

基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生境质量时空分异

巩杰, 马学成, 张玲玲, 柳冬青, 张金茜

(兰州大学 资源环境学院 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要:基于1977年、1990年、2002年、2014年的Landsat TM/ETM+遥感数据,运用GIS和InVEST模型,分析了甘肃白龙江流域生境质量时空分异特征,旨在为流域自然生态系统管理和可持续发展提供参考。结果表明:(1)1977—2014年,林地和草地是该流域的主要土地覆被类型,林地、耕地和建设用地的面积增率为0.4%,0.36%和3.7%,草地、未利用地和水域的减少率约为0.5%。(2)1977—2014年,生境质量总体表现出先降低后缓慢增加的趋势。(3)生境质量较高的区域主要分布在流域西北部与文县南部,集聚于自然保护区和林业管护区;生境质量较低的区域主要分布在河谷近岸、农耕区、城乡聚落区、裸地和低覆盖草地等,集聚于舟曲—武都段白龙江近岸区及文县和武都交界区、宕昌西北部等。研究结果可为流域生境保育及生态建设提供参考依据。

关键词:生境质量; 时空分异; InVEST模型; 甘肃白龙江流域

中图分类号: X171.1; X826

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)03-0191-06

Spatiotemporal Variation of Habitat Quality in Bailongjiang Watershed in Gansu Based on InVEST Model

GONG Jie, MA Xuecheng, ZHANG Lingling, LIU Dongqing, ZHANG Jinxi

(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education,
College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on GIS techniques and InVEST model, the Landsat TM/ETM+ images from 1977, 1990, 2002 and 2014, we analyzed the spatiotemporal variation of habitat quality in the Bailongjiang Watershed (BLJ watershed) in Gansu to provide the scientific support for natural ecosystem management and sustainable development. The results showed that: (1) forestland and grassland were the main land types in the watershed, and the increase rates of forestland, farmland and construction were 0.4%, 0.36% and 3.7%, respectively, and the grassland, unused land and water area reduced about 0.5% from 1977 to 2014; (2) the habitat quality showed a tendency of the decreased first and then increased slowly; (3) the higher habitat quality area mainly distributed in the northwestern BLJ Watershed and the southern part of Wenxian and gathered with area of the nature reserve and forest; the areas with the relatively poor habitat quality mainly distributed in river valleys, farmland area, urban and rural settlement, the bare land and grassland with low vegetation coverage, and gathered in the bank area of Baishuijiang between Zhouqu-Wudu, the adjacent area between Wenxian and Wudu, and the northwestern Tanchang. This study results can provide scientific support for watershed habitat conservation and ecological construction in the mountainous areas in west China.

Keywords: habitat quality; spatiotemporal variation; InVEST model; Bailongjiang Watershed in Gansu

生境质量是指生态系统能够提供给物种个体、种群、群落以及人类持续生存和繁殖所需条件的能力^[1];可用于表征区域地类景观斑块生态适宜性好

坏,其数值大小能够反映区域生境斑块的破碎程度和各景观斑块对生境退化的抗干扰性^[2-4]。大中尺度上开展生境质量时空分异演变研究,是对自然生态系统

健康识别、界定和保育的基础,也是区域生态环境评价与可持续发展管理的前提条件,对制订区域保育政策具有重要意义^[5]。为此,国内外一些学者开展了不同区域的生境质量分析。Valero 等^[6]运用河岸带植被指数(Riparian Forest Quality Index)和河流生境指数(Fluvial Habitat Index)开展了西班牙加利西亚河流生境质量研究,杨建强等^[7]采用生态环境综合指数法分析了莱州湾的生境质量,王琼等^[8]运用层次分析法(AHP)开展了蒲河流域生境质量评估。上述研究多倾向于建立生境评价指标体系来评估生境质量,其结果准确,但时效性相对较差,而在大中尺度区域上进行长时序生境质量时空分异的报道较少,尤其是易灾型山区流域生境质量的研究报道更为鲜见。近年来,随着 3S 技术和生态模型的发展,区域生境质量评估逐渐趋向于模型化、空间化、量化及精细化,如许多学者利用 SolVES 模型^[9]、HSI 模型^[10]、InVEST 模型^[11]等,在自然保护区^[12]、流域^[3]、区域^[13]等尺度上对生境质量进行分析研究。其中 InVEST 模型是目前较为成熟且应用最多的生态系统服务评估模型^[14],其可靠性高^[15]。

