

基于 InVEST 模型和莫兰指数的甘肃省生境质量与退化度评估

赵晓同^{1,2,3}, 王建^{1*}, 苏军德⁴, 孙巍³, 晋王强³

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 甘肃省生态环境科学设计研究院, 兰州 730020; 4. 甘肃有色冶金职业技术学院, 金昌 737100)

摘要: 生境质量的高低与土地利用/土地覆被类型为生物多样性提供的栖息地适宜性有直接关系, 尤其是农业开发活动、城市、道路等严重威胁生境质量, 为了评估西北生态脆弱地区生境质量和退化程度, 该研究以甘肃省为例, 应用 InVEST 模型和莫兰指数对甘肃省生境质量和生境退化空间特征进行分析, 明确其热点区域, 并探讨了生境质量与退化度及其热点与各类自然保护地的关系。结果表明: 甘肃省生境质量从南到北逐渐下降, 而生境退化度从北到南逐渐升高, 自然生态条件好的区域这种变化主要取决于人类活动的位置和强度; 甘肃省生境质量热点区面积占到全省国土面积的 25.59%, 高于全省自然保护地面积占比, 形成了保护空缺, 甘肃省生境退化热点地区面积虽然不高, 但多为自然生态条件较好的区域; 各类保护地中, 国家公园是各类保护地类型中生境退化度最低的类型, 保护水平相对较低的其他保护地类型在生境质量和退化程度上表现出相反的结果。研究结果对精准实施生物多样性保护战略和生态系统管理决策具有重要意义。

关键词: 模型; 土地利用; 聚类分析; 生境质量; 热点分析; 甘肃省

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.18.035

中图分类号: X321

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-18-0301-08

赵晓同, 王建, 苏军德, 等. 基于 InVEST 模型和莫兰指数的甘肃省生境质量与退化度评估[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 301-308. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.18.035 http://www.tcsae.org

Zhao Xiaojiong, Wang Jian, Su Junde, et al. Assessment of habitat quality and degradation degree based on InVEST model and Moran index in Gansu Province, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(18): 301-308. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.18.035 http://www.tcsae.org

0 引言

人类生存环境依赖于生物多样性和生态系统服务^[1]。过去几十年里, 由于不合理的土地利用方式, 如大规模农业开发活动、快速城镇化、工业化及森林采伐等, 导致大范围的物种丧失和自然生境破碎, 严重影响了人类福祉^[2-5]。尤其是土地利用变化强烈影响区域物种及其生境^[6], 气候变化也对高海拔物种分布产生一定的负面影响^[7]。这种趋势在中国西北地区, 尤其在甘肃省格外明显, 该区域生物多样性被认为在未来将会面临更大的威胁^[8]。事实上, 甘肃省境内部分自然保护区因历史遗留问题, 迄今仍存在农业生产等其他人类活动, 其强度已远远超过系统承载能力(例如, 祁连山自然保护区保护站 61.1% 严重超载)^[9]。

一直以来, 面对生物多样性丧失和生境破碎化问题, 国家和地方政府采取了诸多措施, 如建立了自然保护区、森林公园、湿地公园等各类自然保护地。根据相关研究表明, 自然保护地的建立对生物多样性保护的效果明显高于非自然保护地^[10]。但也有研究表明现有的自然保护

地不足以保护当前生存的物种及其生境^[11]。

一般通过环境替代指标来预测人类活动与区域生物多样性之间的关系, 这对于制定生态环境保护规划极为有用^[12], 生境质量作为这样一种替代指标可以用来评估生物多样性保护状况的有效性, 这对于甘肃省乃至全国制定生物多样性管理战略方向以改进某些物种和生境的保护至关重要。国内外学者针对环境替代指标法评估生物多样性保护状况做了相关大量研究, 如 Maes 等^[13]通过空间指标评估了欧洲的生物多样性保护状况; Sallustio 等^[14]利用 InVEST 评估了意大利自然保护区的生境质量和不同自然保护地规划情景下的流域生境质量; Berglund 等^[15]基于连通性和生境质量, 对海洋保护区的优化选择进行了研究。国内学者则将研究多集中在自然保护区^[16]、流域^[17]、区域^[18-20]等尺度上对生境质量进行分析研究, 而在省域尺度^[21-22]上, 多研究生境质量的时空变化特征, 鲜有对生境质量及其与自然保护地关系的研究。

为有效识别出正在受到严重威胁的生物多样性特殊区域, “热点”分析是一种直观有效的方法。Myers^[23]在分析热带雨林受威胁程度的基础上首次提出了“热点”一词, 以确定物种丰富度高、特有性强或具有威胁性的区域。尽管甘肃省已经实施了一些政策和条例来加强对物种和生境的保护, 例如建立国家公园、自然保护区、森林公园等, 但是这些保护地在生物多样性保护方面的成效却没有得到很好评估, 在生物多样性保护背景下,

收稿日期: 2020-06-02 修订日期: 2020-07-19

基金项目: 甘肃省青年科技基金计划(18JR3RC420); 甘肃省技术创新引导计划(20CX3ZA002); 甘肃省社会科学规划项目(19YB155)

作者简介: 赵晓同, 博士生, 主要从事生态环境遥感研究。

Email: 379458923@qq.com

*通讯作者: 王建, 研究员, 博士生导师, 主要从事寒区旱区遥感研究。

Email: wjian@lzb.ac.cn

不同保护地类别的优劣势尚未得到充分认识,迄今为止也无有效方法将物种和生境异质性以及相关威胁(气候和人类活动)与国家与地方管理战略联系起来。在这方面,热点方法已经被证明能在空间上对生物多样性保护的规划和管理进行有效改进^[24]。

