已应用于多个地区的生态脆弱性评价研究中，并取得了一定的成效[17]。该模型由生态敏感性、生态恢复力和生态压力度三个部分组成[6]。在本文中，生态脆弱性是张家口地区的生态系统在受外界干扰影响时所呈现的敏感程度；生态恢复力是在面对干扰之后，该生态系统可以恢复或无限趋近于原有生态状态的能力；生态压力度是指张家口地区的人类社会活动对其生态系统的干扰强度。

依照指标选取的科学性、系统性、可行性等原则，结合张家口地区生态环境的重要性、迫切性和敏感性等，基于生态敏感性—生态恢复力—生态压力度模型，选取2008年、2012年和2016年张家口地区的高程、坡度、年均温、年均降水量、干旱指数、植被覆盖度、单位面积土壤水蚀量、单位面积土壤风蚀量、人均水资源量、植被净初级生产力（NPP）、单位面积生态用地占比、人口密度、经济密度和单位面积农用地占比等14项指标用于构建张家口地区生态脆弱性评价指标体系（表1）。

1.3.2 指标标准化处理方法

由于不同的原始指标没有相同的量级，常常具有不同的单位和不同的变异程度，为了解决量纲的影响，在分析评价之前必须对数据进行标准化处理。本文采用极差标准法[18]，标准化公式如下：

（1）正向指标：

$$A_i = \frac{a_i - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}} \times 10 \qquad (1)$$

（2）负向指标：

$$A_i = \frac{a_{\max} - a_i}{a_{\max} - a_{\min}} \times 10 \qquad (2)$$

式中：i为指标个数（个）；A_i为第i个指标的标准化值，其范围为0~10；a_i为第i个指标的数据；$a_{\min}$为i个指标中的最小值；$a_{\max}$为i个指标中的最大值。正向评价指标值越大，脆弱性越高；负向评价指标越小，脆弱性越高。其中，年均温、年均降水量、植被覆盖度、植被净初级生产力、人均水资源量和单位面积生态用地占比指标为负向指标，其余为正向指标。

表1　张家口地区生态脆弱性SRP模型评价指标体系

Table 1　Evaluation index system of ecological vulnerability SRP model in Zhangjiakou area

目标层	要素层	指标层
生态脆弱性	生态敏感性	高程
		坡度
		年均温
		年均降水量
		植被覆盖度
		干旱指数
		单位面积土壤水蚀量
		单位面积土壤风蚀量
	生态恢复力	人均水资源量
		植被净初级生产力（NPP）
		单位面积生态用地占比
	生态压力度	人口密度
		经济密度
		单位面积农用地占比

1.3.3 空间主成分分析法

本文基于ArcGIS空间分析功能，对张家口地区14个生态脆弱性评价指标因子进行空间主成分分析。通过旋转原变量的空间坐标轴，将多项评价指标降维合成为几个相互无关的综合性因子，在减少数据量的同时又不失原始变量的绝大部分信息。

选取累计贡献率85%以上的主成分替代原始指标因子，以此计算主成分综合指标指数，公式如下：

$$P_j = z_{1j}A_1 + z_{2j}A_2 + z_{3j}A_3 + \ldots z_{nj}A_j \qquad (3)$$

式中：P_j是第j个主成分；z_{1j}, z_{2j}, …, z_{nj}是第j个主成分各项指标因子所对应的特征向量；A_1, A_2, …, A_j为各项指标因子的标准化值。

