

引用格式:王洁,摆万奇,田国行. 青藏高原景观生态风险的时空特征[J]. 资源科学, 2020, 42(9): 1739-1749. [Wang J, Bai W Q, Tian G H. Spatiotemporal characteristics of landscape ecological risks on the Tibetan Plateau[J]. Resources Science, 2020, 42(9): 1739-1749.] DOI: 10.18402/resci.2020.09.09

青藏高原景观生态风险的时空特征

王洁^{1,2}, 摆万奇¹, 田国行²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 河南农业大学风景园林与艺术学院, 郑州 450002)

摘要:以1992、2001、2008和2015年4期青藏高原土地覆被数据为基础,运用ArcGIS10.5和Fragstats4.2等软件,构建基于景观格局和景观脆弱度的生态风险指数,借助地统计分析和空间自相关分析方法,开展青藏高原生态风险评价研究,分析景观生态风险的时空特征,为青藏高原土地利用生态风险防范提供科学依据。结果显示:①青藏高原景观生态风险分布具有聚集效应,总体呈西北高东南低的梯度分布规律,这与青藏高原的自然地带性关系密切;②1992—2015年间,青藏高原景观生态风险总体呈下降趋势,主要表现为高风险区与较高风险区面积减少,以及低风险区与较低风险区面积扩大。变化的主要动因是20世纪90年代以来青藏高原气候暖湿化过程和生态建设对青藏高原土地覆被结构的影响;③青藏高原各地类景观生态风险值较高的区域主要集中在不同地类相接的边缘地带。低生态风险等级在林地中占比最大,高生态风险等级在裸地和冰川与雪被中占比较大。裸地和草地高生态风险等级面积下降率最大,反映出裸地和草地变化对青藏高原景观生态风险影响最为显著,在青藏高原的生态风险管理过程中应重点关注裸地和草地的结构和质量变化。

关键词:生态风险评价;景观格局;空间自相关;时空特征;青藏高原

DOI:10.18402/resci.2020.09.09

1 引言

生态风险评价是生态系统评估的重要研究领域,基于土地利用/土地覆被格局的景观生态风险评价是生态风险评价的重要组成部分。景观生态风险是指自然或人为因素影响下景观格局与生态过程相互作用可能产生的不利后果^[1],能直观反映土地利用/土地覆被变化对景观组分、结构和功能的不利影响。景观生态风险评价对于掌握区域生态风险的总体特征、动态趋势以及开展生态风险管理具有重要作用。目前,景观生态风险评价研究多以中小尺度和人类干预较强的区域为主^[2-6],对于大尺度和景观异质性较强的生态脆弱区的研究则相对薄弱。本文尝试通过对青藏高原土地覆被空间格局变化和景观异质性的空间化表达,从宏观角度综合

表征时间序列上生态系统内在变化的累积效应,探索大尺度生态脆弱区生态风险的时空特征。

青藏高原是中国乃至亚洲重要的生态安全屏障,在气候调节、水土保持、水源涵养、生物多样性保护、碳蓄积等方面发挥着重要作用^[7]。由于高寒环境的脆弱性及对外部干扰的敏感性^[8,9],使得青藏高原成为全球变化研究的重要区域。过去几十年,全球气候变化和人类活动对青藏高原的生态环境造成很大影响^[10],如土地覆被与景观格局的变化,以及冰川冻土退缩、草地退化、生物多样性降低等^[11],所产生的生态风险日益受到关注。目前对于青藏高原的生态风险评价研究主要针对一些重点区域,研究内容包括土壤重金属污染以及基础设施建设造成的生态风险等^[12-15],而对高原全域的大尺度研

收稿日期:2020-03-23;修订日期:2020-08-24

基金项目:中国科学院战略先导科技专项(A类)(XDA20040201);第二次青藏高原综合科学考察项目(2019QZKK0603)。

作者简介:王洁,女,河南安阳人,硕士生,研究方向为土地利用生态风险。E-mail: 434348259@qq.com

通讯作者:摆万奇,男,河南南阳人,副研究员,博士,研究方向为土地利用/土地覆被变化。E-mail: baiwq@igsnr.ac.cn

究仍然缺乏。随着青藏高原生态保护国家战略的实施和第二次青藏高原科学考察的持续推进,从宏观角度把握高原生态系统格局和生态风险变化,对于维护青藏高原生态屏障功能,保障区域可持续发展十分必要。本文运用景观生态风险评价模型,以青藏高原全域为研究对象,定量评价青藏高原景观生态风险的时空分布与变化特征,旨在反映近年来气候变化和人类活动对青藏高原景观格局与生态风险的影响程度,为高原土地利用生态风险防范提供科学依据和技术支持,进而服务于青藏高原资源开发与生态建设,维护其生态系统的健康稳定。

2 数据与研究方法

2.1 数据来源与处理

本文所采用的数据包括青藏高原土地覆被图、青藏高原边界范围图、行政边界图、地理生态区划图等。

土地覆被数据采用欧空局(<http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer>)1992—2015年间气候变化项目土地覆被数据集(Climatic Change Initiative Land Cover,简称CCI-LC),数据类型为栅格数据,栅格单元为300 m×300 m。该数据集在现有土地覆被数据中时间跨度较长,精度相对较高^[6]。土地覆被包括耕地、林地(森林、灌木林地、其他林地)、草地、湿地(与水体)、建设用地、裸地、冰川与雪被等7个一级类型^[17]。采用Albers_Conic_Equal_Area投影坐标系,利用ArcGIS10.5和Fragstats4.2软件计算青藏高原景观生态风险指数。

研究区域采用中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA20040201)课题组统一的青藏高原边界范围^[18],该边界在综合考虑地貌、海拔、山体完整性等自然地理要素基础上确定,对青藏高原的范围与边界位置进行了全面细致的定位^[19]。该边界范围内包括西藏和青海以及四川、甘肃、云南和新疆等省区的部分地区(图1)。行政边界采用中国科学院资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn>)中的青藏高原地区省市边界。涉及国界、省界部分以权威测绘部门为准。生态地理区划图采用《中国生态地理区域系统研究》中的结果^[20],其中将青藏高原划分为3个温度带、4个干湿区,共计11个生态地理区^[21]。