近年来,甘肃省境内野生动物生境不断遭到扰动、破坏,其中最重要原因就是生物多样性与自然保护地在空间上不一致的问题尚未得到解决,但目前该领域的研究尚不充分。本研究首先在省域尺度上确定了对于不同土地利用/土地覆被类型,其生境适宜性和对生物多样性的威胁;然后应用 InVEST 模型对生境质量和退化进行了评价;最后,探讨了生境质量和生境退化及其热点和冷点与自然保护地类型之间的关系。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

甘肃省地处西北内陆,位于黄土高原、青藏高原、内蒙古高原三大高原和西北干旱区、青藏高寒区、东部季风区三大自然区域的交汇处,全省地域狭长,地质地貌、气候类型复杂多样,境内除海洋生态系统外的森林、草原、荒漠、湿地、农田、城市等六大陆地生态系统均有发育,是全球生物多样性保护的热点地区之一,总土地面积为 42.58 万 km²。主要山系有阿尔金山、祁连山、岷山、秦岭、子午岭、六盘山、合黎山和龙首山等。它位于国家“两屏三带”生态安全战略格局中的青藏高原生态屏障、黄土高原-川滇生态屏障和北方防沙带,是长江、黄河上游重要的水源涵养地和补给区。

截至目前,甘肃省境内的国家公园 2 个,省级以上自然保护区 54 个,有明确边界的其他保护区地包括省级及以上森林公园 54 个、风景名胜区 5 个、地质公园 21 个、湿地公园 9 个,国家级水产种质资源保护区 21 个,极小物种保护地 1 个,总面积约 9.77 万 km²,占甘肃省国土面积的 22.93%。

近年来,随着甘肃省社会经济的发展,由于自然生态系统的破坏和不合理的人类活动,野生动植物栖息繁衍生境日益缩小、破碎,一些物种数量迅速减少,甚至濒临灭绝。

1.2 数据来源

土地利用/土地覆被类型数据来源于生态环境部卫星应用中心,分辨率为 30 m,时段为 2015 年,根据甘肃省实际情况和根据研究需要,将研究区土地利用/土地覆被类型整合为 8 个一级类(森林、灌丛、草地、农田、湿地、建设用地、荒漠、冰川及永久积雪),21 个二级类(落叶阔叶林、常绿针叶林、针阔混交林、落叶阔叶灌丛、草甸、草原、其他草地、水田、旱地、园地、草本湿地、湖泊、水库、河流、城市绿地、建设用地、裸岩、裸地、沙漠、盐碱地、冰川及永久积雪),建立相应的数据库。

本研究中用到的自然保护地边界数据包括甘肃省境内的 8 大类省级及以上自然保护地,包括国家公园、自然保护区、水产种质资源保护区、湿地公园、森林公园、地质公园、风景名胜区和极小种群栖息地,数据来源于

林草、农牧、自然资源等自然保护地管理部门。

甘肃省矿业权范围数据和不同等级公路和铁路网数据取自天地图数据库,来源于自然资源部门。

本研究基于 ArcGIS 10.2 平台,对涉及的相关矢量和栅格数据进行预处理和空间分析;基于 InVEST 3.6 模型对甘肃省生境质量进行模拟。

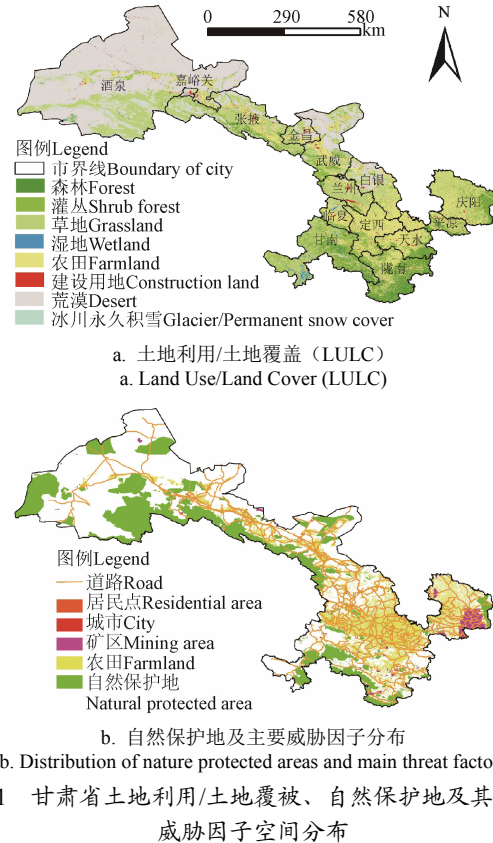


图 1 甘肃省土地利用/土地覆被、自然保护地及其主要威胁因子空间分布

Fig.1 Spatial distribution of LULC, nature protected areas and main threat factors in Gansu Province

2 研究方法

2.1 基于 InVEST 模型的生境质量评估

本研究采用 InVEST 模型对甘肃省生境质量进行评估。该模型用生境质量作为连接生物多样性与不同土地覆被类型之间的指标^[25],有助于对生境保护需求进行初步评估^[26]。根据 Terrado 等^[26]的研究,“该模型假设栖息地质量较高的地区,物种丰富度较高,栖息地范围和质量下降导致物种持续性下降。”。生境质量的高低与土地利用/土地覆被类型为生物多样性提供的栖息地适宜性具有直接关系。

