

# 西北干旱区生态承载力监测及安全格局构建

张学渊<sup>1</sup>, 魏伟<sup>1</sup>, 颀斌斌<sup>2</sup>, 郭泽呈<sup>1</sup>, 周俊菊<sup>1</sup>

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 兰州城市学院/旅游学院, 兰州 730070)

**摘要:** 以西北干旱区为研究区, 通过引入生态环境弹性力、资源环境供容力、社会经济压力三个准则层, 建立了生态承载力综合评价体系。在此基础上运用空间主成分分析法(SPCA)对西北干旱区2000年、2007年、2012年、2016年四期生态承载力时空变化进行监测评估, 进而构建生态安全格局。研究结果表明: 西北干旱区生态承载力以弱承载为主, 且在研究时段弱承载区面积不断下降, 而强承载区面积有上升趋势; 从空间分布看, 河西地区、北疆地区、内蒙古西部地区生态承载力呈上升趋势, 而南疆地区则有所下降; 利用MCR模型提取道路型廊道、河流型廊道、绿色廊道共51条, 总长度7285.43 km; 提取重要斑块区节点、河流湿地区节点、生态脆弱区节点等共71个。根据计算结果将西北干旱区划分为16个生态安全格局, 并结合生态承载力变化情况, 对现有的安全格局进行布局优化, 以期对西北干旱区生态环境的保护和恢复治理提供科学参考。

**关键词:** 生态承载力; 时空演变; 生态安全格局; 优化; 西北干旱区

随着人类对自然资源的需求越来越大, 社会经济同自然环境之间的矛盾日益突出<sup>[1]</sup>, 资源环境承载力也超出了能够承受的范围, 因此关于不同区域的生态承载力研究引起了众多生态学家、地理学家和经济学家的关注, 尤其是中国政府提出生态文明建设以来, 关于资源环境承载力的评估从研究层面上升到了实践执行层面。2016年9月28日, 国家发改委联合12个部委下发了“关于印发《资源环境承载能力监测预警技术方法(试行)》的通知”, 通知要求各省开展以县级行政区为单元的资源环境承载能力试评价工作。由此可见, 建立资源环境承载能力监测及预警机制, 对水土资源超载区域实行限制性措施, 是中央全面深化改革的一项重大任务。通过资源环境超载状况的监测和评价, 对区域可持续发展状态进行诊断和预判, 为制定差异化、可操作的限制性措施奠定基础, 是区域空间规划和主体功能区规划的基础。生态承载力是资源环境承载力研究中最重要、也最为基础的内容, 生态承载力的状况直接决定了区域资源环境承载力的发展变化<sup>[2]</sup>。从生态承载力概念角度来看, 高吉喜等<sup>[3]</sup>、曹智等<sup>[4]</sup>从不同的角度对生态承载力做了分析, 一致认为生态承载力是生态环境自我维持力、资源环境供容力及其可支撑的社会经济压力; 并指出资源承载力是生态承载力的基础, 环境承载力是生态承载力的约束条件, 生态环境弹性力是生态承载力的支持条件。就西北干旱区而言, 生态承载力的概念, 是在确保资源的合理开发利用和生态环境良性循环发展的条件下社会经济可持续发

收稿日期: 2019-04-21; 修订日期: 2019-08-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41861040, 41761047)

作者简介: 张学渊(1995-), 男, 山西晋中人, 硕士, 主要从事资源环境遥感和GIS的应用研究。

E-mail: 714347818@qq.com

通讯作者: 魏伟(1982-), 男, 甘肃兰州人, 博士, 副教授, 主要从事资源环境遥感和GIS的应用研究。

E-mail: weiweigis2006@126.com

展的能力<sup>[5]</sup>。从研究方法上看,不同领域的学者运用状态空间法<sup>[6]</sup>、综合评价法<sup>[7]</sup>、生态足迹法<sup>[8]</sup>、社会—生态指标体系<sup>[9]</sup>以及其他多种方法对生态承载力进行了深入研究<sup>[10]</sup>。从研究区域看,纪学朋等<sup>[6]</sup>从生态功能弹性力、资源环境供容量和社会经济协调力三个维度选取16个指标运用状态空间法对甘肃省生态承载力进行定量评价。肖俞等<sup>[7]</sup>则基于综合评价承载力模型,从生态压力、生态弹性两个角度对云南省易门县的区域生态承载力进行评价。杨屹等<sup>[8]</sup>分析了榆林生态足迹动态变化及其驱动因素。上述专家从不同的研究区对生态承载力进行评价分析。由于各研究区的研究层次、研究尺度、研究指标不一致,造成构建的生态承载力差异较大,很难对不同研究区的研究结果进行统一。因此,对于西北干旱区独特的地理特征,需要建立一套科学、规范、可行的生态承载力评价体系。

西北干旱区是中国典型的生态承载力低值区<sup>[11]</sup>。近年来,随着气候条件的变化和人类活动的干预,西北干旱区生态系统普遍退化,主要表现在植被覆盖率低、土地退化指数高、生物丰度指数低、资源压力大、经济结构不合理等方面。基于此,本文选取2000年(西部大开发初期)、2007年(经济快速发展期)、2012年(生态恢复期初期)、2016年(“五位一体”布局确立)等研究区生态环境政策发生变化的四个阶段,选取地形、水文、土壤、植被、人口、经济等17个指标,采用空间主成分分析法<sup>[12]</sup>,对四期的生态承载力进行监测、分级、评估,分析生态承载力的总体特征和时空变化。提取生态承载力较高的地区作为生态优势区,取交集作为生态源地,并与重要的水源、林地取并集得到最终生态源地。利用最小累积阻力模型,将西北干旱区分为16个生态安全格局分区,提取了三种生态廊道和三种生态节点,基于研究区生态承载力的变化趋势,对生态安全格局进行优化布局设计,为研究区生态保护和生态发展提供建议和对策。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

中国西北干旱区<sup>[13]</sup>位于亚洲中部,东部以贺兰山为界,南至昆仑山—阿尔金山—祁连山,北侧与西侧以国境线为界,介于73°~107°E和35°~50°N之间(图1)。行政区上包括新疆全境,甘肃河西五市及内蒙古阿拉善盟的广大地区。总面积达 $2.09 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,约占中国总面积的1/5。区内深居内陆,距海遥远,多为年降水量小于200 mm的极端干旱区,属典型的大陆性气候。地势起伏较大,地形以高原、山地、盆地为主,其中包括内蒙古高原、阿尔泰山山脉、天山山脉、昆仑山脉、阿尔金山脉、祁连山脉、准格尔盆地、吐鲁番盆地和塔里木盆地。

### 1.2 数据来源

NDVI数据来源于美国国家航天航空局的地球观测系统EOS/MODIS数据集中的数据产品,是全球NDVI月产品数据,空间分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 。DEM数据的空间分辨率为