依据主成分分析结果，利用计算生成的主成分计算张家口地区生态脆弱性指数（EFI），公式[18]如下：

$$EFI = \sum_{x=1}^{n}(m_x \times P_x) \qquad (4)$$

式中：EFI是该研究区域生态脆弱性指数；m_x是第x个主成分所对应的贡献率；P_x为第x个主成分；n是累计贡献率为85%以上的前n个主成分。

1.3.4 生态脆弱性分级

为更直观地度量分类生态脆弱性指数（EFI），对计算结果EFI进行标准化处理，公式[7]如下：

$$S = \frac{EFI - EFI_{\min}}{EFI_{\max} - EFI_{\min}} \qquad (5)$$

式中：S为张家口地区的生态脆弱性指指数标准化值，其范围为0~1；$EFI_{\max}$是该地区生态

脆弱性指数的最大值；EFI_{min}是该地区生态脆弱性指数的最小值。

依据现有的生态脆弱性评价研究的分级指标[7,19]，将张家口地区生态脆弱性划分为5个等级，分别为微度脆弱、轻度脆弱、中度脆弱、重度脆弱和极度脆弱（表2）。

表2 张家口地区生态脆弱性分级标准

Table 2 Classification standard of ecological vulnerability in Zhangjiakou area

脆弱性等级	生态脆弱性指数标准化值	脆弱程度	生态特征
Ⅰ	$0 \leqslant S < 0.2$	微度脆弱	张家口地区生态系统结构功能完善，对外抗干扰能力强，承受生态压力小，生态系统稳定，自我恢复能力强，生态脆弱性低
Ⅱ	$0.2 \leqslant S < 0.4$	轻度脆弱	张家口地区生态系统结构功能较为完整，对外抗干扰能力较强，承受生态压力较小，生态系统较稳定，自我恢复能力较强，生态脆弱性较低
Ⅲ	$0.4 \leqslant S < 0.6$	中度脆弱	张家口地区生态系统结构功能尚可维持，对外抗干扰能力较弱，承受生态压力接近生态阈值，生态系统较不稳定，自我恢复能力较弱，生态脆弱性较高
Ⅳ	$0.6 \leqslant S < 0.8$	重度脆弱	张家口地区生态系统结构功能出现缺陷，对外抗干扰能力弱，承受生态压力大，生态系统不稳定，受损后恢复难度大，生态脆弱性高
Ⅴ	$0.8 \leqslant S \leqslant 1$	极度脆弱	张家口地区生态系统结构功能严重退化，对外抗干扰能力极弱，承受生态压力极大，生态系统极不稳定，受损后恢复难度极大，甚至不可逆转，生态脆弱性极高

1.3.5 地理探测器

地理探测器是由中国科学院地理科学与资源研究所王劲峰团队开发的一种探测空间分异性，以及揭示其背后驱动因子的新统计学方法[20]。该模型假设地理事物存在于特定的空间位置上，其环境影响因子在空间上具有差异性，若某环境因子与地理事物的变化在空间上具有显著一致性，则该环境因子对地理事物的发生与发展具有决定意义[21]。地理探测器模型在应用时没有过多的假设条件，可以克服统计方法处理变量的局限性，因此被广泛应用[22]。该计算模型由四个探测器组成：因子探测器、交互探测器、风险探测器和生态探测器。

本文采用因子探测器和交互探测器对张家口地区生态脆弱性驱动影响因子进行探测分析，从而探究该地区生境脆弱的主要影响因子。其中，因子探测器用于探究张家口地区生态脆弱性在空间上的分异性，并且探测影响其变化的各项因子在多大程度上解释了脆弱性的空间分异，即因子的影响力大小。交互探测器用于识别张家口地区生态脆弱性影响因子之间的两两交互作用以及解释力，交互类型如表3所示。将2008年、2012年和2016年生态脆弱性指数作为因变量Y，使用K-mean分类算法将对应的14项评价指标进行离散化处理，将分类后的连续型变量作为自变量X。q为统计量，表示自变量X对因变量

表3 交互探测器交互作用类型

Table 3 Interaction type of interaction detector

判断依据	交互作用
$q(X1 \cap X2) < \min[q(X1), q(X2)]$	非线性减弱
$\min[q(X1), q(X2)] < q(X1 \cap X2) < \max[q(X1 \cap X2)]$	单因子非线性减弱
$q(X1 \cap X2) > \max[q(X1 \cap X2)]$	双因子增强
$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	相互独立
$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强

Y空间分层差异的影响力度，q值越大，说明自变量X对因变量Y空间分布的影响力越大，p值表示单个因子的解释力度，p值越小，说明自变量X对因变量Y的解释越好[6]。

2 结果分析

2.1 张家口地区生态脆弱性空间分布特征

利用ArcGIS空间分析功能，对2008年、2012年和2016年三年的张家口地区生态脆弱性评价体系中的14项评价因子进行主成分分析，计算获得每个年份对应的14个主成分值，及其特征值λ、贡献率和累计贡献率，计算结果如表4所示。选取累计贡献率为85%以上的前5项主成分，根据式（4）计算2008年、2012年和2016年张家口地区生态脆弱性指数，并参照张家口地区生态脆弱性分级标准（表1），获得该研究区的生态脆弱性空间分级状况图，结果如图2所示。

表4　张家口地区空间主成分分析结果

Table 4　The analysis of the main components of the spatial main components in Zhangjiakou area

主成分	2008年			2012年			2016年		
	特征值λ	贡献率/%	累积贡献率/%	特征值λ	贡献率/%	累积贡献率/%	特征值λ	贡献率/%	累积贡献率/%
P_1	5.249	37.493	37.493	4.599	32.852	32.852	5.289	37.781	37.781
P_2	3.274	23.389	60.882	3.433	24.520	57.372	3.158	22.556	60.337
P_3	1.789	12.780	73.662	2.044	14.598	71.969	1.686	12.046	72.383
P_4	1.345	9.609	83.271	1.450	10.357	82.327	1.501	10.725	83.108
P_5	1.073	7.665	90.935	0.869	6.207	88.534	0.970	6.929	90.037
P_6	0.591	4.218	95.153	0.577	4.123	92.657	0.506	3.615	93.652
P_7	0.344	2.454	97.607	0.453	3.233	95.890	0.431	3.081	96.733
P_8	0.204	1.456	99.063	0.342	2.446	98.336	0.233	1.663	98.397
P_9	0.100	0.717	99.780	0.140	0.999	99.335	0.098	0.700	99.096
P_{10}	0.014	0.101	99.881	0.046	0.328	99.663	0.055	0.392	99.489
P_{11}	0.010	0.069	99.950	0.035	0.251	99.914	0.036	0.255	99.744
P_{12}	0.005	0.035	99.985	0.010	0.071	99.985	0.021	0.153	99.897
P_{13}	0.002	0.012	99.997	0.001	0.010	99.995	0.014	0.101	99.998
P_{14}	0.000	0.003	100.000	0.001	0.005	100.000	0.000	0.002	100.000

