

# 基于PSR模型的白龙江流域景观生态安全时空变化

谢余初, 巩 杰, 张玲玲

(兰州大学西部环境教育部重点实验室 西部环境与气候变化研究院, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**以地貌灾害频发的甘肃白龙江流域为研究区,基于“压力-状态-响应”框架模型构建流域景观生态安全评价指标体系,探讨其时空变化过程及其特征。结果表明:1990~2010年间白龙江流域景观生态安全综合指数逐渐上升,中高安全等级以上的面积约占研究区总面积的52%。流域内低生态安全区域主要集中在舟曲-武都段白龙江两岸区域、宕昌县西北区域和迭部县北部山区,高安全区域主要集中在自然保护区、林业发展区等植被覆盖较好的区域,其分布格局与滑坡、泥石流和水土流失等地貌灾害的风险分布格局相反。

**关 键 词:**景观生态安全;PSR模型;地貌灾害;白龙江流域

**中图分类号:**F171.4/X826 43

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0690(2015)06-0790-08

地貌灾害是指自然营力或人类活动引起的破坏地貌稳定性给人类生命财产和生态环境带来灾难性影响和损失的地貌过程和现象,其种类包括崩塌、滑坡、泥石流和水土流失等<sup>[1,2]</sup>。中国是世界上受自然灾害影响最严重的国家之一,据统计<sup>[3,4]</sup>每年约有 $7.4 \times 10^7$ 人次不同程度地受山洪、滑坡和泥石流等地貌灾害的影响,直接经济损失达数十亿元。同时,地貌灾害也深刻地影响着森林植被退化、土地荒漠化及生物多样性减少等全球性和区域性的生态安全问题<sup>[4,5]</sup>。生态安全是生态系统健康和完整状况的表征<sup>[5-7]</sup>。随着生态环境与社会发展的相互关系越来越复杂,生态安全已被各国政府提高到国家战略高度,以保持区域生态可持续发展<sup>[7,8]</sup>。景观生态学原理与方法能发挥景观结构组分特征易于保存信息的优势,且景观格局及变化能直接反映生态系统的结构和功能的变化,是多种生态过程作用的积累结果,因此越来越多的学者从景观尺度上探讨和研究区域生态安全<sup>[9-12]</sup>。这些研究为景观尺度上的生态安全提供了基本思路和示例,也注意到人类活动对生态安全的重要影响,然而其评价指标多是在行政区划尺度上进行

数据插值获取,插值结果的精度深受插值方法、样点选取及样本量的影响<sup>[11]</sup>。同时,由山区地貌灾害因素(如滑坡、泥石流和水土流失)导致的潜在景观生态安全时空动态研究明显不足。因此,在景观尺度上,如何以流域为单元利用格网GIS技术将生态安全评价诸多指标空间化投影到评价单元上,以及地貌灾害胁迫下景观生态安全时空变化特征等亟需深入研究。

甘肃白龙江流域地处甘肃东南部,是中国滑坡和泥石流灾害四大高发区之一。2010年8月7日流域内舟曲县发生特大泥石流灾害,造成1765人死亡和失踪,严重威胁着区域的可持续发展。本文拟在遥感与GIS平台下,基于“压力-状态-响应”(Pressure-State-Response, PSR)框架模型,构建流域景观生态安全评价指标体系,定量分析和评价地貌灾害胁迫下白龙江流域景观生态安全时空分异特征,旨在为流域环境管理与生态恢复提供参考依据。

## 1 研究区概况

甘肃段白龙江流域发源于川、甘边境的岷山

收稿日期:2014-08-02;修订日期:2014-10-04

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2014-265, lzujbky-2014-117)、国家自然科学基金项目(41271199)资助。