InVEST 模型是由美国斯坦福大学和世界自然基金会等机构研发的一种可以量化多种生态系统服务的评估模型,如产水量、土壤保持、水质净化等,具备导入数据量少、输出数据量大的特点,正被用于全球或区域不同生态系统服务评估^[11,16]。甘肃白龙江流域位于青藏高原、秦巴山区和黄土高原的脆弱过渡带,同时也是长江上游重要的水源涵养区和生态屏障,境内地质构造复杂,自然灾害频繁^[17],生态环境脆弱,严重威胁流域自然生态与人类生产活动。因此,本文以甘肃白龙江流域为对象,运用 RS/GIS 技术和 InVEST 模型对其 1977—2014 年的生境质量进行分析,拟揭示甘肃白龙江流域生境质量时空演变特征,旨在为流域自然生态系统保育与社会—经济—自然复合生态系统可持续发展提供参考价值。

1 研究区概况

白龙江发源于四川省与甘肃省交界的碌曲县郎木寺镇,为嘉陵江上游的第一大支流,河源海拔 4 072 m,河道全长 576 km,流域面积为 3.18 万 km²。甘肃白龙江流域(32°36′—34°24′N,103°00′—105°30′E)位于甘肃省东南部,面积约 1.8 万 km²(图 1),地处秦岭地质构造褶皱带,新构造活动强烈,沟深坡陡,地势总体西北高东南低,地形起伏大,主要地貌类型有山地地貌、河谷地貌及黄土地貌,属于亚热带向暖温

带过渡区,夏季高温多雨,冬季温凉少雨,年均气温 6~15℃,年均降水量 400~850 mm。土壤以黄棕壤、棕壤、褐土、黑钙土为主。植被覆盖较好,森林广布,流域源头属青藏高原高寒植被区,中上游以暖温带落叶阔叶林区为主,下游多为亚热带常绿阔叶林^[18],有珙桐(*Davidia involucrata* Baill)、水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)、银杉(*Cathaya*)、香果树(*Emmenopterys henryi* Oliv.)、连香树(*Cercidiphyllaceae*)、鹅掌树(*Acer paxii* Franch)、红椿(*Toona ciliata* Roem.)、南方红豆杉(*Taxus chinensis* (Pilger) Rehd. var.)、水青树(*Tetracentron sinense* Oliv.)等多种珍稀濒危植物以及国家一级保护植物 7 种,二级保护植物 19 种^[19];当归(*Angelica sinensis*)、党参(*Codonopsis pilosula* (Franch.) Nannf.)、大黄(*Rheum palmatum* L.)、红芪(*Hedysarum polybotrys* Hand. Mazz)、柴胡(*Radix bupleuri*)等药用植物近 700 种;拥有大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)、金丝猴(*Rhinopithecus roxellana*)、羚羊(*Antidorcas marsupialis*)、短尾猴(*Macaca arctoides*)、麝(*Moschus moschiferus* Linnaeus)、毛冠鹿(*Elaphodus cephalophus*)、鲵(*Megalobatrachus japonicus daoidianuas* (Blanchard))等 20 多种保护动物。流域内自然灾害种类繁多,其中地质灾害主要以滑坡、泥石流和地震为主^[17],其他灾害主要表现为旱灾、土壤侵蚀、霜冻、冰雹等(甘肃统计年鉴(1984—2014)及地方县志)。至 2014 年末,流域内人口为 123.77 万人,国内生产总值 149.55 亿元,人均生产总值 12 083 元。