2008年张家口地区生态脆弱性指数在0.0028~0.9647范围内。根据图2可知，全市以重度、中度与轻度脆弱度为主，三者总和占比达88.82%。其中，张家口市中心城区的桥东区西部、桥西区中部和邻近的宣化区北部均为极度脆弱区，生态脆弱性极为严重。重度脆弱区主要集中在坝上四县，分布在康保县、张北县、尚义县中北部及沽源县西北部。同时，坝下的涿鹿县北部、怀来县中西部和阳原中部的小部分地区亦为重度生态脆弱区；涿鹿县中部以南、赤城县和崇礼区整体生态脆弱性低，生态系统状况总体良好，为微度脆弱和轻度生态脆弱区。中度脆弱区分布较为分散，坝下蔚县、怀安县、怀来县，坝上的尚义县和沽源县等均有分布。总体来看，张家口市生态脆弱度在空间上呈现自南向北加重、从东向西增强的态势。

2012年张家口地区生态脆弱性指数在0.0129~0.9920范围内，与2008年以重度和中度生态脆弱度为主相比，总体以中度、轻度和微度脆弱性区域为主，三者占比达89.09%。

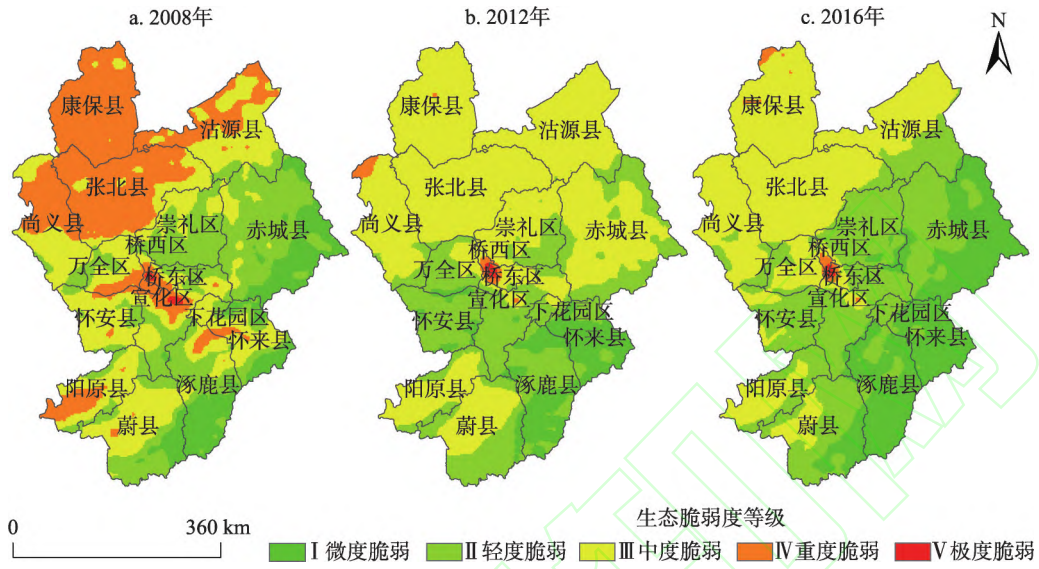

图2 张家口地区生态脆弱性分级图

Fig. 2 Classification map of ecological vulnerability in Zhangjiakou area

在空间分布上，生态脆弱等级自南向北增大趋势明显，即中度生态脆弱区主要分布张家口市的北部地区，轻度和微度脆弱区主要分布在中心城区以南区域。与2008年相比，坝上重度生态脆弱区几乎全部降为中度生态脆弱区，表明坝上地区的生态环境状况有了一定程度好转。坝下的万全区、怀安县、怀来县、宣化区及下花园区大部分地区则从中度脆弱区降为轻度和微度脆弱区，说明其生态系统状况有一定的改善。阳原县与蔚县重度脆弱区转化为中度脆弱区，且中度脆弱区面积与2008年相比，都有所缩小。涿鹿县北部脆弱度改善明显，中度脆弱全部降为轻度或微度脆弱。与此同时，桥东区西部和桥西区中部极度脆弱区域面积比2008年有所扩大；崇礼区与赤城县较2008年的情况相比，中度脆弱的区面积增加，轻度和微度脆弱区范围缩小，由此表明赤城县和崇礼区在2012年，生态环境压力加剧，生态脆弱性增强。