作者简介:谢余初(1983-),男,广西宾阳人,博士研究生,研究方向为GIS应用、景观生态学与生态评价。E-mail: xieych09@lzu.edu.cn

通讯作者:巩 杰,副教授。E-mail: jgong@lzu.edu.cn

北麓,是长江上游水土保持与水源涵养的重要区域之一,干流长约475 km,流域面积达18 437.7 km<sup>2</sup>。流域内地形复杂,有山地、河谷、黄土等多种地貌景观,高山峻岭与峡谷盆地相间分布、江河纵横,以山大沟深著称。白龙江流域属于暖温带向北亚热带过渡的气候交错区,气候垂直地带分异明显,年平均气温6~14.9℃,年平均降水量400~850 mm,且呈现由东南向西北有递减趋势。行政单元上,甘肃白龙江流域主要包括宕昌县、舟曲县、迭部县、文县和武都区的大部分区域,总人口约130万人<sup>[13,14]</sup>。

## 2 研究方法 with 数据

### 2.1 数据来源与处理

数据来源主要包括Landsat TM/ETM+卫星遥感影像、滑坡点位数据、多年平均气温和降水量、DEM(30 m)、地形图(1:500 000),MODIS NDVI数据(250 m)以及社会经济统计年鉴数据和土地利用总体规划、环境保护规划等相关资料。其中,土地利用信息主要是采用监督分类方法对1990、2002、2010年3期影像数据解译获得,并结合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分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地等6类。同时,利用地形图和Google Earth高分辨率影像(2010年),对土地利用解译结果和植被覆盖情况进行野外选点验证并访谈当地老百姓,经统计各土地利用与覆被的解译精度均在84%以上。

### 2.2 基于PSR模型的指标体系构建

PSR模型是由环境压力、环境状态和社会响应指标组成的框架模型<sup>[15,16]</sup>。环境压力是指描述人类或自然因素直接或者间接给环境带来的负担(压力);环境状态是反映环境质量、自然资源与生态系统的现状,以及资源环境随时间的变化状态;

社会响应描述人类社会对环境变化响应和关注的程度及所采取的相关对策与措施<sup>[9,16,17]</sup>。在景观尺度上,PSR模型综合考虑了风险压力-环境变化-人们(或社会)响应之间的相互作用关系,具有较强的灵活性和实用性<sup>[16]</sup>。根据模型指标体系的系统性、实用性以及数据获取可能性等原则,结合研究区的实际特征,细化白龙江流域景观生态安全评价指标体系并确定各指标的权重(表1),并采用网格进行系统采样。

$$L_{LESi} = (1 - L_{LSPi}) \times \varepsilon_1 + L_{LSSi} \times \varepsilon_2 + L_{LSRi} \times \varepsilon_3 \quad (1)$$

式中, $L_{LESi}$ 是景观生态安全指数, $L_{LSPi}$ 是景观生态压力指数, $L_{LSSi}$ 是景观状态指数, $L_{LSRi}$ 是景观生态安全指数, $\varepsilon$ 为权重。 $i$ 为评价单元(网格)编号。 $L_{LESi}$ 值越大,区域景观生态安全性越高。所有指标采用公式(2)进行归一化处理:

$$X' = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式中, $X'$ 为无量纲化指标, $X$ 为原指标, $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别表示指标最大值和最小值。

1) 景观压力指数。白龙江流域景观生态压力除了人类活动与生产带来的压力外,地貌灾害是影响流域生态安全的最大风险源(压力源),因此,本文着重考虑滑坡、泥石流和水土流失等地貌灾害对景观造成的压力。根据流域内压力源发生的概率和强度,以及前人的研究成果<sup>[13,18-21]</sup>,基于ArcGIS技术平台,获得研究区内滑坡、泥石流灾害和水土流域的风险分布图<sup>[13,18]</sup>。同时,采用层次分析法(AHP)计算各地貌灾害因子的权重,进而构建区域景观生态压力指数。

$$L_{LSPi} = P_{1i} \times \omega_1 + P_{2i} \times \omega_2 + P_{3i} \times \omega_3 \quad (3)$$

式中, $L_{LSPi}$ 表示评价单元*i*景观生态压力指数, $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 分别为滑坡、泥石流和水土流失的危害程度, $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$ 分别为滑坡、泥石流、水土流失危害性的权重。 $L_{LSPi}$ 越大,说明评价单元*i*在景观生态环境