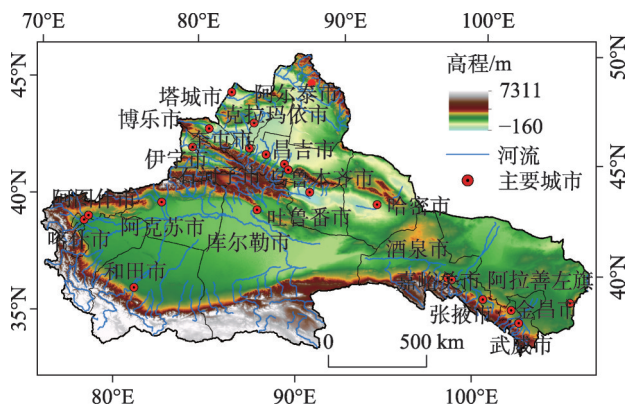


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the arid areas of northwest China

1 km×1 km，用于提取西北干旱区海拔、坡度和水网密度等信息。降水、温度、湿度数据利用中国气象数据网提供的西北干旱区79个站点2000年、2007年、2012年、2016年逐月降水观测数据、温度数据、湿度数据，基于ArcGIS 10.2软件平台，运用克里金插值法<sup>[14]</sup>进行空间插值，以实现数据空间化。西北干旱区土地利用数据（2000年、2005年、2010年、2015年）、土壤有机质数据、土壤侵蚀数据、行政边界矢量数据从中国科学院资源环境科学数据中心获取（<http://www.resdc.cn>）。社会经济统计数据包括2000年、2007年、2012年、2016年的《甘肃省统计年鉴》《新疆统计年鉴》《内蒙古统计年鉴》。

1.3 指标体系构建

本文目的是对西北干旱区生态承载力进行监测评估，因此，将生态承载力作为评价目标层，将准则层设置为生态环境弹性力<sup>[3]</sup>、资源环境供容力<sup>[5]</sup>、社会经济压力<sup>[15]</sup>。生态环境弹性力反映支持自然环境和人类社会发展的本底条件，考虑到西北干旱区水资源缺乏，植被稀疏等自然条件，在指标选取时需要考虑年降水量、生物丰度、地形、土壤等方面的因素；资源环境供容力主要反映资源环境与人类社会的协调程度，因此在指标的选取时主要考虑人均资源保有量和经济发展水平；社会经济压力，即社会经济的发展给资源环境带来的压力，直接反映社会经济发展中存在的问题，因此选取人口指标、经济指标作为指标层。最终，遴选出17项结构完整、易于统计的指标（表1）。

1.4 数据处理

表1 西北干旱区生态承载力评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of ecological carrying capacity in arid areas of Northwest China

目标层	准则层	指标层
生态承载力	生态环境弹性力	年降水量、水网密度指数、土地退化指数、生物丰度指数、归一化植被指数、土壤有机质含量、地形位指数、温湿指数
	资源环境供容力	人均耕地面积、人均林地面积、第三产业占GDP比例
	社会经济压力	人口密度、经济密度、城市化率、第一产业增长率、第二产业增长率、GDP增长率

根据研究需要对原始数据进一步处理。年降水量根据中国气象数据网提供的西北干旱区气象站点数据基于ArcGIS 10.2软件平台，运用克里金插值法进行空间插值，以实现数据的空间化。水网密度指数、土地退化指数、生物丰度指数参考《生态环境状况评价技术规范（2015年）》<sup>[16]</sup>，地形位指数参考喻红<sup>[17]</sup>的相关研究成果，温湿指数参考孙根年等<sup>[18]</sup>的相关研究成果。

各指标之间单位不统一，量纲不同，没有可比性，无法进行生态承载力的计算。因此，对所有数据进行标准化处理是必要的。本文依据西北干旱区的地域特征，使用极差标准化法对各指标进行归一化处理。正向指标代表着指标数值越大，生态承载力越高，逆向指标则反之。其中，正向指标包括年降水量、水网密度、生物丰度指数、归一化植被指数、土壤有机质含量、地形位指数、人均耕地面积、人均林地面积、第三产业占GDP比重、温湿指数、城市化率，负向指标包括土地退化指数、人口密度、经济密度、第一产业增长率、第二产业增长率、GDP增长率。其公式<sup>[19]</sup>为：

正向指标：

$$R_i=(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})$$

(1)

负向指标:

$$R_i=(X_{\max}-X_i)/(X_{\max}-X_{\min}) \tag{2}$$

式中： $R_i$ 代表第*i*指标的标准化值； $X_i$ 为各指标的实际值； $X_{\max}$ 为各指标的最大值； $X_{\min}$ 为各指标的最小值。

1.5 空间主成分分析

空间主成分分析（SPCA）是基于多维空间算法的原理，通过分析各指标之间的相关关系，将一部分噪声数据去除，从而将原数据转化为几个综合性的图层。因其在整个过程中都是通过数理统计进行计算，没有人为主观打分，因此，评价结果有很强的客观性。本文在ArcGIS 10.2软件平台上，将指标层中的评价指标标准化后进行空间主成分分析（表2），计算出生态承载力的值，计算公式<sup>[12]</sup>为：

$$ECC=r_1Y_1+r_2Y_2+r_3Y_3+\cdots+r_nY_n \tag{3}$$

式中： $ECC$ 为生态承载力指数； $r_i$ 为第*i*个主成分； $Y_i$ 为第*i*个主成分的贡献率。根据空间主成分分析法，由式（3）得出西北干旱区生态承载力指数。

表2 空间主成分分析结果  
Table 2 Results of spatial principal component analysis

主成分 因子	特征值				贡献率				累计贡献率			
	2000年	2007年	2012年	2016年	2000年	2007年	2012年	2016年	2000年	2007年	2012年	2016年
P1	0.102	0.100	0.100	0.104	37.896	31.749	35.800	34.312	37.896	31.749	35.800	34.312
P2	0.048	0.063	0.051	0.060	17.840	19.866	18.070	19.942	55.736	51.615	53.870	54.254
P3	0.034	0.042	0.036	0.035	12.556	13.214	12.920	11.749	68.293	64.829	66.790	66.003
P4	0.017	0.025	0.024	0.024	6.308	7.955	8.632	7.920	74.600	72.784	75.421	73.923
P5	0.016	0.018	0.014	0.016	5.948	5.728	4.823	5.413	80.549	78.512	80.244	79.337
P6	0.012	0.016	0.013	0.014	4.390	5.053	4.576	4.554	84.938	83.565	84.820	83.891
P7	0.009	0.011	0.010	0.010	3.483	3.529	3.574	3.447	88.421	87.094	88.394	87.338

$$ECC_{2000}=0.3790\times P1+0.1784\times P2+0.1256\times P3+0.0631\times P4+0.0595\times P5+0.0439\times P6+0.0348\times P7 \tag{4}$$

$$ECC_{2007}=0.3175\times P1+0.1987\times P2+0.1321\times P3+0.0795\times P4+0.0573\times P5+0.0458\times P6+0.0357\times P7 \tag{5}$$

$$ECC_{2012}=0.3580\times P1+0.1807\times P2+0.1292\times P3+0.0863\times P4+0.0482\times P5+0.0458\times P6+0.0357\times P7 \tag{6}$$

$$ECC_{2016}=0.3431\times P1+0.1994\times P2+0.11175\times P3+0.0792\times P4+0.0541\times P5+0.0455\times P6+0.0345\times P7 \tag{7}$$