2016年张家口地区生态脆弱性指数在0.0027~0.9862范围内，整体以中度、轻度和微度脆弱为主，三者总和占比达98.71%。在空间上总体呈现自东南向西北生态脆弱度从微度和轻度向中度变化，即东南部大部分地区为微度脆弱，中部地区为轻度脆弱，西北部即坝上四县为中度脆弱。其中桥东区西部和桥西中部仍属于张家口地区生态脆弱性最严重的区域，为极度脆弱，但与2012年的状况相比，极度脆弱的区域面积减少；万全区和怀安县西部，均由2012年的轻度脆弱变为中度脆弱，生态承载压力增大；阳原县和蔚县中西部区域仍属于中度脆弱，但范围与2012年相比，逐渐向西部缩小。

从数量上看，2008年、2012年和2016年三个年份张家口地区不同脆弱度等级所对应面积占比（图3）。2008年微度脆弱面积、轻度脆弱面积、中度脆弱面积、重度脆弱面积和极度脆弱面积占比分别为10.84%、27.24%、30.96%、30.62%和0.34%，其中中度脆弱面积占比最大，极度脆弱占比最小。2012年微度、轻度、中度、重度和极度脆弱面积占比分别为10.03%、29.54%、59.55%、0.61%和0.27%，其中中度脆弱面积占比最大，极度脆弱占比最小。2016年微度、轻度、中度、重度和极度脆弱面积占比分别为23.44%、35.57%、39.70%、1.15%和0.14%，其中中度脆弱面积占比最大，极度脆弱占比最小。上

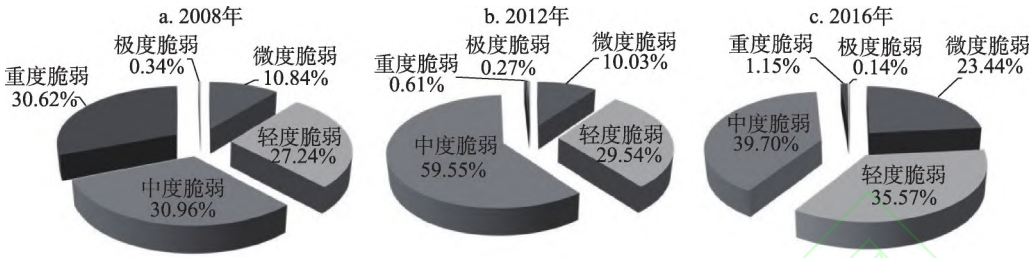

图3　张家口区域脆弱度状况

Fig. 3　Ecological vulnerability of Zhangjiakou

述数据表明，在2008—2016年间，张家口市重度和极度生态脆弱区占比从30.96%下降为1.29%；微度和轻度生态脆弱区占比从38.08%扩大为69.01%。显然，张家口市整体上生态系统脆弱性有明显下降，生态压力得到缓解，生态系统结构与功能正在向良性方向发展。

根据县区行政单元提取对脆弱度均值，做简单的定义归类，结果如表5所示。结合图2与表5可知，自2008—2016年，张家口各区县生态脆弱度总体上呈现降低趋势，生态环境总体向好的态势颇为显著。从区县单元来看，坝上四县的生态脆弱度普遍较坝下区县高，属于中度和重度脆弱区，生态承载能力弱，抗外界干扰能力低，因而一直是张家口生态环境敏感性高，必须重点关注的生态脆弱区。位于坝下地区的桥东区西部和桥西区中部以城市建成区为主体，人类活动干扰强度大，生态负荷过载，长期处于极度脆弱状态。坝下区县生态脆弱度等级相对较低，以微度脆弱和轻度脆弱度为主，从2008—2016年间，总体保持了相对稳定的状态。但需要注意的是崇礼区和赤城县在2012年生态脆弱度出现了反弹，从以微度和轻度为主转变为中度，到2016年又恢复为微度和轻度为主。

表5　张家口县级区生态脆弱度

Table 5　Ecological vulnerability of Zhangjiakou county-level areas

区县	生态脆弱度			区县	生态脆弱度		
	2008年	2012年	2016年		2008年	2012年	2016年
尚义县	中度脆弱	中度脆弱	中度脆弱	张北县	重度脆弱	中度脆弱	中度脆弱
康保县	重度脆弱	中度脆弱	中度脆弱	沽源县	中度脆弱	中度脆弱	轻度脆弱
万全区	中度脆弱	轻度脆弱	中度脆弱	赤城县	轻度脆弱	中度脆弱	微度脆弱
下花园区	中度脆弱	轻度脆弱	轻度脆弱	崇礼区	轻度脆弱	中度脆弱	轻度脆弱
涿鹿县	轻度脆弱	轻度脆弱	微度脆弱	怀安县	中度脆弱	轻度脆弱	轻度脆弱
阳原县	中度脆弱	中度脆弱	中度脆弱	桥西区	重度脆弱	中度脆弱	中度脆弱
蔚县	轻度脆弱	轻度脆弱	轻度脆弱	桥东区	中度脆弱	中度脆弱	中度脆弱
怀来县	轻度脆弱	微度脆弱	微度脆弱	宣化区	中度脆弱	轻度脆弱	轻度脆弱