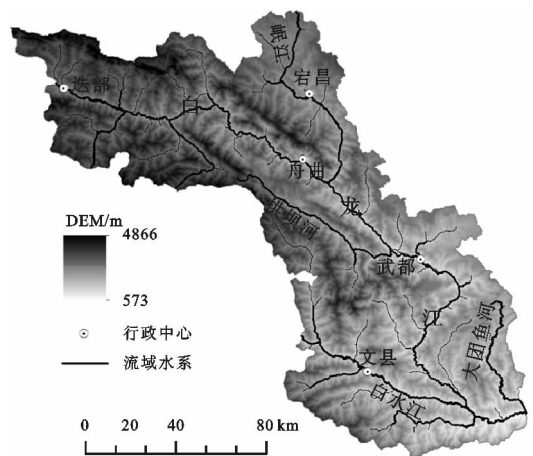


图 1 甘肃白龙江流域位置及高程

2 研究方法

2.1 基础数据准备

土地覆被数据主要通过 Landsat TM/ETM+影像目视解译获得,其遥感影像来源于美国地质调查局和国际科学数据服务平台,分辨率为 30 m,时段分别

为 1977 年、1990 年、2002 年、2014 年,月份为 7—8 月。根据中国土地利用分类的标准和白龙江流域土地资源利用的实际情况,将研究区土地利用类型划为 6 大类,即耕地、林地(包括有林地、灌木林地、疏林地、其他林地)、草地(包括高覆盖草地、中覆盖草地、低覆盖草地)、水域(包括河流、湖泊、水库、坑塘等)、建设用地(包括居民地、工矿用地、城镇等)、未利用地(包括沙地裸地、荒滩、高山积雪、高寒荒漠等)。对解译数据进行拓扑检查和错误修改,并利用野外定点数据对其进行精度验证,符合本研究精度要求。参考流域各县区土地利用类型变更数据库、甘肃省土地利用分布图(1:10 万,http://westdc.westgis.ac.cn/)和白龙江流域植被类型图,对土地利用类型进一步细分,建立相应数据库。

2.2 分析方法

(1) InVEST 生境质量模块的原理是利用不同土地覆被类型的胁迫因子敏感度和外界威胁强度,考虑胁迫因子的影响距离、空间权重及土地受法律保护程度等因素,将生境质量视为一个连续变量,由区域内可供生物生存、繁殖和发展所需资源的多少来决定,继而表征生物多样性的丰富性,即生境质量好的区域,其生物多样性水平亦高,反之亦然^[2-4,12]。具体计算过程如下:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right] \tag{1}$$

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\frac{\omega_r}{\sum_{r=1}^R \omega_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \tag{2}$$

式中: Q_{xj} 为土地覆被类型 j 中栅格单元 x 的生境质量; H_j 为土地覆被类型 j 的生境适宜度; D_{xj} 为土地覆被类型 j 中栅格单元 x 的生境胁迫水平; k 为半饱和系数,通常取 D_{xj} 最大值的一半; z 为常数。 R 为胁迫因子数; y 为胁迫因子 r 的所有栅格单元; Y_r 为胁迫因子 r 所占栅格单元总数;综合考虑研究区特殊地理环境,结合相关文献^[17,20]与各县县志,文章选取对地表景观影响较大的城镇(人口大于 5 000 人)、居民点、人口密度、耕地、道路(国道省道和县乡道路)、综合生态风险源(滑坡、泥石流、地震、干旱、土壤侵蚀)定义为生态胁迫因子,并参考前人研究^[2-4,12]对其赋值,见表 1—2。 r_y 为土地覆被类型栅格单元 y 中的胁迫因子 r ;栅格单元 y 中的胁迫因子 $r(r_y)$ 对生境栅格单元 x 的胁迫作用为 i_{rxy} ,公式为:

线性: $i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \tag{3}$

指数: $i_{rxy} = \exp \left[- \left(\frac{2.99}{d_{rmax}} \right) d_{xy} \right] \tag{4}$

式中: d_{xy} 为栅格单元 x 与栅格单元 y 之间的直线距

离; d_{rmax} 为胁迫因子 r 的最大影响距离; ω_r 为胁迫因子 r 的权重; β_x 为栅格单元 x 的合法可达性(或法律准入程度或到达度),本文因研究区缺失土地保护区数据,暂不考虑白龙江流域特定的土地保护区因素,将流域内各土地覆被类型在国家法律法规上受到保护的程度认为是平等均一的,系统将自动赋值为 1,即完全到达; S_{jr} 为土地覆被类型 j 对胁迫因子 r 的敏感性,取值 0~1。