式中： $ECC_{2000}$ 、 $ECC_{2007}$ 、 $ECC_{2012}$ 、 $ECC_{2016}$ 分别为2000年、2007年、2012年、2016年生态承载力指数； $P1\sim P7$ 为原始数据进行空间降维后的前7个主成分因子。前7个主成分因子的累计贡献率超过85%，剩余的主成分因子经对比发现，与实际生态承载力结果不符，因此认定其为噪声，将其舍弃<sup>[12]</sup>。在实际研究中通常采用定性方法进行分析，为便于对生态承载力（ $ECC$ ）进行对比分析，对 $ECC$ 进行标准化处理，其公式为：

$$SI_{ECC}=\frac{ECC_i-ECC_{\min}}{ECC_{\max}-ECC_{\min}} \tag{8}$$

式中： $SI_{ECC}$ 为生态承载力指数的标准化值，值域为0~1； $ECC_i$ 为生态承载力指数的实际



值； $ECC_{min}$ 为生态承载力指数的最小值； $ECC_{max}$ 为生态承载力指数的最大值。

1.6 生态安全格局构建

根据俞孔坚等<sup>[20]</sup>提出的生态安全格局构建方法、西北干旱区生态承载力监测评估结果以及该区的地域特征识别区域生态安全格局“源地”。采用最小累积阻力模型（Minimum Cumulative Resistance, MCR）建立生态源地的累积耗费距离表面，进而识别生态廊道、辐射道，构建生态安全格局，其公式为：

$$MCR=f_{min}\sum_{j=n}^{i=m}D_{ij}\times R_i$$
 (9)

式中： $MCR$ 为最小累积阻力值； $D_{ij}$ 为物种从源地 $j$ 到景观单元 $i$ 的空间距离； $R_i$ 为景观单元 $i$ 对物种运动的阻力系数； $f$ 表示最小累积阻力与生态过程的正相关关系。

1.6.1 生态源地的确定

生态源地是指对区域生态环境以及人类可持续发展起重要作用的斑块。本文通过对研究区生态承载力的监测评估，结合西北干旱区特殊的地域特征识别生态源地，可以保证生态源地选取的客观、全面。具体来说，通过对生态承载力的监测评估，对生态环境弹性力、资源环境供容力、社会经济压力三个准则层17个指标进行量化分析，进而对区域生态环境可持续发展能力进行评估，将生态承载力归一化处理并选取生态承载力前20%的斑块作为优势区，将所有的生态优势区取并集得到重要的生态斑块，作为格局优化的重点建设区；生态优势区取交集得到生态源地。针对研究区的环境状况，选取主要的河流、湖泊、大于10 km<sup>2</sup>的林地斑块作为生态源地<sup>[21]</sup>，并与通过生态承载力监测评估得到的生态源地取并集，得到最终生态源地。由于部分面积较小的源地对整体生态环境影响较小，选取面积大于10 km<sup>2</sup>的斑块作为生态源地。

1.6.2 最小累积阻力面构建

为了反映物质和能量在“目标源”间迁移和移动的态势，本文基于ArcGIS 10.2软件平台中Cost-Distance模块，采用最小累积阻力模型（MCR）计算生态源地到其他景观类型的累积耗费距离，进而判断各景观单元到生态源地的通达度和可达性。根据研究区的生态属性选取景观类型、高程、坡度、植被覆盖度、土壤类型等五个因子作为阻力因子，将每个评价指标分为五级，分别赋值为1、2、3、4、5；值越低，说明“源”在迁移过程中克服的阻力越小，反之越大<sup>[22]</sup>。生态源阻力表面的评价指标体系如表3所示。

为了更好地对最小累积阻力面分析，本文利用三生用地与累积耗费距离表面叠加分析，使生态安全格局分区更加科学。利用ArcGIS 10.2软件的栅格计算器将累积耗费距离表面分级图与三生用地分布图叠加，得到景观生态功能分区图，运算公式<sup>[23]</sup>为：

表3 生态源阻力评价体系及赋值  
Table 3 Evaluation system and values of ecological source resistance

生态源阻力值	1	2	3	4	5
海拔/m	>3500	2500~3500	2000~2500	1500~2000	<1500
坡度/(°)	>40	30~40	20~30	10~20	<10
景观类型	水域	林地	草地	耕地	建设用地，未利用地
植被覆盖/%	>70	50~70	30~50	10~30	<10
土壤类型	寒冻土、黑钙土、 草毡土、黑毡土	灌漠土、草甸土、 灰钙土	黑土、灰棕漠土、 风沙土	盐土、潮土、 灰褐土	石质土、漠境盐土

$$ESP = 10 \times Code_{ARD} + Code_{AGL} \quad (10)$$

式中： $ESP$ 为生态安全格局类型代码； $Code_{ARD}$ 为4级累积耗费距离表面等级代码（1~4），其中1~4分别代表生态保育区、优化缓冲区、生态过渡区、生态防护区； $Code_{AGL}$ 为4类三生用地类型代码，0~3分别代表未利用地、生态用地、生产用地、生活用地。在计算后的生态安全格局类型代码中，十位数代表累积耗费距离表面分级，个位数代表三生用地类型（如10代表生态保育区的未利用地）。

### 1.6.3 生态廊道、辐射道的提取

生态廊道是各“源”间的低累积阻力谷线，是相邻两源地能量流通的重要途径，具有重要的生态、社会、经济功能。本文基于ArcGIS 10.2软件平台中水文分析模块<sup>[24]</sup>，以累积耗费距离表面为基础，对洼地填充、计算水流方向、汇流累积量、通过对域值的反复测定，提取阈值大于2000的值，然后对其进行矢量化处理，对矢量化后的线条进行平滑处理，从中提取两源地间最小耗费路径，从而得到任意两源间廊道。辐射道是生态流向外扩散的最优路径，是物质以“源”为中心向外扩散的低阻力谷线。基于累积耗费距离表面识别以“源”为中心向外辐射的低阻力值谷线，对研究区未来的发展和自身的建设具有关键作用。

### 1.6.4 生态节点的识别

生态节点是生态空间中连接两个相邻生态源并对景观生态过程起关键作用的区域，通常分布于廊道生态功能较薄弱处。基于西北干旱区独特的自然地理特征，采用两种方法提取生态节点：一是各“源”间低阻力谷线的交点；二是利用水文分析提取生态阻力的“山脊线”，即累积生态阻力最大路径，其与低阻力谷线的交点，共提取两类生态节点71个。