注：尚义县、康保县、张北县和沽源县为坝上地区，其余为坝下地区。

2.2 张家口地区生态脆弱性空间分异驱动机制分析

张家口地区生态脆弱性在空间上呈现了不同的表现力，为探究影响其变化的机制，本文将14项生态脆弱性评价指标作为自变量，将计算获得的生态脆弱性指数作为因变量带入到地理探测器模型中，进行探究分析。

因子探测器计算结果显示（表6），2008年张家口地区生态脆弱性影响因子解释力最

表6 张家口地区因子探测结果

Table 6 Detection results of factors in Zhangjiakou area

影响因子	q值			影响因子	q值		
	2008年	2012年	2016年		2008年	2012年	2016年
高程	0.158	0.217	0.148	单位面积土壤风蚀量	0.132	0.196	0.098
坡度	0.814	0.321	0.625	人均水资源量	0.116	0.473	0.355
年均温	0.367	0.535	0.539	植被净初级生产力	0.360	0.507	0.502
年均降水量	0.416	0.150	0.784	单位面积生态用地占比	0.768	0.254	0.456
干旱指数	0.471	0.342	0.725	人口密度	0.025	0.051	0.056
植被覆盖度	0.597	0.287	0.637	经济密度	0.023	0.048	0.052
单位面积土壤水蚀量	0.132	0.196	0.098	单位面积农用地占比	0.736	0.234	0.432

强的前五个因素为坡度、单位面积生态用地占比、单位面积农用地占比、植被覆盖度和干旱指数；2012年生态环境脆弱性影响因子解释力最强的前五个因素为年均温、植被净初级生产力、人均水资源量、干旱指数和坡度；2016年生态环境脆弱性影响因子解释力最强的前五个因素为年均降水量、干旱指数、植被覆盖度、坡度和年均温。由此可知，长期以来坡度、干旱程度、植被覆盖度和气温是影响张家口地区生态脆弱性变化的主要影响因子。

交互探测器结果显示（图4），张家口地区2008年、2012年和2016年度生态脆弱性评价14项评价因子在进行交互探测之后分别产生了91项交互协同作用结果。2008年$q(X1\cap X2)$值最大为0.881，最小为0.132。根据因子两两交互作用结果可以分为两类，双因子增强69项，非线性增强22项。2012年$q(X1\cap X2)$值最大为0.751，最小为0.196，双因子增强53项，非线性增强38项。2016年$q(X1\cap X2)$值最大为0.892，最小为0.098，双因子增强67项，非线性增强24项。其中，2008年植被覆盖度与单位面积生态用地占比两两变量之间交互作用最强，对张家口地区生态脆弱性分布变化具有最强解释力；2012年人均水资源量与坡度两两变量之间交互作用最强，对张家口地区2012年的生态脆弱性分布变化具有最强解释力；2016年年均降水量和坡度这两项变量之间交互作用最强，对该年的生态脆弱性分布空间变化具有最强解释力。也就是说坡度、干旱指数和植被覆盖度是张家口市生态脆弱性的关键驱动因子。

3 结论与讨论

3.1 结论

2008—2016年间，张家口地区生态脆弱性逐步改善。2008年重度脆弱区面积占比为30.62%，到2016年减少为1.15%，重度生态脆弱性区域缩小趋势非常显著，比原来减少了29.47%；中度脆弱区范围变化幅度大，2008年面积占比为30.96%，到2012年急剧扩大到59.55%，到2016年又减少为39.70%，总体增加了8.74%；轻度脆弱区范围扩大趋势也颇为明显，面积占比从27.24%增大到35.57%，增加了8.33%；微度生态脆弱区的面积增加幅度十分显著，面积占比从2008年的10.84%上升为23.44%，增大了12.60%。不同生态脆弱度等级面积的变化表明，近十年中，张家口地区生态脆弱性在持续下降，生态环境压力逐步减小，生态系统抗干扰能力持续增强。在空间上，张家口地区生态脆弱性呈现自南向北由低转高的格局特征，这与坝上与坝下地区的自然环境特点是一致的。坝