具体计算过程如下

$$D_{xy} = \sum_{j=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} (W_r \sum_{r=1}^R W_r) r_{xy} i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (1)$$

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \quad (\text{线性衰减}) \quad (2)$$

$$i_{rxy} = \exp\left(-\frac{2.99d_{xy}}{d_{rmax}}\right) \quad (\text{指数衰减}) \quad (3)$$

$$Q_{xy} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xy}^2}{D_{xy}^2 + k^z} \right) \right] \quad (4)$$

式中 D_{xy} 为生境类型 j 中 x 栅格的生境退化度（退化风险指数）； R 为风险源个数； W_r 为风险源 r 的权重； Y_r 为风险源的栅格数； r_y 为栅格 y 的胁迫值； i_{rxy} 为栅格 y 的胁迫值 r_y 对栅格 x 的胁迫水平； β_x 为风险源对栅格 x 的可达性（受法律保护区域内，该值大于 0 小于 1，保护越严，值越小；其余区域为 1）； S_{jr} 为生境类型 j 对风险源 r 的敏感度； d_{xy} 为栅格 x 与栅格 y 的直线距离； d_{rmax} 为风险源 r 的最大胁迫距离。 Q_{xy} 为生境类型 j 中 x 栅格的生境质量指数； D_{xy} 为生境类型 j 中栅格 x 所受胁迫水平； k 为半饱和系数； z 为模型默认参数； H_j 为生境类型 j 的生境适宜度，取值在 0 到 1 之间，其中 1 表示土地利用变化类别对物种的最适宜性^[27]。每种威胁对土地利用/土地覆被类型的影响随着威胁源距离的增加而减少，遵循距离衰减函数（有关 InVEST Habitat Quality 模型的更多详细信息，请参见 Sharp 等成果^[25]）。本研究中，将建设用地、农田、采矿权和矿产地、高速公路、国省道、铁路 6 类土地利用/土地覆被设定为影响区域生境质量的风险源，其余不同的地类代表了不同的生境类型。

生境质量取决于栖息地特点和威胁的存在和影响程度，但生境质量特别适合于在生境受到不同威胁的累积影响下，生境质量受到破坏的情形。不同土地利用/土地覆被类型具有相似的生境质量值，但其生境适宜度和受到的威胁影响明显不同。在这种情况下，如果只使用生境质量而没有考虑生境退化度，会低估威胁对生境的影响。因此，本研究中评估了生境质量和生境退化度。

模型中相关参数需要结合甘肃省具体情况进行调整，风险源在相应保护区内的可达性、各风险源最大胁迫距离及权重、不同生境类型对胁迫因子的敏感程度等参数的设置结合 InVEST 模型的实例，参照甘肃省生态领域专家的建议以及结合前人研究成果^[16-17,22]，及 InVEST 模型的实例^[28]，同时参考专家建议及研究区实际情况（考虑到甘肃省境内矿产资源富集区域大多分布在生态环境条件较好的区域，矿产资源开发对生境的威胁很大，而这些区域由于自然条件的限制，城镇分布很少且规模不大，故设定的采矿权对生境的威胁大于城镇），对威胁因子敏感度赋值（表 1 和表 2）。在 GIS 平台下，对甘肃省主要生态威胁因子（铁路、道路（包括国道、省道、县道路）、城镇及农村居民点、农田、采矿权）进行提取或空间插值处理，最终获取目标并赋值为 1，非目标赋值为 0，其栅格格式统一为.tif，分辨率 30 m。

表 1 威胁源及其最大威胁距离、权重及衰减类型
Table 1 Threat source and its maximum threat distance, weight and attenuation type

威胁因子 Threat factors	最大影响距离 Maximum influence distance/km	权重 Weight	衰减性 Attenuation
铁路 Railway	2.5	0.6	指数
公路 Highway	0.5	0.5	指数
居民点 Residential area	2.5	0.4	线性
城镇 Cities and towns	6	0.8	指数
农田 Farmland	1.5	0.6	线性
矿区 Mining area	9	0.9	线性

表 2 生境适宜性及其对不同威胁源的相对敏感程度赋值
Table 2 Assignment to habitat suitability and its relative sensitivity to different threat sources

土地利用/ 土地覆被类 型 Types of LULC	生境 适宜度 Habitat suitability	铁路 Railway	公路 Highway	居民点 Residential area	城镇 Cities and towns	农田 Farmland	矿区 Mining area
常绿针叶林	1.0	0.9	0.7	0.6	0.5	0.3	0.9
针阔混交林	1.0	0.9	0.7	0.6	0.5	0.3	0.9
落叶阔叶林	1.0	0.9	0.7	0.6	0.5	0.3	0.9
落叶阔叶 灌丛	1.0	0.9	0.6	0.5	0.4	0.4	0.9
草甸	0.8	0.7	0.5	0.3	0.2	0.5	0.8
草原	0.7	0.7	0.5	0.3	0.2	0.5	0.75
其他草地	0.6	0.6	0.4	0.2	0.2	0.5	0.75
湖泊	1.0	0.75	0.65	0.8	0.7	0.1	0.9
水库	1.0	0.7	0.6	0.7	0.7	0.1	0.9
河流	1.0	0.75	0.65	0.8	0.7	0.1	0.9
草本沼泽	1.0	0.8	0.8	0.9	0.7	0.1	0.9
水田	0.3	0.5	0.6	0.5	0.4	0.0	0.6
旱地	0.3	0.5	0.6	0.5	0.4	0.0	0.6
园地	0.3	0.5	0.6	0.5	0.4	0.0	0.6
建设用地	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
城市绿地	0.01	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0
沙漠	0.01	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0
裸岩	0.01	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0
盐碱地	0.01	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0
裸土	0.01	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0
冰川	0.01	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.8