## 2 结果分析

### 2.1 生态承载力整体特征

通过空间主成分分析法（SPCA）对上述指标进行计算，得出不同年份生态承载力的值，最后依据自然断点法将西北干旱区生态承载力划分为四个层次：弱承载（0~0.42），中等承载（0.42~0.6），较强承载（0.6~0.8），强承载（0.8~1）（图2）。由于研究区地处亚欧大陆腹地，常年受亚洲高压控制，降水稀少，植被覆盖率较低，沙漠、戈壁所占面积超过研究区总面积的60%，西北干旱区生态承载力以弱承载为主。强承载区与较强承载区主要分布于阿尔泰山、天山、昆仑山、祁连山地区。弱承载与中等承载主要分布于准格尔盆地、塔里木盆地以及阿拉善高原地区。

### 2.2 生态承载力的时空变化

图3为西北干旱区不同等级生态承载力面积变化。相对于2000年，2007年生态承载力有一定改善，弱承载力的面积下降了49500 km<sup>2</sup>，中等承载与较强承载面积分别上升了21527 km<sup>2</sup>和57475 km<sup>2</sup>。这主要是由于从2000年开始，国家开始实行西部大开发战略，特别是2002年实行的退耕还林还草政策，使得第一产业对西北干旱区的破坏逐步降低，生态承载力略有上升。2012年相对于2007年，生态承载力显著恶化，弱承载区面积由977900 km<sup>2</sup>上升为1079694 km<sup>2</sup>，较强承载和强承载区的面积分别下降124982 km<sup>2</sup>和34694 km<sup>2</sup>。经济高速发展，特别是第二产业高速发展是西北干旱区生态承载力下降的主

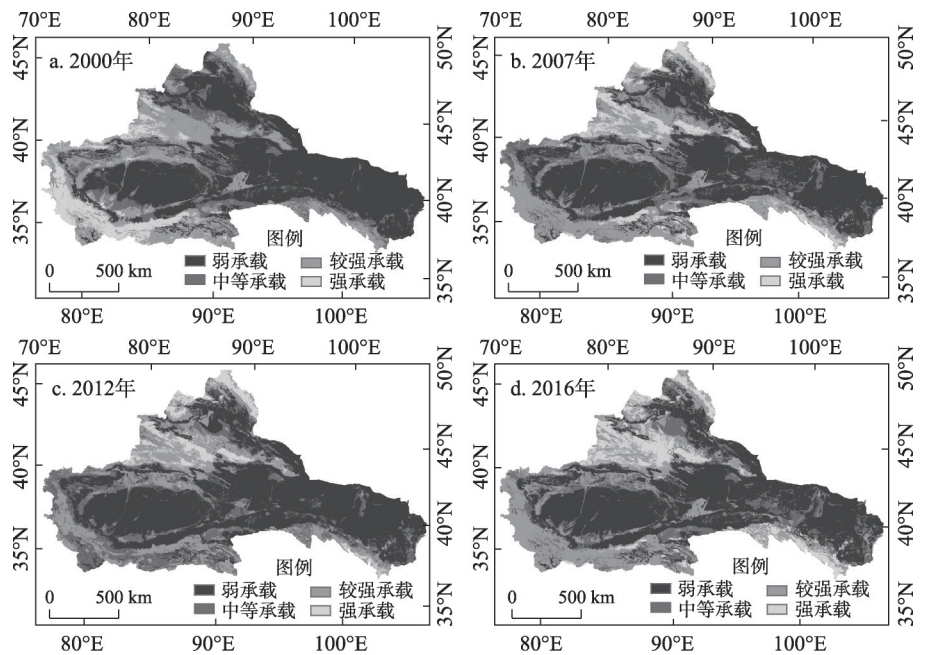


图2 2000-2016年西北干旱区生态承载力

Fig. 2 Ecological carrying capacity of arid areas of Northwest China from 2000 to 2016

要原因。到2016年，西北干旱区生态承载力进一步好转，弱承载区面积进一步下降，达到974776 km<sup>2</sup>，强承载区面积达到203148 km<sup>2</sup>。其主要原因是西北干旱区经济结构得到优化，环境质量有所调高。总体上，近16年来西北干旱区生态承载力基本稳定，略有上升。

为进一步分析西北干旱区生态承载力的变化，利用ArcGIS 10.2软件的栅格计算器对研究区四期生态承载力的值进行相减运算，得到2000-2007年、2007-2012年、2012-2016年和2000-2016年四期生态承载力动态监测图（图4），并对其进行重分类分析，将生态承载力变化大于零的地区划分为逐年变好区、小于零的地区划分为逐年变差区、等于零的地区划分为基本不变区。2000-2007年西北干旱区生态承载力总体较为稳定，生态承载力逐年变好区与逐年变差区相对集中，稳定区所占的比重最大，约占研究区总面积的65%。其中，逐年下降区域主要分布在帕米尔高原和天山南麓、昆仑山北麓的山前绿洲区，逐年上升区主要分布在北疆地区与甘肃省的河西地区。2007-2012年西北干旱区生态承载力总体较为稳定，局部地区逐步恶化；其中，基本不变区占总面积的78.60%，逐渐变差区占总面积的17.73%，逐渐变好区仅占总面积的

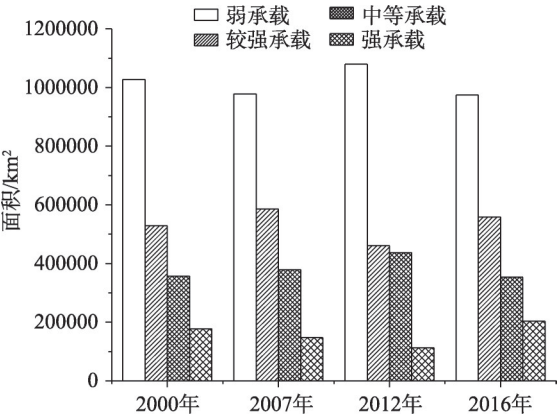


图3 2000-2016年西北干旱区不同等级生态承载力面积对比

Fig. 3 Comparison of different levels of ecological carrying capacity between 2000 and 2016 in arid areas of Northwest China



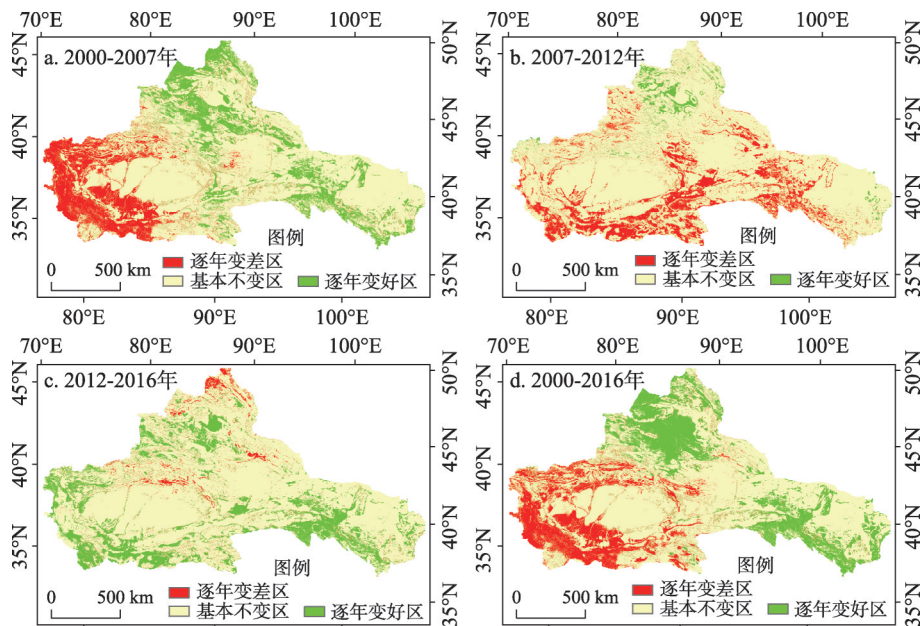


图4 2000-2016年西北干旱区生态承载力变化

Fig. 4 Variation intensity of ecological carrying capacity in arid areas of Northwest China from 2000 to 2016