(2) 土地利用变化动态度(K)是定量描述区域一定时间范围内某种土地利用类型面积的变化速率,在一定程度上可以反映某种土地资源扩张或萎缩程度^[21]。其计算公式为:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \tag{5}$$

式中: K 为研究时段内某土地利用类型的变化动态度; U_a 和 U_b 为研究初期和末期的某土地利用类型面积(km^2); T 为研究时段。

表 1 胁迫因子的最大影响距离及其权重

胁迫因子	最大影响 距离/km	权重	衰减性
国道省道	2.5	0.6	1
县乡道路	0.5	0.5	1
居民点	2.5	0.4	0
城镇(人口大于 5000)	6.0	0.8	0
耕地	1.5	0.6	0
人口密度	3.5	0.3	0
综合生态风险源	3.0	1	0

3 结果与分析

3.1 土地利用变化

林地和草地一直是甘肃白龙江流域的主要覆被类型(图 2A),占流域总面积的 80%以上。1977—1990 年,耕地和建设用地面积的增幅为 39.8%和 10.68%,其他覆被类型面积减小;1990—2002 年,建设用地和耕地呈现增长态势,年均增长率分别为 2.69%和 2.28%,林地面积减少量为 563.07 km^2 ,草地为 171.48 km^2 ;2002—2014 年,建设用地和林地面积的增幅为 61.81%和 30.55%,耕地的减幅为 35.59%。耕地在 1977—2002 年动态度为正值,2002—2014 年为负值,其面积的减少速率相当于 1977—1990 年的增长速率,林地则正好表现出与耕地相反的变化特征(图 2B),这是因为 1999 年退耕还林还草政策实施以来,陡坡耕地逐渐退耕导致林草地的增加造成。总体上,1977—2014 年草地、未利用地和水域 3 种覆被类型面积减少率约为 0.5%,林地和耕地的增率为 0.4%

和 0.36%，而建设用地的增率为 3.7%，说明随着当地人口增加及经济发展，居民工矿用地、交通用地等建设用地快速扩张，水域面积则因人为填埋及等影响而有所减少。

表 2 生境适宜度及其对不同胁迫因子的敏感度

土地覆被类型	生境适宜度	国道省道	县乡道路	居民点	城镇	耕地	人口密度	综合生态风险源
林地	0.9	0.9	0.7	0.5	0.6	0.3	0.7	0.25
灌木丛	0.8	0.8	0.6	0.4	0.5	0.4	0.6	0.36
草地	0.6	0.7	0.5	0.2	0.3	0.5	0.5	0.44
耕地	0.3	0.5	0.6	0.4	0.5	0	0.8	0.57
河流湖泊	0.9	0.75	0.65	0.7	0.8	0.1	0.5	0.15
城镇	0	0	0	0	0	0	0.95	0.6
居民点	0	0	0	0	0	0	0.85	0.6
交通用地	0	0	0	1	1	0	0.4	0.6
未利用地	0.01	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.3	0.4