本研究中土地利用/土地覆被可达性按照甘肃省境内涉及的 8 类自然保护地不同功能分区确定，根据各类自然保护地不同功能分区的管控要求，对可达性参数 β_x 分别进行赋值。其中，国家公园的核心保护区、自然保护区的核心区、森林公园、湿地公园、地质公园、风景名胜区、水产种质资源保护区的核心保护区域、极小种群保护地（大熊猫栖息地）赋值为 0；国家公园的生态修复区、自然保护区的缓冲区、森林公园、湿地公园、地质公园、风景名胜区、水产种质资源保护区的一般保护区域赋值为 0.2；国家公园的科普休憩区和传统利用区赋值为 0.8；自然保护区的实验区赋值为 0.6；森林公园、湿地公园、地质公园、风景名胜区、水产种质资源保护区的其他区域赋值为 0.8。

2.2 生境热点与冷点分析

热点是指以特定指标的高密度簇（本研究中是生境质量或生境退化度）为特征的区域，周围环绕着同一指标的低密度簇，称为冷点^[29]。本研究采用基于空间分析和空间关联的 local Moran's I 方法^[30]，这种方法用在聚类 and 离群分析中实现 Anselin 局部 Moran's I 统计。利用 ArcGIS 软件在空间上识别具有统计意义的热点、冷点和空间离群点。该工具通过根据每个像素的簇/离群点类型（COType）对其进行分类来表示空间相似性（空间聚类）或差异性（空间离群点）。最后，聚类算法将分析的生境质量和生境退化度分类为：高值（热点）的统计显著（0.05 水平）簇；低值（冷点）的统计显著（0.05 水平）

簇；高值主要由低值包围的异常值；低值主要由高值包围的低值异常值。

3 研究结果

3.1 生境质量和生境退化度空间格局

从图 2 可以看出，甘肃省生境质量值从南到北逐渐降低，高值区主要集中在甘南、临夏、陇南、天水南部、庆阳子午岭以及祁连山地区。这些区域人口密度低，自

然生态条件较好，植被覆盖度高，多以草原、森林、灌丛为主，生境质量均值分别为 0.699 7、0.999 6、0.998 8；中值区集中分布于甘肃中部的兰州、白银、定西等地，该区域人口密度大，植被覆盖度低，主要以耕地为主，生境质量均值为 0.3；低值区广泛分布于河西走廊北部荒漠区，该区域虽然人口密度低，人类活动扰动强度低，但植被覆盖度极低，自然条件恶劣，广泛分布有荒漠，生境质量均值为 0.01。

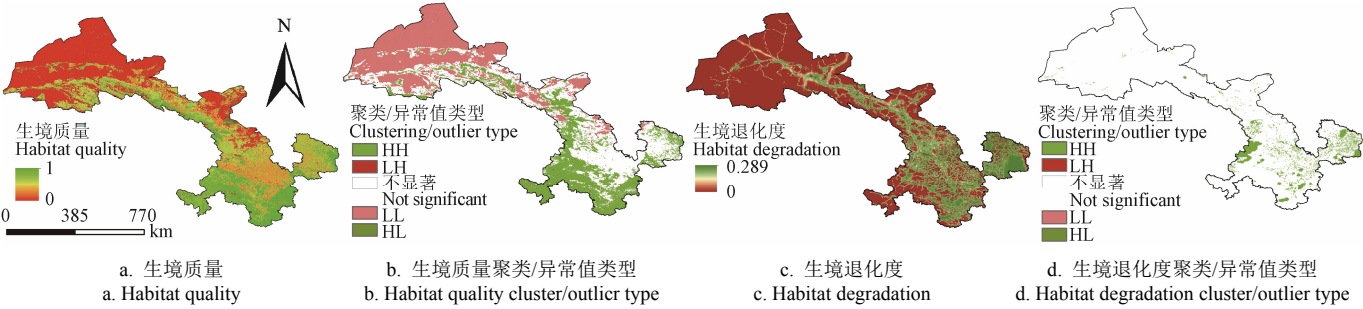


图 2 甘肃省生境质量、生境退化度及其聚类/异常值类型空间分布
Fig.2 Spatial distribution of habitat quality, habitat degradation and their cluster/outlier types in Gansu Province

甘肃省生境退化度从南到北逐渐降低，高值区覆盖范围逐渐缩小，河西走廊地区生境退化度缩小到走廊绿洲区，该区域是甘肃省乃至全国的能源、交通走廊，人类活动干扰强度较大。甘肃中部人口密度大，人类活动频繁，是甘肃省主要的工业、农业生产区，高度分散着各种威胁（如高密度道路网和城市区域的碎片化，对自然植被干扰大，生境退化度高。甘肃南部的陇南、天水 and 东部的庆阳、平凉等地，生境退化度最高，该区域矿产、能源资源丰富，是甘肃省资源开发重要地区，资源开发活动对自然植被破坏较大，生境退化度最大（退化度为 0.289）。