3.67%。2012-2016年西北干旱区生态承载力呈稳步上升的趋势，其中，基本不变区占总面积的75.42%，逐渐变好区占21.13%，逐渐变差的区域仅占3.44%。总体来看，2000-2016年，西北干旱区生态承载力呈波动上升的趋势，但总体趋于稳定；其中逐年变差区面积占总面积的17.14%，主要集中在南疆地区；逐年变好区面积占总面积的21.40%，主要集中在北疆地区、河西地区和内蒙古西部地区；基本不变区面积占总面积的61.46%，主要集中在沙漠、戈壁等无人区。

## 2.3 生态安全格局的识别与优化

### 2.3.1 生态源地的识别与优化

基于对西北干旱区生态承载力的评估结果，选取每年生态承载力前20%的区域作为生态承载力的优势区，取交集得到生态源地（图5a~图5d）。从总体来看，生态承载力优势区呈波动上升的趋势，其中2000-2012年优势区面积由337500 km<sup>2</sup>下降到255400 km<sup>2</sup>；2012-2016年优势区面积有所上升，达355509 km<sup>2</sup>。将优势区取交集得到的生态源地与林地、水域（图5e）取并集得到最终生态源地（图5f）。西北干旱区生态源地面积达237215 km<sup>2</sup>，约占全区总面积的11.35%。整体来看，西北干旱区生态源地面积占整体的比例较低，这主要是由于西北干旱区沙漠戈壁所占比例较大，生态环境整体较恶劣。

重要生态斑块作为生态承载力优势区，生态基底较好，对重要生态斑块的保护、发展有利于持续提高源地斑块的面积、提高景观生态功能。如图6所示，研究区生态源地分布于高大的山脉地区，重要生态斑块分布于生态源地周围和昆仑山地区、塔克拉玛干沙漠周围的绿洲区。依托西北干旱区阿尔泰山、天山、昆仑山、祁连山等高大的山脉，分别构建阿尔泰山生态保护区、天山生态保护区、昆仑山生态保护区、祁连山生态保护区，为西北干旱区社会经济发展提供生态保障。从生态承载力四期的变化来看，阿尔泰山、天山生态承载力变化较小，生态环境较好；昆仑山地区生态承载力逐渐下降，生态



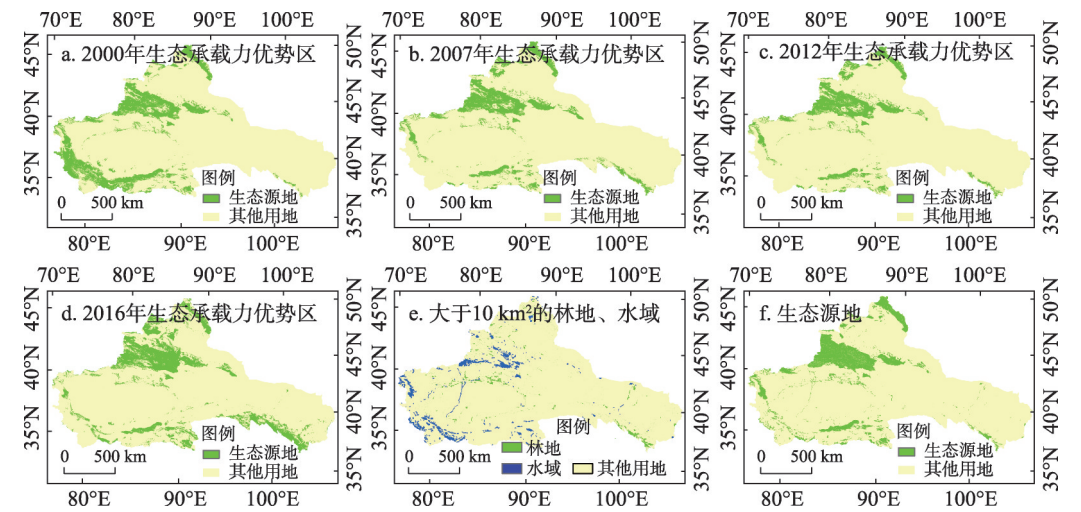


图5 西北干旱区生态源地

Fig. 5 Ecological source of arid areas of Northwest China

优势区面积不断缩小；祁连山地区生态优势区波动上升。基于此，应加强对昆仑山地区冰川的监测力度，对于下降速度较快的重要生态斑块区，设立禁建区减少人为干扰，从而提高生态环境质量。

2.3.2 景观格局生态功能分区

根据图7发现，研究区累积耗费距离较小的地区主要分布在高山地区和水域地区周围，累积耗费距离较大的地区主要分布在盆地和距水域较远的沙漠地区。基于ArcGIS 10.2软件平台，利用自然断点法将研究区分为生态保育区、优化缓冲区、生态过渡区、生态防护区

(图7)。为了更好地构建生态安全格局，将“三生用地”与累积耗费距离叠加，以便对生态安全格局进一步分析。“三生”是指生态、生产、生活三类土地利用类型。其中生态用地是指提供生态产品和服务的区域，以林地、草地、水域为主；生产用地是指以提供工业、农业为主导的功能区域，以耕地、工矿用地为主；生活用地是指以提供人类居住、休闲、娱乐为主导的功能区域，以城镇用地、农村居民用地为主。本文利用2015年土地利用类型，提取西北干旱区三生用地（图7a~图7c）。

根据式（10）计算获得西北干旱区累积耗费距离表面与三生用地叠加格局（图7d），在此基础上对生态安全格局分区作了统计分析（表4）。优化缓冲区未利用地主要分布在高大山脉地区与绿洲边缘区，高大山脉地区生态环境恶劣，对其生态环境进行监督即可；绿洲边缘区距人类聚居区较近，因此要减少人类对其干扰，防止绿洲退化。研究结果发现，阿尔泰山生态保护区、天山生态保护区、祁连山生态保护区生态环境有所改善，维护其稳定发展即可；昆仑山生态保护区下降趋势较为明显，需设立禁建区，