表1 白龙江流域景观生态安全评价指标体系

Table 1 Index system of landscape ecological security assessment in the Bailongjiang watershed

| 目标层      | 准则层      | 权重  | 指标层            | 权重  | 指标特征            |
|----------|----------|-----|----------------|-----|-----------------|
| 景观生态安全指数 | 景观生态压力指数 | 0.3 | 滑坡危险性 $P_1$    | 0.3 | 值越小表示景观生态安全程度越好 |
|          |          |     | 泥石流危险性 $P_2$   | 0.5 | 值越小表示景观生态安全程度越好 |
|          |          |     | 水土流失风险度 $P_3$  | 0.2 | 值越小表示景观生态安全程度越好 |
|          | 景观状态指数   | 0.6 | 景观结构指数 $S_1$   | 0.5 | 值越小表示景观生态安全程度越好 |
|          |          |     | 生态系统服务价值 $S_2$ | 0.5 | 值越大表示景观生态安全程度越好 |
|          | 景观响应指数   | 0.1 | 功能区控制力度 $R_1$  | 1.0 | 值越大表示景观生态安全程度越好 |

压力就越大,区域生态安全越低。

2) 景观状态指数。景观状态指标主要考虑景观生态的结构状况和功能安全性,分别以景观结构损失指数和生态系统服务价值来度量。其中,景观结构损失指数由景观破碎度、景观分离度和景观分维数加权函数式表征<sup>[13,18,21]</sup>;其值越大,说明景观越破碎、结构越不稳定,景观安全性越低。生态系统服务价值则通过Costanza生态系统服务价值模型和谢高地提出的修正方法<sup>[22]</sup>进行计算获得。生态系统服务价值越大,景观功能越安全。

$$L_{LSS} = (1 - S_i) \times \omega_s + E_{ESV} \times \omega_{es} \quad (4)$$

$$S_i = aC_i + bN_i + cF_i \quad (5)$$

$$E_{ESV} = \sum (A_{Ak} \times V_{Vck}) \quad (6)$$

式中, $L_{LSS}$ 为景观状态指数, $S_i$ 为景观结构指数, $E_{ESV}$ 为研究区域生态系统服务价值, $\omega_s$ 、 $\omega_{es}$ 分别为两者的权重; $C_i$ 为景观破碎度指数, $N_i$ 为景观分离度指数, $F_i$ 为景观分维数; $a$ 、 $b$ 和 $c$ 分别为各个景观格局指标的权重( $a+b+c=1$ )。根据相关研究<sup>[13,18,21]</sup>,结合研究区实地特点,对景观破碎度指数、分离度和景观分维数脆弱性权重值分别赋以0.5、0.3和0.2。 $A_{Ak}$ 为研究区土地利用类型的面积( $\text{hm}^2$ ), $V_{Vck}$ 为第 $k$ 类土地利用类型单位面积的生态服务价值 $[\text{元}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 。

3) 景观响应指数。基于前人的研究成果<sup>[9,11]</sup>以及指标空间量化的原则,结合研究区生态功能区划特点<sup>[23]</sup>,以不同时期不同生态功能区的调控力度来反映人们和社会对环境变化的响应程度,其响应程度越大,景观生态安全程度越高。运用德尔菲法,对流域内不同功能区的响应指数赋值如表2。

表2 不同功能区的响应指数

Table 2 Response of human beings to different function districts

| 年份<br>(年) | 林业发<br>展区 | 牧业发<br>展区 | 农耕区 | 自然保<br>护区 | 生态安全<br>控制区 | 水域  |
|-----------|-----------|-----------|-----|-----------|-------------|-----|
| 1990      | 0.8       | 0.6       | 0.8 | 0.5       | 0.4         | 0.2 |
| 2002      | 0.9       | 0.7       | 0.9 | 0.7       | 0.6         | 0.2 |
| 2010      | 1.0       | 0.8       | 0.9 | 0.9       | 0.8         | 0.2 |