综合来看，甘肃南部和东部生境质量较好，但是由于该区域受到人类活动干扰强度大，生境退化度也较高。

3.2 生境质量和生境退化度热点、冷点分析

从图 2 中，生境质量、生境退化度的聚类/异常值类型分布图可以看出，甘肃省生境质量热点区连片分布于甘肃南部的临夏、甘南、陇南，其他区域呈不连续的片状分布，热点区域面积占到全省国土面积的 25.59%，从自然保护区与高质量生境的分布可以看出，由于生境质量热点区域覆盖面积高于自然保护区面积，甘肃南部的部分高质量生境区域并没有划入自然保护区进行管理，由此形成了保护空缺，未来这些区域随着人类活动扰动强度的增加将面临生境退化的危险。值得注意的是祁连山地区，生境质量热点区分布的整体性不高，多处被冷点区分割。其原因是早期祁连山矿产资源开发、水电设施违法建设等人类活动对区域生态环境造成了破坏，导致局部区域生境质量不高。

甘肃省生境退化热点地区多分散分布于甘肃东部和中部地区，面积占全省国土面积的 5.92%。其中东部的庆阳生境退化度热点面积较大，原因是该区域是煤炭、石油资源丰富，是国家五大综合能源基地之一，资源开发建设活动频繁引起的生境退化区域较为集中。甘肃省中

部的定西、天水等地因地处黄土高原，沟壑纵横，但农业用地密集，导致该区域生境退化热点区较破碎但分布较广。陇南市生境退化度热点呈点状分布，其原因是该区域矿产资源开发活动较多。值得注意的是临夏和甘南交接处有明显的生境退化度热点区分布，该区域也是矿产资源富集区。

3.3 生境质量和生境退化度与不同类型保护地的关系

根据表 3，生境质量最高的类型为其他保护地（0.774 0），其次为国家公园（0.550 0），自然保护区处于中间水平（0.452 6），自然保护区和非保护地分别为 0.447 2、0.362 2。各类保护地中，国家公园的生境退化度最低（0.000 3），生境退化度最高的除非保护地（0.009 0）外，为其他保护地（0.002 3），自然保护区和自然保护区分别为 0.005、0.006。说明虽然其他保护地生境质量较高，但是由于这些保护地多为旅游景区，景区旅游设施建设等开发活动对保护地生境退化起到加速作用。

表 3 不同类型保护地生境质量和生境退化度均值					
Table 3 Mean value of habitat quality and habitat degradation degree of different types of protected areas					
项目 Item	自然保护区 Natural reserve	国家公园 National park	自然保护区 Natural protected area	其他保护地 Other protected area	非保护地 Unprotected land
生境质量 Habitat quality	0.447 2	0.550 0	0.452 6	0.774 0	0.362 2
生境退化度 Habitat degradation	0.000 5	0.000 3	0.000 6	0.002 3	0.008 9

从聚类分析结果看，全省生境质量的热点覆盖面积（25.59%）远高于生境退化度的热点覆盖面积（5.92%）。生境质量热点覆盖率从国家公园的 22.07%到其他保护地的 56.11%，不同类型保护地热点覆盖率差异性较大，其中国家公园的热点覆盖率低于全省平均水平。从非保护地到各类保护地，生境质量热点覆盖率逐渐增加，说

明自然保护地建立对生境质量的提升有显著作用。

从不同保护地类型生境退化度热点覆盖率来看(表 4)，与生境质量热点覆盖率相反，国家公园是保护地类型中生境退化热点覆盖率最低的类型，覆盖率为

0.34%。而其他保护地生境退化度热点覆盖率在保护地类型中最高，为 6.58%。说明今后自然保护地管理的重点应该放在其他保护地，加强其他自然保护地的生态修复和恢复，减少人类活动的干扰。

表 4 不同保护地类型生境质量和生境退化度及其热点、冷点覆盖率
Table 4 Hot spot and cold spot coverage rate of habitat quality and degradation in different types of protected areas %

项目 Item	类型 Type	全省 Gansu Province	非保护地 Unprotected land	自然保护地 Natural protected areas	自然保护区 Natural Reserve	国家公园 National park	其他保护地 Other protected areas
生境质量 Habitat quality	热点覆盖率	25.59	25.18	26.96	26.02	22.07	56.11
	冷点覆盖率	35.32	34.12	39.28	42.15	26.44	9.06
生境退化度 Habitat degradation	热点覆盖率	5.92	6.98	2.40	2.40	0.34	6.58

4 讨 论

4.1 生境质量和退化度

本研究结果表明生境质量在人口密度越高的地区以及更接近威胁源的地区下降显著，这与巩杰等^[17]和 Newbold 等^[6] 成果较为一致。此外，研究结果显示：从自然生态条件较好的区域到自然条件恶劣的区域（例如，从秦巴山区和祁连山地区到北部荒漠区）；从农业用地较少的地区到农业用地较密集的地区（例如，从甘南高原到陇中陇东地区），以及从限制性较强到限制性较弱的自然保护地类别（例如，从自然保护区和国家公园到其他保护地）时，生境质量降低。甘肃省存在大量的自然保护地，面积占到全省国土面积的 22.93%，而且甘肃省建立了生物多样性优先保护区，面积占到 30.94%，这意味着在具有最高生物多样性的地区，生物多样性保护得到了保证（至少是预期的）。事实上，自然保护地体系对于维护生物多样性保护在国家^[31-32]和全球范围^[33]都得到了广泛认可，生境质量和退化度热点的研究结果也证实了这一点。这也符合高退化度值和高人为压力之间存在的相关关系^[34]。此外，与生境质量相比，生境退化度最高值集中在更零散的自然和半自然区域（如黄土高原沟壑丘陵区、被地形分割的林地、草地），这些区域高度分散着各种威胁（如高密度道路网、城市区域的碎片化、农业耕作区）。生境质量和生境退化度的空间分布和特征及其热点，为生境质量和生境退化度的研究提供了一个有价值 and 更全面的认识，既体现了当前的生境保护，也有因人为威胁的累积效应而产生的不利影响。