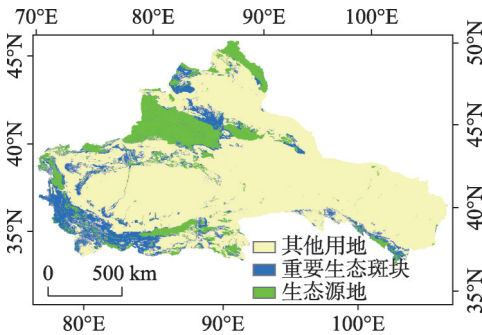


图6 生态源地、重要生态斑块

Fig. 6 Ecological source area and important ecological patches in arid areas of Northwest China

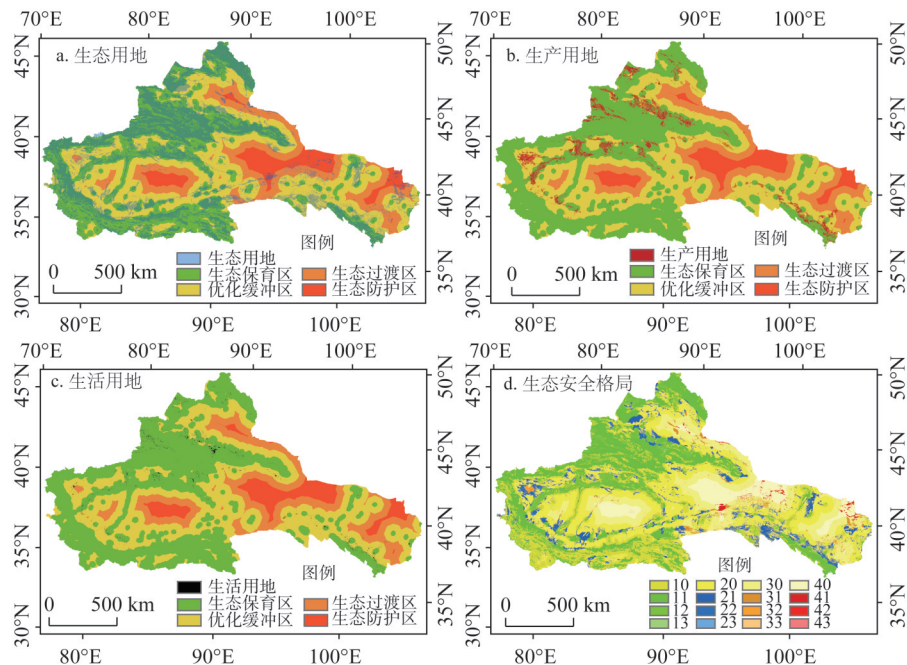


图7 不同累积耗费距离表面的三生用地叠加

Fig. 7 Different cumulative distances from the surface of the production-living-ecological land superposition

表4 生态安全格局分区统计

Table 4 Regional statistics of ecological security pattern

代码	安全格局分区	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%	主要分布区域
20	优化缓冲区未利用地	568820.67	27.2163	高大的山脉地区、绿洲边缘区
11	生态保育区生态用地	498439.92	23.8488	阿尔泰山生态保护区、天山生态保护区、昆仑山生态保护区、祁连山生态保护区
10	生态保育区未利用地	348726.95	16.6855	高大山脉顶部、绿洲区
30	生态过渡区未利用地	293402.56	14.0384	主要沙漠区
40	生态防护区未利用地	137653.67	6.5863	主要沙漠区
21	优化缓冲区生态用地	109551.53	5.2417	以草地为主、主要山脉的草甸带
12	生态保育区生产用地	65770.21	3.1469	环塔克拉玛干沙漠、天山北麓、河西地区的绿洲区
22	优化缓冲区生产用地	26965.18	1.2902	环塔克拉玛干沙漠、天山北麓、河西地区的绿洲区
31	生态过渡区生态用地	22912.67	1.0963	沙漠腹地的绿洲区，主要以草地为主
41	生态防护区生态用地	9434.26	0.4514	沙漠腹地的绿洲区，主要以草地为主
13	生态保育区生活用地	4292.86	0.2054	环塔克拉玛干沙漠、天山北麓、河西地区的绿洲区
32	生态过渡区生产用地	2315.72	0.1108	石羊河流域、叶尔羌河流域
23	优化缓冲区生活用地	1609.30	0.0770	优化缓冲区生产用地
33	生态过渡区生活用地	77.33	0.0037	石羊河流域、叶尔羌河流域
42	生态防护区生产用地	18.81	0.0009	沙漠腹地的绿洲区
43	生态防护区生活用地	10.45	0.0005	沙漠腹地的绿洲区

加强防护林建设，恢复当地生态环境。生态保育区未利用地主要分布于绿洲区与高大山脉顶部，昆仑山顶部区域从生态用地转为其他用地，应对其进行植被恢复建设；而绿洲

区生态保育区未利用地主要位于生态源地周围, 可以对其进行植被防护带建设, 保护绿洲区发展。生态过渡区未利用地、生态防护区未利用地位于沙漠腹地, 对该区域加强管控, 防止其对缓冲区的侵蚀。优化缓冲区生态用地主要分布在高山草甸区和绿洲地区的草地, 高山草甸区生态环境极其脆弱, 应设立禁建区; 绿洲地区应减少牲畜保有量, 防止草场退化。生态保育区生产用地、优化缓冲区生产用地、优化缓冲区生活用地、生态保育区生活用地主要分布在绿洲区, 除主要城市外, 大都以耕地为主; 南疆绿洲区生态环境下降明显, 应推进退耕还草, 在合适的地区进行生态林建设; 天山北麓、河西地区生态环境较为稳定。生态过渡区生态用地、生态防护区生态用地、生态防护区生产用地、生态防护区生活用地通常位于沙漠内部, 主要以草地为主, 应减少人类对其干扰, 降低其开发规模, 提高生态环境的稳定性, 进而维护源地景观连续性。

### 2.3.3 生态廊道的识别和优化

如图8所示, 研究区生态廊道共51条, 辐射道949条, 总长度7285.43 km, 受生态源地分布和特殊地理环境的影响, 生态廊道主要分布在研究区的西部地区, 中部和东部地区分布较少。由于西北干旱区生态源地分布不均, 研究区生态廊道网络化较低, 不利于生态流的扩散, 故需要在生态网络的架构中通过对辐射道的建设, 增加廊道的数量, 提高生态源地的连接度。强化现有廊道的物质流通性、增加廊道的数量是廊道优化的两种最重要的途径。图9的优化格局结果显示, 将现有生态廊道、辐射道分为道路型廊道、河流型廊道、绿色廊道。道路型廊道, 在西北干旱区主要选取G30、G7、G3014等高速, 312、227、G217等国道, 兰新铁路、兰新高铁、新疆铁路等铁路作为道路性廊道建设的重点。通过加强道路两边绿化带的宽度, 提高生态板块间物质流的流动。河流型廊道主要选取石羊河、黑河、疏勒河、塔里木河、伊犁河为建设重点。由于西北干旱区河流流量较小, 因此要限制对河流绿洲的开发, 以保护河流廊道; 绿色生态廊道主要选取重要的生态斑块和连续的绿洲作为建设重点, 限制绿洲区的开发, 提高绿洲区的生态环境质量, 以提高生态板块间有机联系。