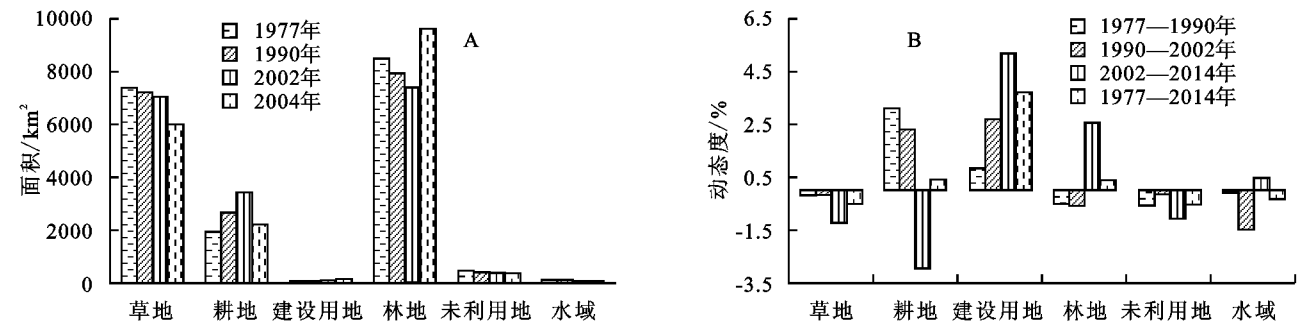


图 2 甘肃白龙江流域土地利用类型面积变化及其动态度

3.2 生境质量变化

甘肃白龙江流域生境质量时间变化见表 3,1977 年流域整体生境质量较高,高值区(5~7)面积比重较大;1990 年以来生境质量整体较 1977 年有所降低,低值区(1~3)面积比重增加,高值区(5~7)面积比重减少;2014 年流域生境质量相对 2002 年有所改善,在流域西北部及东南部有一定变化(图 3C 与图 3D),相应地高值区(5~7)面积比重有所增加。1977—2014 年期间,生境

质量呈现出先降低后缓慢增加的趋势,减幅和增幅为 17%和 25%,这是因为 1977—2002 年人们大面积的毁林开荒,使得林草地锐减,自然生态系统长时间的受压导致景观破碎化,生境质量下降;随着甘肃省于 1998 年启动实施的天然林资源保护工程以及 1999 年启动的退耕还林工程等生态建设政策的实施,加上流域内环境保护与管理程度的不断加强,到 2014 年流域生态环境得到一定改善,生境质量相应提高。

表 3 甘肃白龙江流域生境质量统计(1977—2014 年)

时期	属性	低值区(1~3)			中值区(4)	高值区(5~7)		
		1	2	3	4	5	6	7
1977 年	值域	0~0.035	0.035~0.090	0.090~0.160	0.160~0.438	0.438~0.567	0.567~0.728	0.728~0.998
	面积比重/%	13.95	7.87	11.47	35.59	10.84	10.16	10.12
1990 年	值域	0~0.035	0.035~0.090	0.090~0.156	0.156~0.428	0.428~0.557	0.557~0.721	0.721~0.994
	面积比重/%	45.52	21.93	15.18	14.65	1.38	0.82	0.52
2002 年	值域	0~0.035	0.035~0.089	0.089~0.159	0.159~0.420	0.420~0.549	0.549~0.712	0.712~0.992
	面积比重/%	46.62	20.73	15.73	14.06	1.56	0.81	0.49
2014 年	值域	0~0.035	0.035~0.090	0.090~0.160	0.160~0.438	0.438~0.567	0.567~0.728	0.728~0.998
	面积比重/%	38.28	23.58	17.88	17.29	1.54	0.88	0.55

甘肃白龙江流域生境质量空间分布见图 3,其空间格局变化具有一定的规律性,生境质量较高区域(数值大于 0.42)面积所占比重较小,主要分布在流域西北部、文县东南部及舟曲南部,集聚于白水江国

家级自然保护区、迭部境内的阿夏和多尔大熊猫自然保护区、达拉沟流域及林业发展区;生境质量较低区域(数值小于 0.16)面积所占比重较大,主要分布在人类活动相对频繁的河谷地带、城乡聚落区、耕作区、