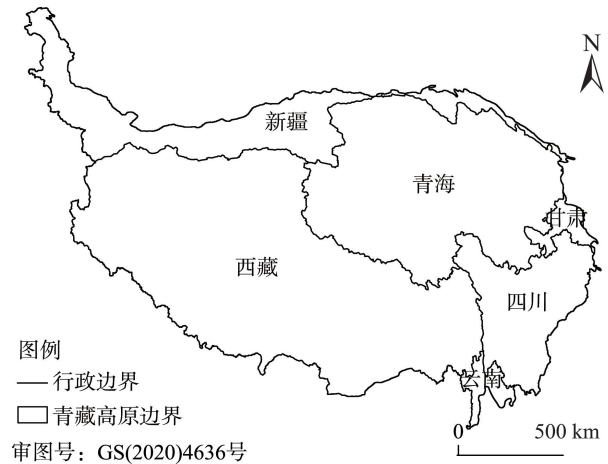


图1 研究区范围

Figure 1 The scope of the study area

2.2 研究方法

2.2.1 评价单元划分

风险评价单元划分是生态风险评价和生态风险空间可视化表达的重要步骤。根据研究区范围和采样工作量,本文采用30 km×30 km的网格,将青藏高原划分为3083个评价单元,计算出每个评价单元的生态风险指数,将其作为属性值赋于各评价单元的中心点^[22]。

2.2.2 景观生态风险指数构建

青藏高原景观生态风险指数由景观干扰度指数和景观脆弱度指数两部分构成,其中景观干扰度指数包括景观破碎度指数、景观分离度指数和景观优势度指数3项内容。

(1) 景观干扰度指数(E_i)

景观干扰度指数可反映青藏高原不同景观类型所受的干扰程度,本文选取景观破碎度指数、景观分离度指数和景观优势度指数构建景观干扰度指数^[6]。

① 景观破碎度指数(C_i)

景观破碎度指数表示在自然或人为干扰下,各土地覆被类型斑块由单一连续变为复杂不连续的过程,其值越大,表明所对应的土地覆被类型生态系统稳定性越低^[23]。公式为:

$$C_i = \frac{n_i}{A} \quad (1)$$

式中: n_i 为土地覆被类型*i*的斑块个数; A 为风险评价单元的面积。

2020年9月

②景观分离度指数(S_i)

景观分离度指数指单个土地覆被类型中不同斑块分布的分离程度,其值越大,表明该土地覆被类型在地域上越分散,分布越复杂。公式为:

$$S_i = \sqrt{\frac{n_i}{A} \times \frac{A}{2A_i}} \quad (2)$$

式中: A_i 为景观类型 i 的面积。

③景观优势度指数(D_i)

景观优势度指数表征土地覆被结构中受某一类型支配的程度,可反映该土地覆被类型对景观格局形成和变化影响的大小。景观优势度指数越大,反映景观生态风险越高。公式为:

$$D_i = \frac{Q_i + M_i}{4} + \frac{L_i}{2} \quad (3)$$

式中: Q_i 为土地覆被类型 i 出现的风险评价单元数除以风险评价单元总数; M_i 为土地覆被类型 i 的斑块数除以评价单元内的总斑块数; L_i 为土地覆被类型 i 的面积与评价单元总面积之比^[23]。

根据上述公式计算出各指标后,对所得各值进行归一化处理。结合已有研究,综合各景观指数对景观生态风险的贡献程度,将以上景观指数的权重分别赋值为 0.5、0.3、0.2^[24]。每个风险评价单元各土地覆被类型的景观干扰度指数计算公式如下:

$$E_i = 0.5 \times C_i + 0.3 \times S_i + 0.2 \times D_i \quad (4)$$

(2)景观脆弱度指数(F_i)

景观脆弱性反映了不同土地覆被类型内部生态系统结构的易损性及景观抵御外来干扰的能力,较高的脆弱度指数伴随着较大的生态风险。借鉴已有研究^[25]并结合青藏高原的实际情况,通过专家打分法,确定 7 种土地覆被类型的脆弱性赋值,由高到低依次为建设用地 7、裸地 6、耕地 5、草地 4、冰川与雪被 3、湿地 2、林地 1,通过 Z-scores 标准化方法归一化得到各土地覆被类型的 F_i 值,分别为: 0.9097、0.8949、0.8743、0.8440、0.7952、0.7048、0.5000。

(3)景观生态风险指数(ERI_k)

通过对研究区域的风险评价单元划分,将景观指数与区域生态风险建立联系,从而得到景观生态风险指数^[22],其公式如下:

$$ERI_k = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{A} (E_i \times F_i) \quad (5)$$

式中: ERI_k 为第 k 个风险评价单元的生态风险指数值; A_i 为第 k 个风险评价单元内土地覆被类型 i 的面积; A 为第 k 个风险评价单元的面积; E_i 和 F_i 分别为第 k 个风险单元土地覆被类型 i 的干扰度指数值与脆弱度指数值。计算出 3083 个风险评价单元的风险值,并分别赋予各单元中心点。

2.3 景观生态风险空间化

运用 ArcGIS10.5 结合空间自相关分析和半方差分析对青藏高原景观生态风险进行空间化表达。通过全局空间自相关 Moran's I 指数确认高原相邻或近邻区域风险评价单元属性值是否具有关联性。Moran's I 值介于 -1~1 之间,大于 0 表示正相关,即高值区域与高值区域聚集,低值区域与低值区域聚集。小于 0 表示负相关,等于 0 表示不相关^[26]。通过局部空间自相关(LISA)来描述高原局部小范围内的空间变量属性值与周边单元的相似性和相关性^[27]。通过 ArcGIS 的地统计分析模块对点数据进行半变异函数拟合,得到最佳拟合模型^[28]。普通克里金插值法可以依据存在空间相关性的原始数据,对未采样区域进行线性最优估计,常用于估计样点属性值,所得数据较平滑,连续性较强。因此,运用普通克里金插值法分别对 4 期点数据进行空间插值得到生态风险空间分布图。

3 结果与分析

3.1 青藏高原景观生态风险空间表达

青藏高原 4 期(1992 年、2001 年、2008 年、2015 年)景观生态风险的 Moran's I 指数分别为 0.7273、0.6548、0.7332、0.7328,均大于 0,反映青藏高原景观生态风险相邻空间单元属性值相似程度较高,具有较强的正相关性,风险值分布在空间上呈较强的聚集效应,相互之间存在影响。局部空间自相关分析结果显示,整个高原景观生态风险值的空间分布主要表现为,高值在高原西北部地区和东北部小范围地区聚集,低值主要在高原东南部区域聚集。

半方差分析过程中,4 种模型(球状模型、指数模型、高斯模型和线性模型)的拟合结果表明,4 个时段最理想的拟合模型均为指数模型。采用指数模型拟合结果,通过普通克里金插值法对景观生态风险指数进行空间插值,生成 4 期景观生态风险分布图。运用自然断点法将 2015 年的生态风险值分