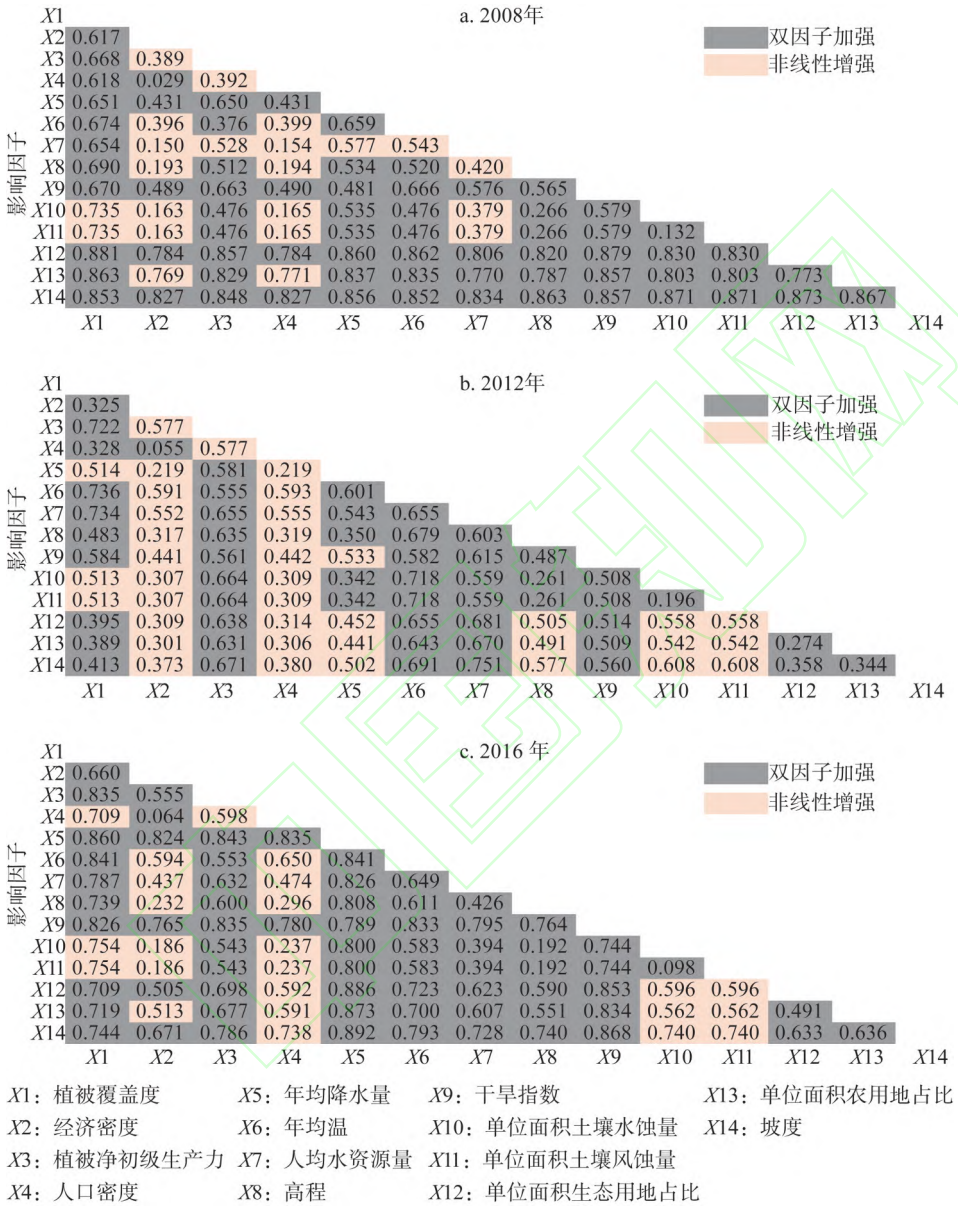

图4　交互探测器结果

Fig. 4　Interactive detector results

上地区生态环境受海拔高度以及干旱程度影响，生态脆弱度总体较高。2008年属于重度脆弱区，2012年之后整体呈现中度脆弱状态，承受生态压力接近生态阈值，生态系统稳定性差，自我恢复能力较弱；坝下地区整体呈现轻度脆弱，生态系统结构功能总体上向良性方向发展，对外抗干扰能力较强，自我恢复能力较强。

综合地理探测器分析结果表明，不同的年份影响当年生态脆弱性分布的因子不同，但坡度、干旱指数、气温和植被覆盖度是影响该区域生态脆弱性的主要影响因子。坡度越陡，干旱指数越高，气温越低，植被覆盖度越低，都会加剧生态脆弱性增强，生境承载能力降低，生态系统结构功能加剧退化，对外抗干扰能力减弱，使得生态系统越不稳

定，甚至难以恢复。总结91项交互协同作用结果，任意两因子之间的交互作用都对张家口地区生态脆弱性的影响力都要大于单因子自身作用的解释力，说明该区域的生态环境脆弱性是受多因素共同影响作用的结果。

3.2 讨论

绿水青山就是金山银山。结合空间主成分分析与地理探测器探究结果，张家口地区生境现状尚可。在维持好现状的情况下，降低全市生态脆弱性，继续提升区域生态系统结构与功能，增强生态环境承载力工作刻不容缓。张家口地区应当大力发展以旅游业、服务业为主的第三产业，引入先进农业技术，发展节能减排低消耗为主的精准生态农业。利用全地区生态区位优势，依靠绿色产业带动当地经济发展，减轻区域生态环境压力。

本文根据现有半干旱区研究成果，结合张家口地区实际情况选取了14项指标建立评价体系评估研究区域2008—2016年生态脆弱性状况。在选取评价指标时因数据的可获得性，没有进一步细化人类活动对该区域生态脆弱性的影响，将在后续研究中进一步完善。

参考文献(References):

[1] 田亚平, 常昊. 中国生态脆弱性研究进展的文献计量分析. 地理学报, 2012, 67(11): 1515-1525. [TIAN Y P, CHANG H. Bibliometric analysis of research progress on ecological vulnerability in China. Acta Geographica Sinica, 2012, 67 (11): 1515-1525.]