甘肃省目前的生物多样性水平低于自然保护地水平。相反，与自然保护地相比，甘肃省非自然保护地有更高的生境退化度值，表明它们比自然保护地更容易受到人类活动的影响，自然保护地通常位远离人类活动影响的区域，受人为威胁的影响较小（例如，位于高海拔地区的针阔混交林生境质量最高）。这一趋势可能取决于当前的土地利用管理方式和它们与生物多样性保护目的（如以生境或物种为目标）的关系。当然，没有纳入自然保护地管理的区域，虽然自然生态条件较好，也可能面临生境退化的危险，例如，甘肃南部的陇南地区，部分区域并没有纳入自然保护地，故人类活动没有受到限制或受到较小限制，从而矿产资源开发活动造成生境

点状退化。因此，甘肃省需要做出更大工作来改善区域生物多样性保护和生境保护。

4.2 模型的局限性

生境质量模型输出的不确定性依赖于专家判断的主观性和可变性，本研究部分参数数据（如不同土地利用/土地覆被类型对各生态胁迫因子的敏感度）来源于文献、InVEST 模型数据库以及经验公式。特别是，由于专家对不同区域胁迫因子、栖息地适宜性/质量的认识或知识水平存在差异。事实上，生境质量机理复杂，加上指标选取的不全面性，分析结果有一定的误差。

此外，对模型中可达性参数的确定是笔者根据各类自然保护地不同功能分区的管控要求，进行了赋值，该参数的赋值对结果影响可能存在一定的不确定性。为了校验可达性参数对结果的影响大小，笔者在没有考虑可达性参数的情况下（即假设完全可达，参数设置为 1），模拟了生境质量及其生境退化度，统计了不同类型保护地的均值，为了判断可达性对结果影响是否显著，进行了有无可达性参数 2 种模拟结果的方差分析。结果表明，虽然在不考虑可达性参数条件下，生境质量值略有下降（ $P=0.993\ 6$ ， $\alpha<0.05$ ），生境退化度值略有上升（ $P=0.772\ 0$ ， $\alpha<0.05$ ），但是 2 种模拟结果没有显著差异性，本研究中可达性参数的赋值对不同类型保护地模拟结果均值的相对大小影响不大，分析结论可信。

尽管 InVEST-生境质量模型的应用已被证明在省域范围内^[21-22]对生物多样性保护的支持是有效的，但需要注意的是生境质量-生境退化度评估的有效性取决于研究区域的大小和输入数据的分辨率，较低分辨率的数据对较小规模（如小城镇、沟壑丘陵地带农业生产活动等）生境类型的变化不太敏感。通过热点分析，研究关于生境质量在不同保护地的结果与 Sallustio 等^[35]获得的结果基本一致。本研究的重要意义在于，一方面本研究方法并没有直接研究物种，因生物多样性保护不仅仅是要关注目标物种或其群体，其生存生境也是重要关注点；另一方面本研究模型只需要有限的输入数据，且获取相对容易，解决了大尺度分析中数据受限的问题。

5 结 论

本研究基于 InVEST 模型，以高空间分辨率评估甘肃省的生境状况，通过热点、冷点分析方法，明确了各类

保护地与生境质量和生境退化度之间的关系, 得出以下结论:

1) 甘肃省生境质量值从南到北逐渐降低, 而生境退化度从北到南逐渐升高; 甘肃南部和东部生境质量总体较好, 但是该区域由于受到人类活动干扰强度大, 生境退化度也较高, 生境质量和生境退化程度取决于人类活动的位置和强度, 结合生境质量和生境退化程度能更加真实的反映当前生境受到保护的水平。

2) 甘肃省生境质量热点区连片分布集中在甘肃南部, 其他区域呈不连续的片状分布。甘肃省生境退化热点地区面积虽然不高, 但自然生态条件较好的区域因资源开发等人类活动而导致生境多为点状退化, 未来应该将生物多样性保护工作转向最脆弱的地点, 以应对地方尺度上的人为压力和额外威胁。

3) 各类保护地中, 国家公园的生境退化度最低、而其他保护地最高。总体上全省生境质量的热点覆盖面积远高于生境退化的热点覆盖面积。不同类型保护地热点覆盖率差异性较大, 虽然其他类保护地的生境质量热点覆盖率最高, 但是其生境退化热点覆盖率也在保护地类型中最高, 今后自然保护地管理的重点应该放在其他保护地, 加强其他自然保护地的生态修复和恢复, 减少人类活动的干扰。

[参 考 文 献]