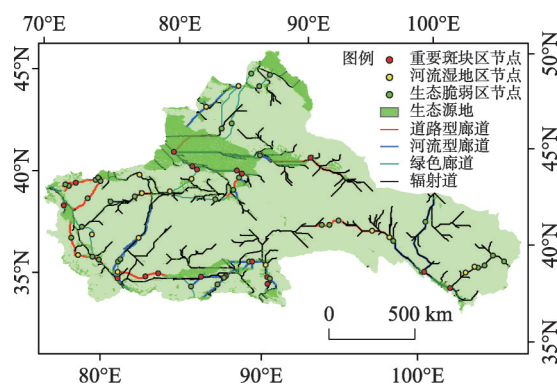


图8 生态廊道、节点格局优化

Fig. 8 Optimization diagram of corridor and node pattern

### 2.3.4 生态节点提取分析

通过对累积耗费距离表面“山脊线”“山谷线”的分析, 共提取两类生态节点共71个。从生态节点分布的具体位置看, 15个生态节点分布于河流流经区, 38个生态节点分布于山地和山麓等重要生态斑块区, 18个生态节点位于重要的生态斑块之间 (图8)。

依据生态节点的概念和研究区的自然地理特征, 将西北干旱区生态节点分为三类: 重要斑块区节点、河流湿地区节点、生态脆弱区节点。其中, 生态脆弱区节点在生态节点中的比例最大, 超过50%, 主要位于最大耗费路径与最小耗费路径的交汇处, 生态环境非常脆弱。它们是物种迁移的重要脚踏石, 应设立禁建区, 保证区域生态结构的完整性、物质的流通性。重要斑块区节点大都位于生态廊道交汇处, 物质流通量较大。近年来, 祁连山、昆仑山山麓地区受人类活动影响较大, 景观破碎程度上升。因此, 要减少



人类对保护区的干扰,维护重要生态斑块区的稳定。水资源是制约西北干旱区生物活动的重要因素,河流对西北干旱区生态环境的发展非常重要。西北干旱区河流主要为内流河,流量相对较小,许多河流流经沙漠等自然环境恶劣区,因此在格局优化时,要减少对河流湿地区节点的开发力度,维持河流整体生态环境。

### 3 结论与讨论

从2000年西部大开发,到“两山”理论的推广,西北干旱区对生态环境的保护越来越重视。在此背景下,本文运用空间主成分分析法(SPCA),对西北干旱区生态承载力进行了系统的监测评估,在此基础上构建了生态安全格局,得到以下结论:

(1)从整体上来看,西北干旱区生态承载力以弱承载为主,生态承载力自东向西呈不断递增的趋势。强承载区与较强承载区主要分布于阿尔泰山、天山、昆仑山、祁连山等地区,弱承载区与中等承载区主要分布于准格尔盆地、塔里木盆地以及阿拉善高原地区。

(2)从生态承载力的时空变化角度看,该区弱承载力面积不断下降,强承载力面积不断上升;河西地区、北疆地区、内蒙古西部地区大体呈上升趋势,南疆地区呈下降趋势,巴音郭楞蒙古自治州、伊犁哈萨克自治州、阿勒泰市、哈密市基本不变。总体来看,西北干旱区生态承载力基本平稳略有上升。

(3)基于生态承载力监测评估的结果,以及西北干旱区独特的地域特征,提取生态源地237215 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的11.35%。从整体上来看,生态源地面积占整体的比例较低,生态源地分布极不均匀,北多南少,西多东少;从地形角度来看,生态源地主要分布在高大的山脉地区,盆地地区分布较少。

(4)基于MCR模型与土地利用数据,将西北干旱区划分为16个生态安全格局分区,提取了道路型廊道、河流型廊道、绿色廊道等三种廊道,重要斑块区节点、河流湿地区节点、生态脆弱区节点等三种节点,结合生态承载力监测评估结果,对西北干旱区生态空间结构进行优化。

然而,生态承载力是一个复杂的系统,在进行生态承载力评价时,所选指标的全面性和科学性直接决定了其结果的准确性;基于这一考虑,本文综合考虑西北干旱区水文、土壤、植被等自然环境特征,城市、人口、经济等社会环境特征,从三个准则层17个指标,运用空间主成分分析法(SPCA)对生态承载力进行评价,但由于该区涉及范围广、面积大、地域差异性显著,在收集数据时受到很大挑战,尤其在将统计数据进行空间栅格化时可能对其精度造成一定影响。因此,今后的研究工作应该在指标细化、数据空间化两个方面进一步深入研究和完善。但作为生态治理和生态格局优化的宏观指导,本文从思路和方法方面给出了新的视角,是今后值得关注和借鉴的地方。

### 参考文献(References):

- [1] 陆恒,魏文寿,刘明哲,等.生态安全:国内外研究综述.地理科学进展,2005,24(6): 8-20. [LU H, WEI W S, LIU M Z, et al. Ecological security: A review of studies at home and abroad. Advances in Geographical Sciences, 2005, 24(6): 8-20.]
- [2] 顾康康.生态承载力的概念及其研究方法.生态环境学报,2012,21(2): 389-396. [GU K K. Concept and research methods of ecological carrying capacity. Journal of Ecological Environment, 2012, 21(2): 389-396.]
- [3] 高吉喜,陈圣宾.依据生态承载力优化国土空间开发格局.环境保护,2014,42(24): 12-18. [GAO J X, CHEN S B. Op-