### 3 结果与分析

#### 3.1 白龙江流域景观生态压力时空分异

由图1和表3可知,白龙江流域水土流失、滑坡和泥石流的潜在高危险区域分布格局相似,主要集中在舟曲—武都—文县段白龙江两岸及其以北

区域,低危险区则主要分布在白水江南岸区域、拦坝河上中游、迭部县大部分区域、岷江西岸至迭山之间的区域,造就了白龙江流域景观生态压力分布格局呈现沿河谷带状分布,行政上以武都区的生态压力最大。近20 a间灾害发生的频率、强度及其破坏程度呈无规律性,年均经济损失呈增长的趋势,以2010年舟曲特大泥石流造成的损失最大。1990~2002年间,流域内景观生态压力指数表现出轻微的两极化方向发展,过去景观生态压力大的区域其承受的压力不断增大,而自然保护区、水源涵养地等景观生态压力比较小的地区,其景观承受的压力相对较小。2002~2010年间,流域内景观生态压力总体呈现增长的趋势。整个研究期间,流域内景观生态压力最大值增长明显,其增幅达1.72%,表明过去20 a里景观生态压力较大的区域随社会的发展,生态压力越来越大,而景观生态压力相对较小的地区呈现先减小后增大的态势。

#### 3.2 白龙江流域景观状态时空变化

1990~2002年间,白龙江流域景观状态总体变化不大,但最大值和最小值下降趋势明显,分别从0.651和0.413降至0.645和0.398,表明流域内景观结构不稳、破碎化加剧、脆弱性增加、形状不规则,景观生态服务价值功能呈现减少趋势(图2)。2002~2010年间,景观状态指数最小值持续减少,最大值呈增长的趋势,表明景观状态呈现两极分化突出,与景观生态压力刚好相反,即高生态压力区域其景观状态质量较低。在空间分布上,流域景观状态格局变化较小,景观状态较好区域占主导优势,主要集中在森林、草地等景观类型区,尤其是国家森林自然保护区,如甘肃文县尖山大熊猫自然保护区、白水江国家级自然保护区、舟曲县插岗梁自然保护区、迭部县阿夏与多儿大熊猫自然保护区、武都裕河森林自然保护区、迭山林业发展区等。而景观状态质量较低的地区主要分布在武都区的安化镇、马街乡、汉王镇、鱼龙乡、三河镇、熊池乡及两水镇,宕昌县的哈达铺镇至八力乡以及县城至车拉乡等区域。

#### 3.3 白龙江流域景观响应时空变化

近20 a间流域景观响应指数不断增长,由1990年的0.802升至2010年的0.815,其最小值和最大值也略有所增长(表3),表明随着社会的发展,人们越来越重视环境保护,社会响应积极。在空间上,1990~2002年间农业和水土保持生态区、

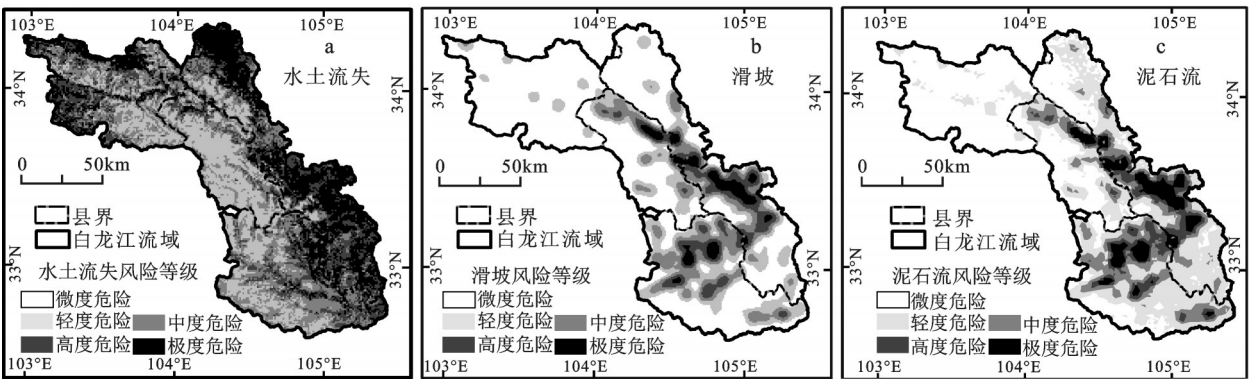


图1 白龙江流域景观生态压力源分布

Fig.1 The spatial distribution of ecological security hazard sources in the Bailongjiang River watershed