- [1] 傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 341-348.
Fu Bojie, Yu Dandan, Lv Nan. An indicator system for biodiversity and ecosystem services evaluation in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(2): 341-348. (in Chinese with English abstract)
- [2] Haddad N M, Brudvig L A, Clobert J, et al. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems[J]. Science Advances, 2015, 1(2): 1-9.
- [3] Czech B, Devers P K, Krausman P R. Economic associations among causes of species endangerment in the United States[J]. BioScience, 2000, 50(7): 593-601.
- [4] Vitousek P M, Mooney J, Lubchenco J M, et al. Human domination of earth's ecosystem[J]. Science, 1997, 277: 494-499.
- [5] 张利, 陈亚恒, 门明新, 等. 基于 GIS 的区域生态连接度评价方法及应用[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 218-226.
Zhang Li, Chen Yaheng, Men Mingxin, et al. Assessing method for regional ecological connectivity and its application based on GIS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(8): 218-226. (in Chinese with English abstract)
- [6] Newbold T, Hudson L N, Hill S L, et al. Global effects of landuse on local terrestrial biodiversity[J]. Nature, 2015, 520(7545): 45-50.
- [7] Zhao X J, Meng H X, Wang W H, et al. Prediction of the distribution of alpine tree species under climate change scenarios: *Larix chinensis* in Taibai Mountain (China)[J]. Polish Journal of Ecology, 2016, 64: 200-212.
- [8] 李岩, 李淮. 甘肃生物多样性与生态保护[J]. 甘肃林业, 2004(4): 18-20.
- [9] 刘庄, 沈渭寿, 车克钧, 等. 祁连山自然保护区生态承载力分析与评价[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(3): 19-22.
Liu Zhuang, Shen Weishou, Che Kejun, et al. Ecological resilience of Qilian Mountain Nature Reserve[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2006, 22(3): 19-22. (in Chinese with English abstract)
- [10] Gray C L, Hill S L L, Newbold T, et al. Local biodiversity is higher inside than outside terrestrial protected areas worldwide[J]. Nature Communications, 2016, 28(7): 12306.
- [11] Maiorano L, Falcucci A, Garton E O, et al. Contribution of the Natura 2000 network to biodiversity conservation in Italy[J]. Conservation Biology, 2007, 21: 1433-1444.
- [12] Stephens P A, Pettorelli N, Barlow J, et al. Management by proxy? The use of indices in applied ecology[J]. Journal of Applied Ecology, 2015, 52: 1-6.
- [13] Maes J, Paracchini M L, Zulian G, et al. Synergies and trade-offs between ecosystem service supply, biodiversity, and habitat conservation status in Europe[J]. Biological Conservation, 2012, 155: 1-12.
- [14] Sallustio L, De T A, Strollo A, et al. Assessing habitat quality in relation to the spatial distribution of protected areas in Italy[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 201: 129-137.
- [15] Berglund M, Jacobi M N, Jonsson P R. Optimal selection of marine protected areas based on connectivity and habitat quality[J]. Ecological Modelling, 2012, 240: 105-112.
- [16] 顾羊羊, 黄贤峰, 邹长新, 等. 沅江源自然保护区生境质量变化遥感监测[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(6): 764-772.
Gu Yangyang, Huang Xianfeng, Zou Changxin, et al. Monitoring habitat quality changes in Yuanjiangyuan Nature Reserve based on landsat images[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(6): 764-772. (in Chinese with English abstract)
- [17] 巩杰, 马学成, 张玲玲, 等. 基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生境质量时空分异[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 191-196.
Gong Jie, Ma Xuecheng, Zhang Lingling, et al. Monitoring