[2] 王小丹, 钟祥浩. 生态环境脆弱性概念的若干问题探讨. 山地学报, 2003, 2003(s1): 21-25. [WANG X D, ZHONG X H. Approaches to concept of vulnerability of ecology and environment. Journal of Mountain Science, 2003, 2003(s1): 21-25.]

[3] 徐广才, 康慕谊, 贺丽娜, 等. 生态脆弱性及其研究进展. 生态学报, 2009, 29(5): 2578-2588. [XU G C, KANG M Y, HE L N, et al. Advances in research on ecological vulnerability. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2578-2588.]

[4] 郭婧, 魏珍, 任君, 等. 基于熵权灰色关联法的高寒贫困山区生态脆弱性分析: 以青海省海东市为例. 水土保持通报, 2019, 39(3): 191-199. [GUO J, WEI Z, REN J, et al. Analysis on ecological vulnerability in high cold poverty-stricken mountainous Areas based on entropy and gray correlation method: A case study of Haidong city, Qinghai province. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3): 191-199.]

[5] 马真臻, 王忠静, 顾艳玲, 等. 中国西北干旱区自然保护区生态脆弱性评价: 以甘肃西湖、苏干湖自然保护区为例. 中国沙漠, 2015, 35(1): 253-259. [MA Z Z, WANG Z J, GU Y L, et al. Ecological vulnerability assessment of nature reserve in arid region of Northwest China: A case study of the Xihu Nature Reserve and the Suganhu Nature Reserve in Gansu. Journal of Desert Research, 2015, 35(1): 253-259.]

[6] 朱琪, 周旺明, 贾翔, 等. 长白山国家自然保护区及其周边地区生态脆弱性评估. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1633-1641. [ZHU Q, ZHOU W M, JIA X, et al. Ecological vulnerability assessment on Changbai Mountain National Reserve and its surrounding areas. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(5): 1633-1641.]

[7] 王钰, 胡宝清. 西江流域生态脆弱性时空分异及其驱动机制研究. 地球信息科学学报, 2018, 20(7): 947-956. [WANG Y, HU B Q. Spatial and temporal differentiation of ecological vulnerability of Xijiang River in Guangxi and its driving mechanism based on GIS. Journal of Geo-Information Science, 2018, 20(7): 947-956.]

[8] 王宝钧, 宋翠娥, 傅桦. 京张区域生态与环境特征及问题分析. 干旱区研究, 2008, (4): 537-543. [WANG B J, SONG C E, FU H. Analysis on the environment features and problems in the Beijing-Zhangjiakou region. Arid Zone Research, 2008, (4): 537-543.]

[9] 王玫. 河北坝上生态脆弱性及治理思路建议. 经济论坛, 2018, (10): 11-15. [WANG M. Ecological vulnerability and suggestions on treatment in Hebei Dam. Economic Forum, 2018, (10): 11-15.]

[10] 刘超, 霍永伟, 许月卿, 等. 生态退耕前后张家口市耕地变化及影响因素识别. 自然资源学报, 2018, 33(10): 1806-1820. [LIU C, HUO Y W, XU Y Q, et al. Changes in cultivated land and influencing factors before and after the implementation of grain for green project in Zhangjiakou city. Journal of Natural Resources, 2018, 33(10): 1806-1820.]

[11] 田雅楠, 张梦晗, 许荡飞, 等. 基于“源—汇”理论的生态型市域景观生态安全格局构建. 生态学报, 2019, 39(7): 2311-

2321. [TIAN Y N, ZHANG M H, XU D F, et al. Landscape ecological security patterns in an ecological city, based on source-sink theory. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2311-2321.]

[12] 贾巨才, 孔伟, 任亮. 京津冀协同发展背景下冀西北地区旅游经济与生态环境协调发展研究. 中国农业资源与区划, 2019, 40(2): 167-173. [JIA J C, KONG W, REN Y. Research on coordinated development on tourism economy and ecological environment in the northwest of Hebei province under the background of coordinated development of Beijing-Tianjin-Hebei. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(2): 167-173.]

[13] 徐晨曦. 冀北山区生态安全综合评价与演化机制研究. 石家庄: 河北师范大学, 2008. [XU C X. Research on comprehensive evaluation and evolution mechanismon of ecological security in northern mountain of Hebei province. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2008.]

[14] 刘雅爱, 葛京凤, 梁彦庆, 等. 基于PSR模型的张家口地区生态安全综合评价. 水土保持通报, 2013, 33(3): 270-274. [LIU Y A, GE J F, LIANG Y Q, et al. Integrated assessment of ecological security in Zhangjiakou rigion of Hebei province based on PSR model. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(3): 270-274.]