裸地和低覆盖草地等区域,集聚于舟曲—武都段白龙江近岸区及文县和武都交界带,宕昌西北部等。在县

域尺度上,迭部县生境质量最好,其次是文县,武都区生境质量较差。

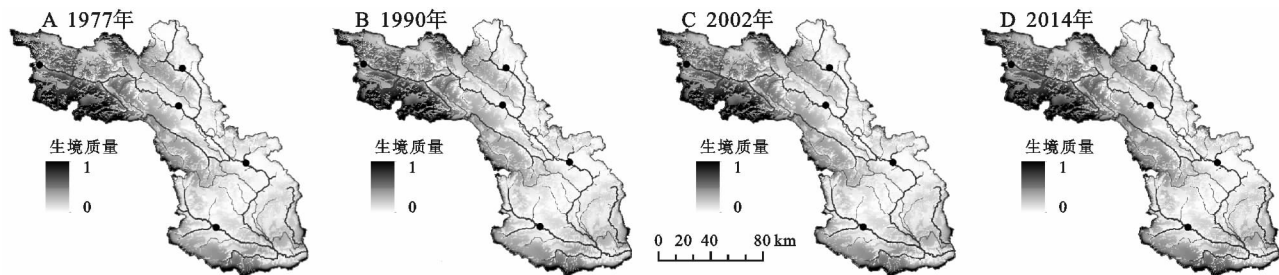


图3 甘肃白龙江流域 1977—2014 年生境质量空间变化

4 结论与讨论

(1) 综合分析 1977—2014 年甘肃白龙江流域不同土地覆被类型变化发现,林地和草地是该流域的主要土地覆被类型,占流域总面积的 80% 以上;而土地覆被类型的改变能够影响生境斑块之间的能量流和物质流过程,继而影响区域的生境分布格局和功能^[22],说明林草地的增加对流域生境质量的改善和维持具有很重要的作用。

(2) 总体来看,甘肃白龙江流域生境质量在研究期内呈现出先降低后缓慢增加的趋势。甘肃省人民政府 2013 年末发布的《陇南实施退耕还林工程纪实》中指出,二十世纪六七十年代的开荒运动使陇南生态“满目疮痍”;1999 年启动实施退耕还林工程后,林地面积累计新增 2 166.67 km² 及森林覆盖率提高 1.5 个百分点的客观事实间接相符合,与本研究结果相近。甘肃白龙江流域生境质量的空间异质性的呈现出一一定的规律性,生境质量较低的区域主要分布在人类活动强度高、自然灾害风险较高的白龙江两岸和宕昌西北部,以城乡聚落区、耕作区、坡耕地和低覆盖草地等最为突出。区域景观格局的高度破碎化,会使生境退化程度加剧,景观结构稳定性趋于降低,导致生境质量下降;生境质量较高的区域主要分布在流域西北部、文县东南部及舟曲南部,集聚于自然保护区和林业管护区,如白水江国家自然保护区、阿夏及多尔自然保护区及宕昌县官鹅沟风景区等,这些区域受人类活动干扰相对较弱,这与其他学者^[4,12,23] 研究结果相似。

(3) 本文运用 InVEST 模型时,进行了模型参数本地化处理(包括对模型脚本修改和参数校验),并基于 RS/GIS 开展了流域生境质量评价及其时空演变特征分析,研究结果说明该模型可在山区流域,特别是像甘肃白龙江流域这样缺乏大量实测数据的易灾型流域,能够替代其他复杂方法,对生境质量变化做出快速而准确的评价。因甘肃白龙江流域面积较大

且地势起伏剧烈,地貌复杂多变,缺乏大型野外观测台站,这在一定程度上制约着模型结果的精确验证。本研究部分参数数据(如不同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,而生境质量机理相对复杂,加上指标选取的不全面性和模型结构的不确定性,分析结果有一定的误差,但不会影响流域生境质量的整体变化趋势。建议后期进一步优化研究方案,理清生境质量的机理,强化评估模型及其参数的适宜性,加强野外实测数据,进行相关参数本地化处理结果的准确验证,结合宏观尺度的遥感观测,更好地补充生境质量在时间和空间尺度上的研究不足^[24]。

(4) 综合考虑流域生境高度脆弱和自然灾害频发的现状,为进一步保育流域生境,开展生态建设和灾害风险防范,实现流域可持续发展,一些对策和建议如下:① 白水江自然保护区南部、武都东南部、拱坝河中上游及博峪河上游区域、宕昌县南部迭山林区、迭部县大部分区域主要是流域生境质量优良区域,土地覆被类型以森林为主,加上人类活动强度较弱,自然植被覆盖良好,对于这些区域应该继续加强自然保护区的管理和维护,禁止乱砍乱伐,减少或者禁止人类活动对物种生存环境的干扰,积极实施生态工程,恢复自然植被,降低人类活动的扰动,保障流域生态安全。② 甘肃白龙江流域是甘肃省唯一具有河谷亚热带气候及丰富生物资源的森林景观区,水土流失严重,山洪、崩塌、滑坡、泥石流等自然灾害频发,造成强烈侵蚀及堆积物常常堵塞河流和道路,加上多数村庄都建在泥石流堆积扇上,严重威胁着居民生命和财产安全。因此,在做好山区灾害宣传教育的同时,应加大灾害监测、防治与预警研究,同时实施移民搬迁和环境整治,开展滑坡泥石流等自然灾害综合治理和环境修复^[25],优化人类活动,提升流域生态安全水平和人地和谐关系。