为5个等级：低风险($ERI < 0.1282$)、较低风险($0.1282 \leq ERI < 0.1594$)、中等风险($0.1594 \leq ERI < 0.1803$)、较高风险($0.1803 \leq ERI < 0.2060$)、高风险($ERI \geq 0.2060$)，其他3期数据均采用2015年的分级区间，便于4期数据的比较分析。图2可以看出青藏高原4个时间点的景观生态风险具有相似的结构与分布特征。在风险等级构成中，中等风险区所占的面积比例最高，其次是较低风险区，低风险区比例最小。风险等级空间分布总体呈西北高东南低的梯度规律。高风险区与低风险区分别位于两端，较高风险区主要分布于高风险区周围，较低风险区主要分布于低风险区周围，中等风险区和较低风险区分布最为广泛。

3.2 青藏高原景观生态风险空间分布特征

3.2.1 景观生态风险空间分布格局

从2015年青藏高原景观生态风险的地域分布看，高风险区主要分布于高原西北部的喀什、和田、

巴音郭楞蒙古自治州的大部分地区、阿里和那曲的北部地区以及高原东北的湟水谷地部分区域。这是因为这些地区大部分自然生态环境脆弱性高，植被生长条件差，裸地分布较多，土地覆被破碎化程度和分离度均较高，从而导致生态系统风险偏高。湟水谷地地区则是由于人类活动集中，建设用地和耕地分布较多，景观干扰度较高，从而导致土地覆被格局上的高风险。较高风险区主要分布于日喀则西部边缘区和南部小部分区域、拉萨市和西宁市及玉树和海西部分地区。中等风险区域位于较低风险区与较高风险区的过渡区域，分布最为广泛，主要分布于阿里南部、那曲西部、昌都北部、阿坝和甘孜西北部、日喀则、玉树、海西、果洛大部分地区。低风险区集中分布于高原的东南部，包括云南、西藏林芝大部分区域和西藏山南、昌都东南部、四川甘孜阿坝东南部区域，另外，青海湖和纳木错区域属于大面积湖泊区，脆弱性和破碎度指数较

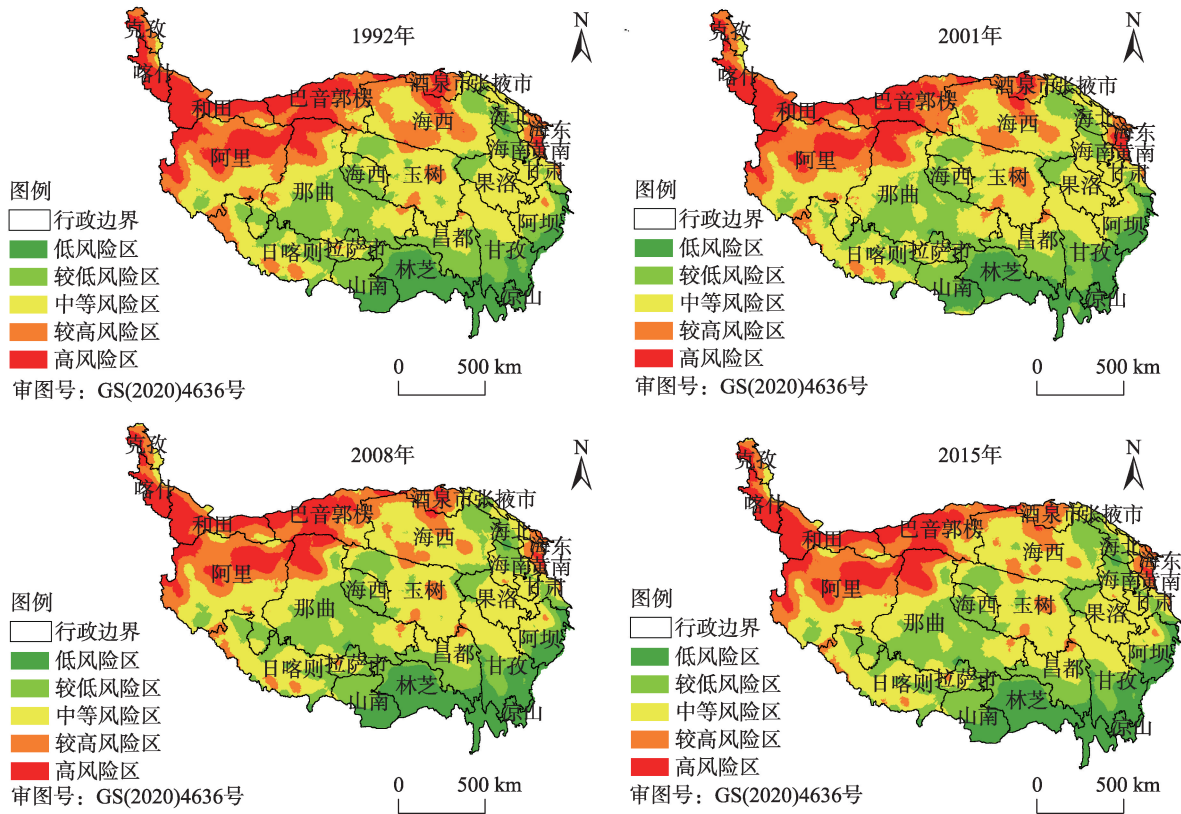


图2 青藏高原4期景观生态风险空间分布图

Figure 2 Spatial distribution of landscape ecological risks on the Tibetan Plateau for four phases

注：克孜指克孜勒苏柯尔克孜自治州；巴音郭楞指巴音郭楞蒙古自治州；海东指海东地区；海南指海南藏族自治州；海西指海西蒙古族藏族自治州；海北指海北藏族自治州；玉树指玉树藏族自治州；黄南指黄南藏族自治州；果洛指果洛藏族自治州。下同。

2020年9月

低,景观格局生态风险也较低。较低风险区除分布于低风险区周边外,在河湖分布众多的西藏那曲地区的中部及东南部和草地面积占比较大且连接度较好的青海省东部和东北部也有较大面积的分布。