[15] 黄麟, 曹巍, 吴丹, 等. 西藏高原生态系统服务时空格局及其变化特征. 自然资源学报, 2016, 31(4): 543-555. [HUANG L, CHAO W, WU D, et al. The temporal and spatial variations of ecological services in the Tibet Plateau. Journal of Natural Resources, 2016, 31(4): 543-555.]

[16] 李惠梅, 张安录, 高泽兵, 等. 青海湖地区生态系统服务价值变化分析. 地理科学进展, 2012, 31(12): 1747-1754. [LI H M, ZHANG A L, GAO Z B, et al. Quantitative analysis of the impacts of climate and socio-economic driving factors of land use change on the ecosystem services value in the Qinghai Lake Area. Progress in Geography, 2012, 31(12): 1747-1754.]

[17] 李永化, 范强, 王雪, 等. 基于SRP模型的自然灾害多发区生态脆弱性时空分异研究: 以辽宁省朝阳县为例. 地理科学, 2015, 35(11): 1452-1459. [LI Y H, FAN Q, WANG X, et al. Spatial and temporal differentiation of ecological vulnerability under the frequency of natural hazard based on SRP model: A case study in Chaoyang county. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(11): 1452-1459.]

[18] 郭兵, 孔维华, 姜琳. 西北干旱荒漠生态区脆弱性动态监测及驱动因子定量分析. 自然资源学报, 2018, 33(3): 412-424. [GUO B, KONG W H, JIANG L. Dynamic monitoring of ecological vulnerability in arid desert ecological region of Northwest China and the quantitative analysis of its driving forces. Journal of Natural Resources, 2018, 33(3): 412-424.]

[19] 马骏, 李昌晓, 魏虹, 等. 三峡库区生态脆弱性评价. 生态学报, 2015, 35(21): 7117-7129. [MA J, LI C X, WEI H, et al. Dynamic evaluation of ecological vulnerability in the Three Gorges Reservoir region in Chongqing Municipality, China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(21): 7117-7129.]

[20] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. [WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.]

[21] 廖颖, 王心源, 周俊明. 基于地理探测器的大熊猫生境适宜度评价模型及验证. 地球信息科学学报, 2016, 18(6): 767-778. [LIAO Y, WANG X Y, ZHOU J M. Suitability assessment and validation of giant panda habitat based on geographical detector. Journal of Geo-Information Science, 2016, 18(6): 767-778.]

[22] 吕晨, 蓝修婷, 孙威. 地理探测器方法下北京市人口空间格局变化与自然因素的关系研究. 自然资源学报, 2017, 32(8): 1385-1397. [LYU C, LAN X T, SUN W. A study on the relationship between natural factors and population distribution in Beijing using geographical detector. Journal of Natural Resources, 2017, 32(8): 1385-1397.]

Study on ecological vulnerability and its influencing factors in Zhangjiakou area

XU Chao-xuan[1], LU Chun-xia[2,3], HUANG Shao-lin[2]

(1. School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China;
2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;
3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Ecological vulnerability is one of the key issues that the international community cannot avoid in the face of a series of ecological problems. It is also one of the hot spots in the research of ecological civilization construction and green development. The paper, based on the SRP model, takes Zhangjiakou area as the research area, and selects 14 indexes to construct the index system of ecological vulnerability assessment in the study area, and combines the principal component analysis method with geodetector to carry out the research and analysis of the ecological vulnerability and its main driving factors in Zhangjiakou city. The results showed that in space, the ecological vulnerability of Zhangjiakou was characterized by a low to high pattern from the south to the north, which was consistent with the natural environmental characteristics of Bashang plateau (at a higher altitude) and the area below Bashang. The ecological vulnerability of Zhangjiakou decreased significantly from 2008 to 2016, and the proportion of light vulnerable area in 2008, 2012 and 2016 was 27.24%, 29.54% and 35.57%, respectively. In the last nine years, the proportions of severe and extremely ecologically vulnerable areas decreased from 30.96% to 1.29%, and the proportion of slightly and lightly ecologically vulnerable areas increased from 38.08% to 69.01%. The structure and function of ecosystem was developing in a positive direction. And the spatial distribution differences of ecological vulnerability in Zhangjiakou area were mainly related to the changes of slope, drought index, vegetation coverage and temperature. Due to high altitude, drought and less rain, the ecological fragility of Bashang plateau was generally high. The whole area below Bashang is slightly fragile, the ecological systems may have strong resistance to external interference, and the ability of self-recovery is strong. The results of 91 interactions indicate that the interaction between any two factors had greater influence on the ecological vulnerability of Zhangjiakou than the effect of any single factor, indicating that the ecological vulnerability of the region was affected by many factors. Based on the evaluation results of spatial principal component analysis and geodetector findings, suggestions for the development of ecological management in Zhangjiakou city are put forward.

Keywords: Zhangjiakou area; ecological vulnerability; principal component analysis; geodetector; GIS