- habitat quality changes in Yuanjiangyuan Nature Reserve based on Landsat images[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 25(3): 191-196. (in Chinese with English abstract)
- [18] 钟莉娜, 王军. 基于 InVEST 模型评估土地整治对生境质量的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(1): 250-255.
- Zhong Lina, Wang Jun. Evaluation on effect of land consolidation on habitat quality based on InVEST model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(1): 250-255. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘春艳, 朱康文, 刘吉平. 三峡库区重庆段土地覆盖和生物多样性功能演化及预测[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(19): 258-267.
- Liu Chunyan, Zhu Kangwen, Liu Jiping. Evolution and prediction of land cover and biodiversity function in Chongqing section of Three Gorges Reservoir Area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(19): 258-267. (in Chinese with English abstract)
- [20] 刘园, 周勇, 杜越天. 基于 InVEST 模型的长江中游经济带生境质量的时空分异特征及其地形梯度效应[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(10): 2429-2440.
- Liu Yuan, Zhou Yong, Du Yuetian. Study on the spatio-temporal patterns of habitat quality and its terrain gradient effects of the middle of the Yangtze River economic belt based on InVEST model[J]. *Resources and Environment of the Yangtze River Basin*, 2019, 28 (10): 2429-2440. (in Chinese with English abstract)
- [21] 刘智方, 唐立娜, 邱全毅, 等. 基于土地利用变化的福建省生境质量时空变化研究[J]. *生态学报*, 2017, 37(13): 4538-4548.
- Liu Zhifang, Tang Lina, Qiu Quanyi, et al. Temporal and spatial changes in habitat quality based on landuse change in Fujian Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(13): 4538-4548. (in Chinese with English abstract)
- [22] 陈妍, 乔飞, 江磊. 基于 InVEST 模型的土地利用格局变化对区域尺度生境质量的评估研究—以北京为例[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2016, 52(3): 553-562.
- Chen Yan, Qiao Fei, Jiang Lei. Effects of land use pattern change on regional scale habitat quality based on InVEST model-A case study in Beijing[J]. *Journal of Peking University: Natural Science Edition*, 2016, 52 (3): 553-562. (in Chinese with English abstract)
- [23] Myers N. Threatened biotas: "Hot spots" in tropical forests[J]. *Environmentalist*, 1988, 8: 187-208.
- [24] Schroter M, Remme R P. Spatial prioritisation for conserving ecosystem services: Comparing hotspots with heuristic optimization[J]. *Landscape Ecology*, 2016, 31: 431-450.
- [25] Sharp R, Douglass J, Wolny S, et al. InVEST 3. 8. 9 user's guide [M/OL]. [2020-06-01]. <http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/>.
- [26] Terrado M, Sabater S, Chaplin-Kramer B, et al. Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 540: 63-70.
- [27] Leh M D K, Matlock M D, Cummings E C, et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2013, 165: 6-18.
- [28] Tallis H, Ricketts T, Guerry A, et al. InVEST user's guide: integrated valuation of environmental services and tradeoffs[Z]. Stanford: The Natural Capital Project, 2013.
- [29] Hartigan J A. Clustering Algorithms: John Wiley & Sons[J]. *Science*, 1918, 47(3): 100.
- [30] Anselin L. Local indicators of spatial association d LISA[J]. *Geographical Analysis*. 1995, 27: 93-115.
- [31] 薛达元, 蒋明康. 中国自然保护区对生物多样性保护的贡献[J]. *自然资源学报*, 1995, 10(3): 286-292.
- Xue Dayuan, Jiang Mingkang. Contributions of nature reserves in China to biodiversity conservation[J]. *Journal of Natural Resources*, 1995, 10(3): 286-292. (in Chinese with English abstract)
- [32] 欧阳志云, 杜傲, 徐卫华. 问题与对策 我国生物多样性格局与自然保护地体系建设[J]. *人与生物圈*, 2018(5): 42-43.
- Ouyang Zhiyun, Du Ao, Xu Weihua. Problems and countermeasures: China's biodiversity personality and the construction of Nature Reserve System[J]. *Man and the Biosphere*, 2018(5): 42-43. (in Chinese with English abstract)
- [33] Geldmann J, Barnes M, Coad L, et al. Effectiveness of terrestrial protected areas in reducing habitat loss and population declines[J]. *Biological Conservation*, 2013, 161: 230-238.
- [34] Riveccio R, Sallustio L, Paolanti M, et al. Where landuse changes occur: Using soil features to understand the economic trends in agricultural lands[J]. *Sustainability*, 2017, 9(1): 20.
- [35] Sallustio L, De Toni A, Strollo A, et al. Assessing habitat quality in relation to the spatial distribution of protected areas in Italy[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 201: 129-137.

Assessment of habitat quality and degradation degree based on InVEST model and Moran index in Gansu Province, China

Zhao Xiaojiong^{1,2,3}, Wang Jian^{1*}, Su Junde⁴, Sun Wei³, Jin Wangqiang³

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Gansu Academy of Eco-environmental Sciences, Lanzhou 730020, China; 4. Gansu Vocational & Technical College of Nonferrous Metallurgy, Jinchang 737100, China)

Abstract: The habitat quality is directly related to the habitat suitability provided by land use/land cover types for biodiversity. Habitat quality is seriously threatened by human activities, especially agricultural development activities, cities, roads. In order to assess the habitat quality and degradation degree in the ecologically fragile areas of Northwest China, taking Gansu Province as an example, based on the high-resolution (30 m) land use/land cover type data and various types of natural reserve data, habitat quality module in InVEST software was used to evaluate the habitat quality and degradation, and both spatial analysis and local Moran's I were used to identify the hot spots and cold spots of habitat quality and degradation. On this basis, the relationship between habitat quality and degradation and the hot spots and all kinds of natural protected areas were analyzed. The results showed that: 1) The habitat quality was gradually decreasing from south to north, while, the habitat degradation was gradually increasing from north to south in Gansu Province. In the south and east of Gansu Province, the habitat degradation was also high, due to the strong disturbance of human activities, even though the habitat quality generally presented well. The habitat quality and degradation depended mainly on the location and intensity of human activities. The combination of habitat quality and degradation can more truly represent the current level of habitat protection. 2) The hot spots of habitat quality accounted for 25.59% of the total land area of Gansu Province, and most distributed in the south of Gansu Province, indicating a consistent with the proportion of natural conservation areas in Gansu Province. Most areas showed better natural ecological conditions, due to there was not many areas of degradation in hot spots. A recommendation can be made during this time, to turn the biodiversity conservation into the most endangered sites in the future; 3) In all types of protected areas, the habitat degradation of National Park was the lowest, whereas, that of other protected areas was the highest. The coverage area of hot spot in habitat quality was much higher than that of habitat degradation. The coverage rate of hot spot significantly varied in the different types of protected areas. The coverage rate of hot spot for habitat degradation was also the highest in the protected areas, while that for habitat quality dominated in other types of protected areas. A suggestion was made during this time that the strategy planning of nature reserve can be focused on other protected areas, in order to strengthen the ecological restoration in other nature reserve, and further to reduce the interference of human activities. The findings can offer the accurate implementation of biodiversity conservation strategies and ecosystem management decisions in the western China.

Keywords: models; land use; cluster analysis; habitat quality; hot spot analysis; Gansu Province