青藏高原景观生态风险的空间分布特征与生态地理区具有较好的相关性。统计结果(图3)显示,低风险区主要分布在湿润地区、湿润/半湿润地区,较高风险区和高风险区主要分布于半干旱和干旱地区。研究表明2015年青藏高原景观生态风险低风险区在湿润地区、湿润/半湿润地区的占比最大,分别为99.4%、43.3%;较低风险区有96%分布于湿润/半湿润、半湿润及半干旱地区,在干旱地区仅有4%的分布。中等风险区除在湿润地区外其他区域均有分布,且在干旱和半干旱地区分布面积最大,占总面积的70.1%。较高风险区除在湿润地区外,在其他区域均有分布,其中有64.4%的区域位于干旱地区。高风险区仅分布于干旱地区与半干旱地区,其中有85.6%分布于干旱地区,其余分布于半干旱地区。

3.2.2 不同土地覆被类型景观生态风险空间分布

由于每个风险评价单元景观生态风险指数值是由各地类景观生态风险值加和所得,现将各土地覆被类型的生态风险值赋予其对应的风险评价单元,则可对不同土地覆被类型景观生态风险的空间分布特征加以分析。2015年不同土地覆被类型景观生态风险空间分布表明(图4),由于不同土地覆被类型在高原的聚集区域和空间格局不同,地类间的景观生态风险分布特征存在较大差异。耕地主要在西宁市、海东、海南南部、玉树中部、果洛东北部、甘孜北部、那曲东南部等地表现出较高的生态

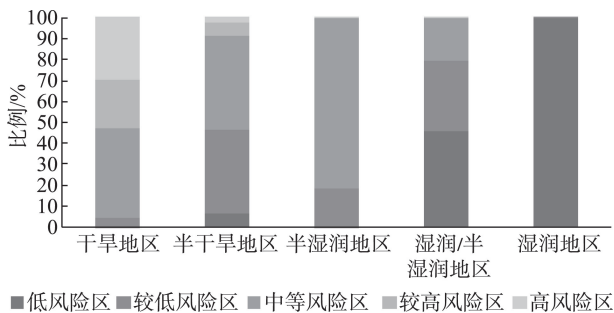


图3 2015年青藏高原景观生态风险各等级在干湿区占比
Figure 3 Proportion of different levels of landscape ecological risks in the arid and humid areas of the Tibetan Plateau, 2015

风险。林地主要在青藏高原的东南部集中分布,其景观生态风险的高风险区域主要位于西宁市、海东及玉树中东部。草地是青藏高原最主要的土地覆被类型,其景观生态风险在高原西北部与东部边缘地区呈现出相对较高的状态,前者与西北部自然环境高度脆弱关系紧密,后者可能更多受密集人类活动的影响。湿地的风险分布较为分散,高风险区主要分布于阿坝北部的若尔盖地区。建设用地在整个高原范围内所占面积很小,且较为分散,高风险区在“河湟谷地”和“一江两河”区域聚集明显。裸地的高风险区主要分布在和田、巴音郭楞、阿里、那曲北部及喀什中部大部分地区,该区域处于裸地分布较集中地区的边缘地带,这些地区由于植被稀少,使得裸地空间破碎化现象严重。高原冰川与雪被的高风险区主要集中在昌都西南部和喀什北部,这些地区由于冰川退缩,使得冰川与雪被斑块分离破碎,表现出了较高的生态风险。

3.3 青藏高原景观生态风险时空变化特征

3.3.1 景观生态风险等级变化与转移

1992—2015年间,青藏高原景观生态风险平均值从0.1693下降到0.1661,下降率为1.89%,生态风险总体呈下降趋势,主要表现为高风险区与较高风险区面积缩小,以及低风险区与较低风险区面积扩大,其中前者更为明显。24年间,高风险区与较高风险区面积之和共减少130492.1 km²,两者占比共下降5.06%。分阶段看,1992—2001年间下降1.56%,2001—2008年间下降2.62%,2008—2015年间下降0.88%,经历了较快和缓慢的变化过程。24年间,低风险与较低风险区域的总面积增加71096.49 km²,比例上升2.76%,变化幅度小于高风险区与较高风险区。同时期,中等风险等级面积增加59446.2 km²,占比增加了2.31%(表1)。

青藏高原景观生态风险等级变化主要是相邻风险等级间的转移。对1992—2015年景观生态风险等级转移矩阵(表2)的分析表明:1992—2015年间,高原全域85%的区域景观生态风险等级未改变,风险等级上升的区域有46447.47 km²,占总面积的1.8%,风险等级下降的区域有339851.4 km²,占总面积的13.2%。其中较低风险区与低风险区之间存在相互转化,跨风险等级的转化很少发生。