参考文献:

- [1] Hall L S, Krausman P R, Morrison M L. The habitat concept and a plea for standard terminology [J]. *Wildlife Society Bulletin*, 1997, 25(1): 173-182.
- [2] Sharp R, Tallis H T, Ricketts T, et al. InVEST version user's guide [R]. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, 2016.
- [3] 肖明. GIS 在流域生态环境质量评价中的应用: 以昌化江下游为例[D]. 海口: 海南大学, 2011.
- [4] 刘志伟. 基于 InVEST 的湿地景观格局变化生态响应分析: 以杭州湾南岸地区为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [5] 吴健生, 曹祺文, 石淑芹, 等. 基于土地利用变化的京津冀生境质量时空演变[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(11): 3457-3466.
- [6] Valero E, Álvarez X, Picos J. An assessment of river habitat quality as an indicator of conservation status. A case study in the Northwest of Spain [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 57(S): 131-138.
- [7] 杨建强, 朱永贵, 宋文鹏, 等. 基于生境质量和生态响应的莱州湾生态环境质量评价[J]. *生态学报*, 2014, 34(1): 105-114.
- [8] 王琼, 范志平, 李法云, 等. 蒲河流域河流生境质量综合评价及其与水质响应关系[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(2): 516-523.
- [9] 王玉, 傅碧天, 吕永鹏, 等. 基于 SolVES 模型的生态系统服务社会价值评估: 以吴淞炮台湾湿地森林公园为例[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(6): 1767-1774.
- [10] 王志强, 陈志超, 郝成元. 基于 HSI 模型的扎龙国家级自然保护区丹顶鹤繁殖生境适宜性评价[J]. *湿地科学*, 2009, 7(3): 197-201.
- [11] Goldstein J H, Caldarone G, Duarte T K, et al. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions [J]. *Proceedings of The National Academy of Science of The United States of America*, 2012, 109(19): 7565-7570.
- [12] 包玉斌, 刘康, 李婷, 等. 基于 InVEST 模型的土地利用变化对生境的影响: 以陕西省黄河湿地自然保护区为例[J]. *干旱区研究*, 2015, 32(3): 622-629.
- [13] 荣月静, 张慧, 王岩松. 基于 Logistic-CA-Markov 与 InVEST 模型对南京市土地利用与生物多样性功能模拟评价[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 82-89.
- [14] Wong C P, Jiang B, Kinzig A P, et al. Linking ecosystem characteristics to final ecosystem services for public policy [J]. *Ecology Letters*, 2015, 18(1): 108-118.
- [15] 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(1): 63-70.
- [16] Redhead J W, Stratford C, Sharps K, et al. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569: 1418-1426.
- [17] Meng X, Chen G, Guo P, et al. Research of landslides and debris flows in Bailong River Basin: progress and prospect [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2013, 33(4): 1-15.
- [18] 高彦净. 基于 CASA 模型的植被 NPP 时空动态研究: 以甘肃白龙江流域为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [19] 汤萃文, 孙学刚, 肖笃宁. 甘肃省中国种子植物特有属物种多样性保护优先地区分析[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(10): 1127-1133.
- [20] 宁娜, 马金珠, 张鹏, 等. 基于 GIS 和信息量法的甘肃南部白龙江流域泥石流灾害危险性评价[J]. *资源科学*, 2013, 35(4): 892-899.
- [21] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. *地理科学进展*, 1999, 18(1): 81-87.
- [22] 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展[J]. *生态学报*, 2009, 29(11): 6183-6188.
- [23] 齐姗姗, 巩杰, 钱彩云, 等. 基于 SRP 模型的甘肃省白龙江流域生态环境脆弱性评价[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(1): 224-228.
- [24] Lausch A, Bannehr L, Beckmann M, et al. Linking earth observation and taxonomic, structural and functional biodiversity: from local to ecosystem perspectives [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 70: 317-339.
- [25] 巩杰, 赵彩霞, 王合领, 等. 基于地质灾害的陇南山区生态风险评价: 以陇南市武都区为例[J]. *山地学报*, 2012, 30(5): 570-577.