- timize the spacial structure based on ecological capacity. *Environmental Protection*, 2014, 42(24): 12-18.]
- [4] 曹智, 闵庆文, 刘某承, 等. 基于生态系统服务的生态承载力: 概念、内涵与评估模型及应用. *自然资源学报*, 2015, 30(1): 1-11. [CAO Z, MIN Q W, LIU M C, et al. Ecosystem-service-based ecological carrying capacity: Concept, content, assessment model and application. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(1): 1-11.]
- [5] 高鹭, 张宏业. 生态承载力的国内外研究进展. *中国人口·资源与环境*, 2007, 17(2): 19-26. [GAO L, ZHANG H Y. Progress in research of ecological carrying capacity. *China Population, Resources and Environment*, 2007, 17(2): 19-26.]
- [6] 纪学朋, 白永平, 杜海波, 等. 甘肃省生态承载力空间定量评价及耦合协调性. *生态学报*, 2017, 37(17): 5861-5870. [JI X P, BAI Y P, DU H B, et al. Quantitative evaluation and coupling coordination of ecological carrying capacity in Gansu province. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(17): 5861-5870.]
- [7] 肖俞, 李卓卿, 吴学灿, 等. 区域生态承载力综合评价及分析: 以云南省易门县为例. *环境科学导刊*, 2016, 35(1): 67-74. [XIAO Y, LI Z Q, WU X C, et al. Comprehensive evaluation and analysis of regional ecological carrying capacity: A case study of Yimen county, Yunnan province. *Environmental Science Guide*, 2016, 35(1): 67-74.]
- [8] 杨屹, 胡蝶. 生态脆弱区榆林三维生态足迹动态变化及其驱动因素. *自然资源学报*, 2018, 33(7): 104-117. [YANG Y, HU D. Dynamic changes of three-dimensional ecological footprint of Yulin in ecologically fragile areas and its driving factor. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(7): 104-117.]
- [9] 杨燕风, 王宏伟. 城市快速增长长期生态与环境整合指标体系研究. *地理科学进展*, 2000, 19(4): 351-358. [YANG Y F, WANG H W. Study on ecological and environmental integration index system in urban rapid growth period. *Progress in Geography*, 2000, 19(4): 351-358.]
- [10] FENG L H, HUANG C F. A risk assessment model of water shortage based on information diffusion technology and its application in analyzing carrying capacity of water resources. *Water Resources Management*, 2008, 22(5): 621-633.
- [11] 蒙古军, 王晓东, 周朕. 干旱区景观格局综合优化: 黑河中游案例. *北京大学学报: 自然科学版*, 2017, 53(3): 451-461. [MENG J J, WANG X D, ZHOU Z. Comprehensive optimization of landscape pattern in arid areas: A case study of the middle reaches of Heihe River. *Journal of Peking University: Natural Science Edition*, 2017, 53(3): 451-461.]
- [12] 廖伟, 李璐, 吴宜进, 等. 丹江口库区土地利用变化与生态环境脆弱性评价. *自然资源学报*, 2011, 26(11): 1879-1889. [LIAO W, LI L, WU Y J, et al. Land use change and ecological environment vulnerability assessment in Danjiangkou Reservoir Area. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(11): 1879-1889.]
- [13] 陈栋栋, 赵军. 我国西北干旱区湖泊变化时空特征. *遥感技术与应用*, 2017, 32(6): 1114-1125. [CHEN D D, ZHAO J. Spatial and temporal characteristics of lake changes in arid areas of Northwest China. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(6): 1114-1125.]
- [14] 魏伟, 颜耀文, 魏晓旭, 等. 基于CLUE-S模型和生态安全格局的石羊河流域土地利用优化配置. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2017, 42(9): 1306-1315. [WEI W, XIE Y W, WEI X X, et al. Optimal allocation of land use in Shiyang River Basin based on CLUE-S model and ecological security pattern. *Journal of Wuhan University: Information Science Edition*, 2017, 42(9): 1306-1315.]
- [15] 狄乾斌, 张洁, 吴佳璐. 基于生态系统健康的辽宁省海洋生态承载力评价. *自然资源学报*, 2014, 29(2): 256-264. [DI Q B, ZHANG J, WU J L. Evaluation of marine ecological carrying capacity in Liaoning province based on ecosystem health. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(2): 256-264.]
- [16] 环境保护总局. HJ/T 192-2006 生态环境状况评价技术规范(试行). 北京: 中国环境出版社, 2006. [Environmental Protection Administration HJ / T 192-2006 Technical Specification for Evaluation of Ecological and Environmental Conditions (Trial). Beijing: China Environmental Press, 2006.]
- [17] 喻红, 曾辉, 江子瀛. 快速城市化地区景观组分在地形梯度上的分布特征研究. *地理科学*, 2001, 21(1): 64-69. [YU H, ZENG H, JIANG Z Y. distribution characteristics of landscape components on topographic gradients in rapidly urbanized areas. *Scientia Geographica Sinica*, 2001, 21(1): 64-69.]
- [18] 孙根年, 余志康. 中国30°N、35°N线城市气候舒适度与地形三级阶梯的关系. *干旱区地理: 汉文版*, 2014, 37(3): 447-457. [SUN G N, YU Z K. 35°, 30°N, N line cities in China the relationship between climate comfort and three-level ladder terrain. *Arid Geography: Chinese Version*, 2014, 37(3): 447-457.]
- [19] 宋之杰, 高晓红. 一种多指标综合评价中确定指标权重的方法. *燕山大学学报*, 2002, 26(1): 20-22, 26. [SONG Z J, GAO X H. A method for determining index weight in multi-index comprehensive evaluation. *Journal of Yanshan University*, 2002, 26(1): 20-22, 26.]

- [20] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 等. 北京市生态安全格局及城市增长远景. 生态学报, 2009, 29(3): 1189-1204. [YU K J, WANG S S, LI D H, et al. Ecological security pattern and urban growth forecast of Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1189-1204.]
- [21] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 等. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略. 地理学报, 2018, 73(4): 701-710. [PENG J, LI H L, LIU Y X, et al. Recognition and optimization strategy of ecological security pattern in Xiongan New Area. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 73(4): 701-710.]
- [22] 魏伟. 基于 CLUE-S 和 MCR 模型的石羊河流域土地利用空间优化配置研究. 兰州: 兰州大学, 2018. [WEI W. Research on optimal allocation of land use space in Shiyang River Basin based on CLUE-S and MCR model. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.]
- [23] 邓华, 邵景安, 王金亮, 等. 多因素耦合下三峡库区土地利用未来情景模拟. 地理学报, 2016, 71(11): 1979-1997. [DENG H, SHAO J A, WANG J L, et al. Simulation of future land use in the Three Gorges Reservoir area under the coupling of multiple factors. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(11): 1979-1997.]
- [24] 潘竟虎, 刘晓. 疏勒河流域景观生态风险评价与生态安全格局优化构建. 生态学杂志, 2016, 35(3): 793-799. [PAN J H, LIU X. Landscape ecological risk assessment and ecological security pattern optimization in Shule River Basin. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(3): 793-799.]

## Ecological carrying capacity monitoring and security pattern construction in arid areas of Northwest China

ZHANG Xue-yuan<sup>1</sup>, WEI Wei<sup>1</sup>, XIE Bin-bin<sup>2</sup>, GUO Ze-cheng<sup>1</sup>, ZHOU Jun-ju<sup>1</sup>

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. School of Urban Economics and Tourism Culture, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In this paper, ecological function elasticity, resource supply and environmental capacity, social and economic pressure rule of three layers are used to set up a comprehensive evaluation system of ecological carrying capacity. On this basis, the spatial principal component analysis (SPCA) is used in the arid areas of Northwest China covering 2000, 2007, 2012 and 2016 to examine spatial and temporal variations so as to monitor the ecological carrying capacity evaluation, and construct ecological security pattern. The results show that the ecological carrying capacity of the study area is mainly weak bearing, and the area of the weak bearing area is decreasing, while the area of the strong bearing area is increasing. In terms of spatial distribution, the ecological carrying capacity of Hexi region, Northern Xinjiang and Western Inner Mongolia is on the rise, while that of Southern Xinjiang is in the decline. The MCR model was used to extract 51 road-type corridors, river-type corridors and green corridors, with a total length of 7285.43 km, and 71 nodes in important patch area, river wet area and ecological fragile area were extracted. According to the calculation results, the arid areas of Northwest China are divided into 16 ecological security patterns, and the existing security patterns are optimized according to the changes of ecological carrying capacity.

**Keywords:** ecological carrying capacity; spatial and temporal evolution; ecological security pattern; optimization; arid areas of Northwest China