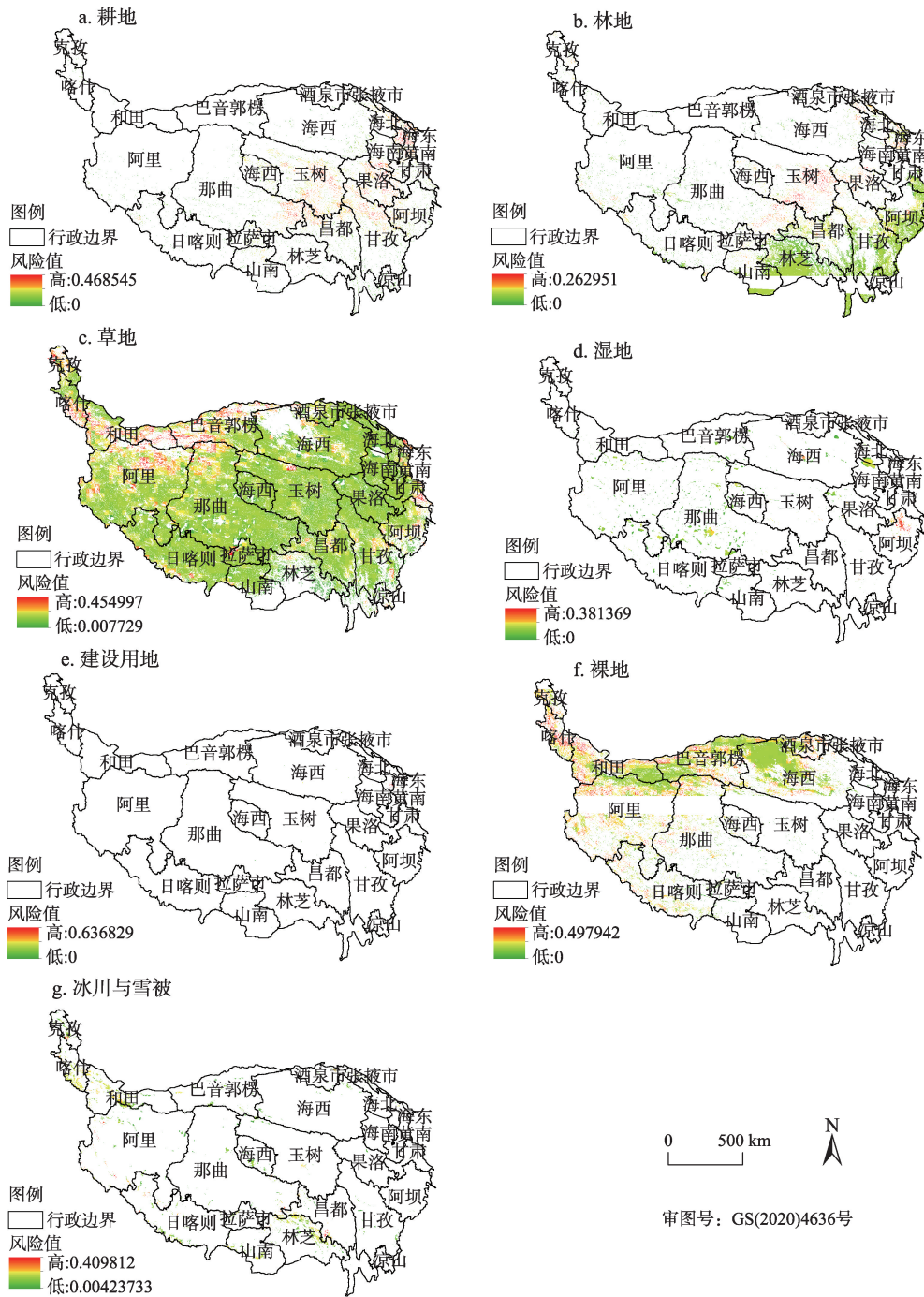


图4 2015年青藏高原各土地覆被类型景观生态风险空间分布

Figure 4 Spatial distribution of landscape ecological risks by land cover types on the Tibetan Plateau, 2015

3.3.2 景观生态风险空间变化特征

通过 ArcGIS 空间分析中的栅格计算器进行图层运算,得到 1992—2015 年间景观生态风险等级空间变化图(图 5),其中改善区为风险等级降低区域,恶化区为生态风险等级升高区域,稳定区为生态风险等级未发生变化的区域。图 5 显示,1992—2015

年青藏高原大部分区域景观生态风险处于稳定状态,改善区域明显多于生态风险恶化区域,各风险等级的边缘地带是较易发生改变的。恶化区域主要分布于日喀则东北部、那曲北部少数地区、以及昌都、玉树、甘孜三地交接处和河湟谷地部分区域。其中,河湟谷地地区是人类活动密集地区,

2020年9月

表1 1992—2015年青藏高原生态风险等级面积及比例

Table 1 Area and proportion of ecological risk classes of the Tibetan Plateau, 1992-2015

生态风险等级	1992年		2001年		2008年		2015年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
低风险区	254232.9	9.87	253449.2	9.84	293864.9	11.41	292374.4	11.35
较低风险区	606501.5	23.54	595728.1	23.13	631298.3	24.51	639406.0	24.82
中等风险区	911477.6	35.38	963214.3	37.39	954706.9	37.06	970923.8	37.69
较高风险区	455490.0	17.68	448225.7	17.40	412036.5	16.00	378722.7	14.70
高风险区	348257.6	13.52	315342.4	12.24	284053.1	11.03	294532.8	11.43

表2 1992—2015年青藏高原景观生态风险等级转移矩阵

Table 2 Transfer matrix of landscape ecological risk level of the Tibetan Plateau, 1992-2015

生态风险等级	1992年不同生态风险等级面积/km ²	2015年不同生态风险等级区面积/km ²				
		低风险区	较低风险区	中等风险区	较高风险区	高风险区
低风险区	253954.70	278.19	0.00	0.00	0.00	
较低风险区	38419.56	538572.30	29509.65	0.00	0.00	
中等风险区	0.00	100555.50	802184.00	8738.10	0.00	
较高风险区	0.00	0.00	139230.10	308338.40	7921.53	
高风险区	0.09	0.00	0.00	61646.22	286611.30	

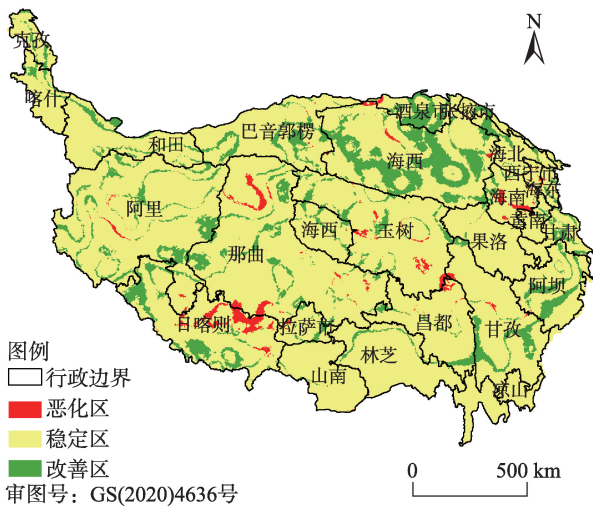


图5 1992—2015年青藏高原景观生态风险变化

Figure 5 Change of landscape ecological risks on the Tibetan Plateau, 1992-2015

耕地、建设用地、草地、裸地交织变化,降低了景观连续性,从而出现景观生态风险增加趋势。改善区域主要分布于海西大部分区域、阿坝和甘孜中部及阿里东南部地区。柴达木盆地周边地带改善区集中分布,直接原因在于裸地减少,原本破碎分离的斑块连接成片,使该区域景观结构得到改善。以林地、耕地和草地为主的三江并流区景观格局稳定向好,高生态风险等级区域面积有降低趋势,低生态

风险区面积局部增加。

3.3.3 不同土地覆被类型景观生态风险变化

基于各风险评价单元不同土地覆被类型的景观生态风险值,分别求出1991年、2001年、2008年、2015年每个土地覆被类型3083个风险评价单元的平均值(表3)。1991—2015年间,不同地类间景观生态风险平均值的排序未发生改变,从大到小的排列顺序均为草地、裸地、林地、耕地、湿地和建设用地,但该时期不同地类生态风险平均值的变化方向和程度存在明显差异。其中,裸地与草地的景观生态风险平均值表现为下降趋势,分别下降6.14%和1.33%,对高原景观格局的改善贡献最大。其他地类的景观生态风险平均值均呈上升趋势,其中建设用地上升216.67%,变化最为明显。其次为耕地,上升4.87%。可见,青藏高原景观生态风险的总体下降主要受到草地、裸地两个景观要素类型的影响,虽然建设用地变化幅度最大,但由于所占面积比例很小,其影响并不大。

根据青藏高原4期景观生态风险等级分布图,分别提取各土地覆被类型所对应区域的景观生态风险等级分布情况,结果显示:不同地类的风险等级结构存在明显差异。其中,耕地、草地、湿地以中等风险等级和较低风险等级为主,二者占比之和分

表3 1992—2015年青藏高原不同土地覆被类型生态风险平均值变化情况

Table 3 Change in average value of ecological risks of different land cover types on the Tibetan Plateau, 1992-2015

年份	耕地	林地	草地	湿地	建设用地	裸地
1992	0.00596 (0.00025)	0.01268 (0.000424)	0.10940 (0.000820)	0.00134 (0.000130)	0.000018 (0.000005)	0.03600 (0.000923)
2001	0.00643 (0.000264)	0.01303 (0.000433)	0.10674 (0.000836)	0.00132 (0.000128)	0.000038 (0.000003)	0.03519 (0.000915)
2008	0.00644 (0.000265)	0.01299 (0.000433)	0.10674 (0.000843)	0.00133 (0.000128)	0.000043 (0.000002)	0.03458 (0.000917)
2015	0.00625 (0.000259)	0.01291 (0.000432)	0.10795 (0.000844)	0.00136 (0.000130)	0.000057 (0.000002)	0.03379 (0.000911)
1992—2015年风险指数变化率/%	4.87	1.81	-1.33	1.49	216.67	-6.14

注:()内为均值标准误差。

别为77.67%、75.31%和72.34%；林地主要为低风险等级，占比达63.72%，而高风险等级仅占0.81%；建设用地主要以中等风险等级和较高风险等级为主，总占比达58.75%；裸地主要为较高风险等级和高风险等级，低风险等级面积仅占0.16%；冰川与雪被风险分布较均匀，但高风险等级相对较高，面积占比为26.51%。除建设用地高风险等级的面积上升率为4.82%外，其他地类中的高风险等级面积均呈减少态势。其中，林地、湿地和草地中的高风险等级与较高风险等级面积下降率最高，分别为22.78%、19.63%和19.52%。从风险等级的变化来看，除建设用地外，其他土地覆被类型的高生态风险等级面积占比均有所减少，其中，耕地减少0.47%，林地减少0.21%，草地减少1.8%，湿地减少1.35%，裸地减少3.64%。而建设用地的高生态风险等级占比在1992年到2001年增加了21.24%，主要由于建设用地扩张，使得其周围土地破碎化；2001年到2015减少了16.19%，主要由于建设用地持续扩张形成连片，破碎度下降。

4 讨论与结论

4.1 讨论

青藏高原景观生态风险空间分布规律与高原自然地带性具有很好的相关性。青藏高原从东南至西北方向，随着海拔不断升高，温度逐渐降低，降水逐渐减少，自然生态系统类型从森林、高寒草地、高寒荒漠，过渡到裸地和冰川，景观脆弱度不断增加，景观生态风险随之升高。因此，青藏高原景观生态风险的分布特征主要受自然因素影响，人类活动的作用仅在部分区域较为突出。这为生态风险

管理提供了重要依据。在人类活动较弱区域，生态风险管理措施以自然保育为主，维护生态系统的健康稳定；在人类活动密集的区域，如“湟水谷地”“一江两河地区”等，应重点关注建设用地和耕地扩张等导致的生态风险增加^[29]，通过合理的土地利用规划和适度生态工程措施降低生态风险等级。

青藏高原景观生态风险等级的梯度分布规律与其土地利用/覆被变化关系密切。1992—2015年间高原总体景观生态风险值呈现下降态势，空间分布表现出总体下降，局部地区上升的特点。而对青藏高原土地覆被变化及植被绿度等相关研究表明，高原植被覆盖度总体增加^[30,31]，草地生长季NDVI呈上升趋势^[30]，生态质量整体好转，局部退化^[32]。土地覆被变化趋势从一个侧面验证了景观生态风险变化特征的合理性。土地覆被和景观生态风险变化的主要动因是20世纪90年代以来青藏高原气候暖湿化过程^[33,34]和生态建设取得的成效。例如，近30年来，国家针对青藏高原相继出台退牧还草、生态安全屏障保护与建设、自然保护区和国家公园建设等一系列生态保护政策措施，成效评估结果显示，包括高原生态系统结构在内的生态环境质量不断改善，土地覆被状况持续好转^[35,36]，从而使高原景观生态风险呈稳定和下降态势。

景观生态风险的时空特征具有明显的尺度效应，采用不同的研究尺度，研究结果可能存在一定程度的差异。本文基于欧空局1992—2015年间气候变化项目土地覆被数据集(CCI-LC)，空间分辨率为300 m×300 m，研究结果反映的是青藏高原宏观层次的景观生态风险特征及其变化过程，对于某些

2020年9月

局部区域或面积占比较小的土地类型(如建设用地)的风险特征则难以准确刻画。此外,景观生态风险的时空特征受土地覆被分类方法和详细程度的影响较大。本文通过对欧空局土地覆被数据进行重分类处理,最终将高原土地覆被类型分为七大类,研究结果反映了主要土地覆被类型所组成的景观格局风险特征,如果采用更多的土地覆被类型,所反映的景观格局、风险特征及评价结果会有所不同。

4.2 结论

本文基于青藏高原1992、2001、2008、2015年4期土地覆被数据开展景观生态风险评价研究,结果表明:

(1)青藏高原景观生态风险值的空间分布呈聚集状态,高值主要在高原西北部聚集,低值主要在高原东南部聚集,总体呈西北高东南低的梯度分布规律。高风险区主要分布于高原的西北部、柴达木盆地东缘及东北部的湟水谷地区,低风险区集中分布于高原的东南部,中等风险区分布于高原中东部和西南部大部分区域,这种生态风险的梯度分布规律与青藏高原的自然地带性关系密切。

(2)1992—2015年间,青藏高原景观生态风险呈总体下降趋势,生态风险平均值下降1.89%,生态状况整体好转,主要表现为高风险区与较高风险区面积减少,以及低风险区与较低风险区面积扩大,与青藏高原土地覆被变化特征具有很好的一致性。

(3)青藏高原景观生态风险在地类间的分布与变化特征存在明显差异。各地类景观生态风险由大到小依次为草地、裸地、建设用地、耕地、冰川与雪被、林地、湿地。其中,裸地和草地景观格局变化对青藏高原景观生态风险影响最为显著。在青藏高原的生态风险管理和生态建设过程中,应重点关注裸地、草地和冰川与雪被的结构和质量变化。

参考文献(Reference):

[1] 彭建,党威雄,刘焱序,等.景观生态风险评价研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(4):664-677.[Peng J, Dang W X, Liu Y X, et al. Review on landscape ecological risk assessment[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(4): 664-677.]

[2] 吕乐婷,张杰,孙才志,等.基于土地利用变化的细河流域景观生态风险评估[J].生态学报,2018,38(16):5952-5960.[Lv L T, Zhang J, Sun C Z, et al. Landscape ecological risk assessment of

Xi River Basin based on land-use change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(16): 5952-5960.]

[3] 谢小平,陈芝聪,王芳,等.基于景观格局的太湖流域生态风险评估[J].应用生态学报,2017,28(10):3369-3377.[Xie X P, Chen Z C, Wang F, et al. Ecological risk assessment of Taihu Lake basin based on landscape pattern[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(10): 3369-3377.]

[4] Hua L Z, Liao J F, Chen H X, et al. Assessment of ecological risks induced by land use and land cover changes in Xiamen City, China [J]. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2018, 25(5): 439-447.

[5] Zou T H, Zhang J Q, Yoshino K. Ecological risk assessment of land use change in the Northeast China: A case study of Linjiang Area[J]. International Journal of Environmental Science and Development, 2016, 7(4): 312-315.

[6] Zhang F, Yushanjiang A, Wang D F. Ecological risk assessment due to land use/cover changes (LUCC) in Jinghe County, Xinjiang, China from 1990 to 2014 based on landscape patterns and spatial statistics[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(13): 1-16.

[7] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,等.青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J].地理学报,2012,67(1):3-12.[Sun H L, Zheng D, Yao T D, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(1): 3-12.]

[8] 徐增让,张德铨,成升魁,等.青藏高原区域可持续发展战略思考[J].科技导报,2017,35(6):108-114.[Xu Z R, Zhang Y L, Cheng S K, et al. Scientific basis and the strategy of sustainable development in Tibetan Plateau[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(6): 108-114.]

[9] 于伯华,吕昌河.青藏高原高寒区生态脆弱性评价[J].地理研究,2011,30(12):2289-2295.[Yu B H, Lu C H. Assessment of ecological vulnerability on the Tibetan Plateau[J]. Geographical Research, 2011, 30(12): 2289-2295.]

[10] Li S C, Zhang Y L, Wang Z F, et al. Mapping human influence intensity in the Tibetan Plateau for conservation of ecological service functions[J]. Ecosystem Services, 2018, 30: 276-286.

[11] 张宪洲,杨永平,朴世龙,等.青藏高原生态变化[J].科学通报,2015,60(32):3048-3056.[Zhang X Z, Yang Y P, Piao S L, et al. Ecological change on the Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(32): 3048-3056.]

[12] 周伟,钟祥浩,曾云英.西藏高原农牧区生态风险评估与管理策略:以山南地区扎囊县为例[J].干旱地区农业研究,2006,24(3):164-169.[Zhou W, Zhong X H, Zeng Y Y. Ecological risk assessment and management in farming-pastoral area in Tibet plateau: Case study in Zhanang County Lhoka Prefecture[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(3): 164-169.]

[13] Chen H, Liu J S, Cao Y, et al. Ecological risk assessment of regions along the roadside of the Qinghai-Tibet highway and railway based on an artificial neural network[J]. Human & Ecological Risk

- Assessment, 2007, 13(4): 900–913.
- [14] 周伟, 曾云英, 陈绍军, 等. 青藏高原基础设施建设规划的生态风险评价: 以西藏山南地区为例[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(4): 21–26. [Zhou W, Zeng Y Y, Chen S J, et al. Ecological risk appraisal of programming infrastructure construction in Tibet Plateau: A case study on Sannan Administrative Region[J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(4): 21–26.]
- [15] Li L M, Wu J, Lu J, et al. Distribution, pollution, bioaccumulation, and ecological risks of trace elements in soils of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 166: 345–353.
- [16] 刘琼欢, 张懿铨, 刘林山, 等. 七套土地覆被数据在羌塘高原的精度评价[J]. 地理研究, 2017, 36(11): 2061–2074. [Liu Q H, Zhang Y L, Liu L S, et al. Accuracy evaluation of the seven land cover data in Qiangtang Plateau[J]. Geographical Research, 2017, 36(11): 2061–2074.]
- [17] 张懿铨, 刘林山, 王兆锋, 等. 青藏高原土地利用与覆被变化的时空特征[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2865–2875. [Zhang Y L, Liu L S, Wang Z F, et al. Spatial and temporal characteristics of land use and cover changes in the Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2865–2875.]
- [18] 张懿铨, 李炳元, 郑度. 《论青藏高原范围与面积》一文数据的发表: 青藏高原范围界线与面积地理信息系统数据[J]. 地理学报, 2014, 69(S1): 65–68. [Zhang L Y, Li B Y, Zheng D. Datasets of the boundary and area of the Tibetan Plateau: Global change research data publishing and repository[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(S1): 65–68.]
- [19] 张懿铨, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积[J]. 地理研究, 2002, 21(1): 1–8. [Zhang Y L, Li B Y, Zheng D. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China[J]. Geographical Research, 2002, 21(1): 1–8.]
- [20] 郑度. 中国生态地理区域系统研究[M]. 北京: 商务印书馆, 2008. [Zheng D. Study on the Eco-geographical Region System of China[M]. Beijing: The Commercial Press, 2008.]
- [21] 张戈丽, 欧阳华, 张宪洲, 等. 基于生态地理分区的青藏高原植被覆被变化及其对气候变化的响应[J]. 地理研究, 2010, 29(11): 2004–2016. [Zhang G L, Ouyang H, Zhang X Z, et al. Vegetation change and its responses to climatic variation based on eco-geographical regions of Tibetan Plateau[J]. Geographical Research, 2010, 29(11): 2004–2016.]
- [22] 周汝佳, 张永战, 何华春. 基于土地利用变化的盐城海岸带生态风险评价[J]. 地理研究, 2016, 35(6): 1017–1028. [Zhou R J, Zhang Y Z, He H C. Ecological risk assessment based on land use changes in the coastal area in Yancheng City[J]. Geographical Research, 2016, 35(6): 1017–1028.]
- [23] Yan Y, Shi S N, Hu B Q, et al. Ecological risk assessment of Guangxi Xijiang River Basin based on landscape pattern[J]. Ekoloji Dergisi, 2018, 27(105): 5–16.
- [24] 巩杰, 赵彩霞, 谢余初, 等. 基于景观格局的甘肃白龙江流域生态风险评价与管理[J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 2041–2048. [Gong J, Zhao C X, Xie Y C, et al. Ecological risk assessment and its management of Bailongjiang watershed, southern Gansu based on landscape pattern[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(7): 2041–2048.]
- [25] 刘焱序, 王仰麟, 彭建, 等. 基于生态适应性循环三维框架的城市景观生态风险评价[J]. 地理学报, 2015, 70(7): 1052–1067. [Liu Y X, Wang Y L, Peng J, et al. Urban landscape ecological risk assessment based on the 3D framework of adaptive cycle[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(7): 1052–1067.]
- [26] 常小燕, 李新举, 李西灿, 等. 矿区土地利用生态风险时空异质性研究[J]. 生态学报, 2019, 39(9): 3075–3088. [Chang X Y, Li X J, Li X C, et al. Spatial-temporal heterogeneity of ecological risk of land use in mining areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): 3075–3088.]
- [27] Xue L Q, Zhu B L, Wu Y P, et al. Dynamic projection of ecological risk in the Manas River basin based on terrain gradients[J]. Science of the Total Environment, 2019, 653: 283–293.
- [28] Jin X, Jin Y X, Mao X F. Ecological risk assessment of cities on the Tibetan Plateau based on land use/land cover changes: Case study of Delingha City[J]. Ecological Indicators, 2019, 101: 185–191.
- [29] 朱杰, 龚健, 李靖业. 青藏高原东部生态敏感区生境质量时空演变特征: 以青海省河湟谷地为例[J]. 资源科学, 2020, 42(5): 991–1003. [Zhu J, Gong J, Li J Y. Spatiotemporal change of habitat quality in ecologically sensitive areas of eastern Qinghai-Tibet Plateau: A case study of the Hehuang Valley, Qinghai Province[J]. Resources Science, 2020, 42(5): 991–1003.]
- [30] 陆晴, 吴绍洪, 赵东升. 1982–2013年青藏高原高寒草地覆盖变化及与气候之间的关系[J]. 地理科学, 2017, 37(2): 292–300. [Lu Q, Wu S H, Zhao D S. Variations in alpine grassland cover and its correlation with climate variables on the Qinghai-Tibet Plateau in 1982–2013[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(2): 292–300.]
- [31] 梁四海, 陈江, 金晓媚, 等. 近21年青藏高原植被覆盖变化规律[J]. 地球科学进展, 2007, 22(1): 33–40. [Liang S H, Chen J, Jin X M, et al. Regularity of vegetation coverage changes in the Tibetan Plateau over the last 21 years[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(1): 33–40.]
- [32] 程琳琳, 刘华, 刘焱序. 青藏高原保护区植被与生态系统服务功能变化的一致性分析[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 277–282. [Cheng L L, Liu H, Liu Y X. Consistency analysis of vegetation and ecosystem services changes in conservation area of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 277–282.]
- [33] 张懿铨, 李兰晖, 丁明军, 等. 新世纪以来青藏高原绿色度变化及动因[J]. 自然杂志, 2017, 39(3): 173–178. [Zhang Y L, Li L H, Ding M J, et al. Greening of the Tibetan Plateau and its drivers since 2000[J]. Chinese Journal of Nature, 2017, 39(3): 173–178.]

2020年9月

- [34] 魏彦强, 芦海燕, 王金牛, 等. 近35年青藏高原植被带变化对气候变化及人类活动的响应[J]. 草业科学, 2019, 36(4): 1163–1176. [Wei Y Q, Lu H Y, Wang J N, et al. Responses of vegetation zones, in the Qinghai–Tibetan Plateau, to climate change and anthropogenic influences over the last 35 years[J]. Pratacultural Science, 2019, 36(4): 1163–1176.]
- [35] 王小丹, 程根伟, 赵涛, 等. 西藏生态安全屏障保护与建设成效评估[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 29–34. [Wang X D, Cheng G W, Zhao T, et al. Assessment on protection and construction of ecological safety shelter for Tibet[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(1): 29–34.]
- [36] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 等. 基于目标的三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估及政策建议[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 35–44. [Shao Q Q, Fan J W, Liu J Y, et al. Target-based assessment on effects of first-stage ecological conservation and restoration project in three-river source region, China and policy recommendations[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(1): 35–44.]

Spatiotemporal characteristics of landscape ecological risks on the Tibetan Plateau

WANG Jie^{1,2}, BAI Wanqi¹, TIAN Guohang²

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Landscape Architecture and Art, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Using the land cover data of the Tibetan Plateau in 1992, 2001, 2008, and 2015 and ArcGIS 10.5 and Fragstats 4.2 software, this research built an ecological risk index based on landscape pattern and landscape vulnerability, and used geo-statistical analysis and spatial autocorrelation analysis methods to conduct an ecological risk assessment for the Tibetan Plateau, then analyzed the spatiotemporal characteristics of landscape ecological risks. It provides a scientific basis for the prevention of land use ecological risks of the Tibetan Plateau. The results show that: (1) The distribution of landscape ecological risks on the Tibetan Plateau has an spatial aggregation effect. On the whole, the risk in the northwest is high, while it is low in the southeast. The spatial distribution of landscape ecological risks is closely related to the natural terrain of the Tibetan Plateau, which is mainly affected by the geographical conditions. (2) From 1992 to 2015, the landscape ecological risks of the Tibetan Plateau showed a downward trend, which is mainly manifested in the reduction of the high and the medium-high risk areas, and the expansion of the low and the medium-low risk areas. The main reason for this change is the influence of the warming and wetting process of the Tibetan Plateau and ecological construction on the land cover structure since the 1990s. (3) There are significant differences in the distribution and characteristics of landscape ecological risk change on the Tibetan Plateau. The regions with higher landscape ecological risk values mainly exist in the marginal areas where different terrains meet. Forest land has the highest proportion of low ecological risk areas, while barren land, glacier, and snow cover have the highest proportion of high ecological risk areas. The declining rate of barren land with high ecological risk grade was the highest, followed by grassland, which reflect that the change of barren land and grassland had the most significant impact on the landscape ecological risks of the Tibetan Plateau.

Key words: ecological risk assessment; landscape pattern; spatial autocorrelation; spatiotemporal characteristics; Tibetan Plateau