表3 白龙江流域景观生态安全等级及其面积

Table 3 Landscape ecological security grades and their cover area in the Bailongjiang River watershed

| 年份<br>(年) | 地质灾害影响        |                | 景观压力指数 |       |       | 景观状态指数 |       |       | 景观响应指数 |       |       | 景观生态安全指数 |       |       |
|-----------|---------------|----------------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|----------|-------|-------|
|           | 平均死亡<br>人数(人) | 平均经济损<br>失(亿元) | 最大值    | 最小值   | 平均值   | 最大值    | 最小值   | 平均值   | 最大值    | 最小值   | 平均值   | 最大值      | 最小值   | 平均值   |
| 1990      | 13            | 0.039          | 0.697  | 0.094 | 0.253 | 0.651  | 0.413 | 0.531 | 0.997  | 0.012 | 0.802 | 0.724    | 0.440 | 0.623 |
| 2002      | 9             | 0.403          | 0.699  | 0.093 | 0.251 | 0.645  | 0.398 | 0.531 | 0.998  | 0.012 | 0.812 | 0.731    | 0.438 | 0.624 |
| 2010      | 58            | 30.25          | 0.709  | 0.094 | 0.252 | 0.672  | 0.388 | 0.550 | 0.998  | 0.013 | 0.815 | 0.751    | 0.426 | 0.636 |

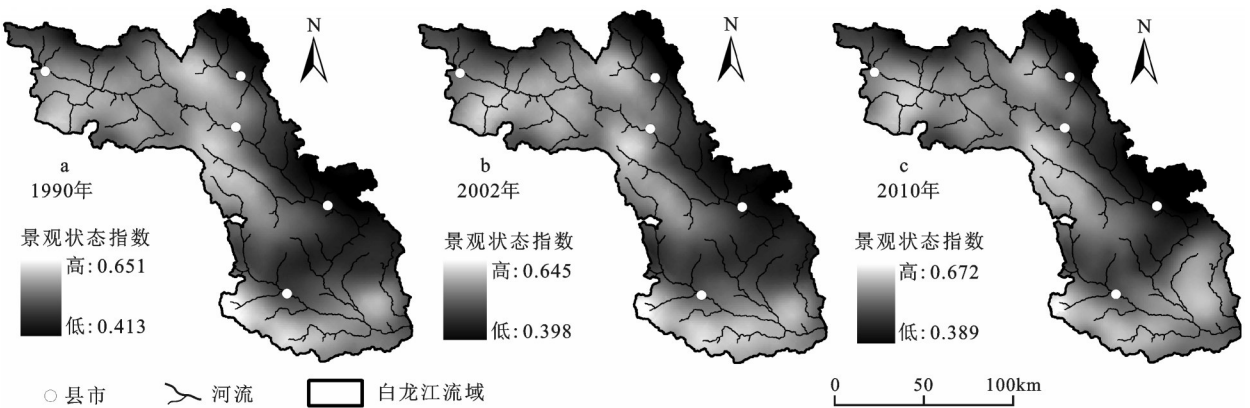


图2 1990~2010年白龙江流域景观状态指数

Fig.2 Landscape security state distribution in the Bailongjiang River watershed from 1990 to 2010

自然保护区景观响应指数相对较高。2002~2010年间,自然保护区和林牧业发展区和滑坡泥石流灾害重点治理区景观响应指数相对较高(图3)。

**3.4 白龙江流域景观生态安全指数时空变化**

由公式(1)计算可获得流域景观生态安全指数,并对其分级以展示流域景观生态安全状态的空间差异性(表4)。1990~2002年间白龙江流域景观生态安全指数略有增长,最大值增长幅度较大,

但最小值趋向减小,表现出中度安全区和中高安全区面积增长迅速,其总增幅达7.97%;低安全区面积轻微增加,高安全区域面积呈下降的态势。2002~2010年间,景观生态安全指数从0.624持续增长至0.636,表明流域景观结构趋向于稳定,景观生态安全处在中高状态。整个研究期间,高安全区面积比例从36.91%增至39.38%,且中度安全区域以上的面积比例在75.7%以上,说明研究区景观

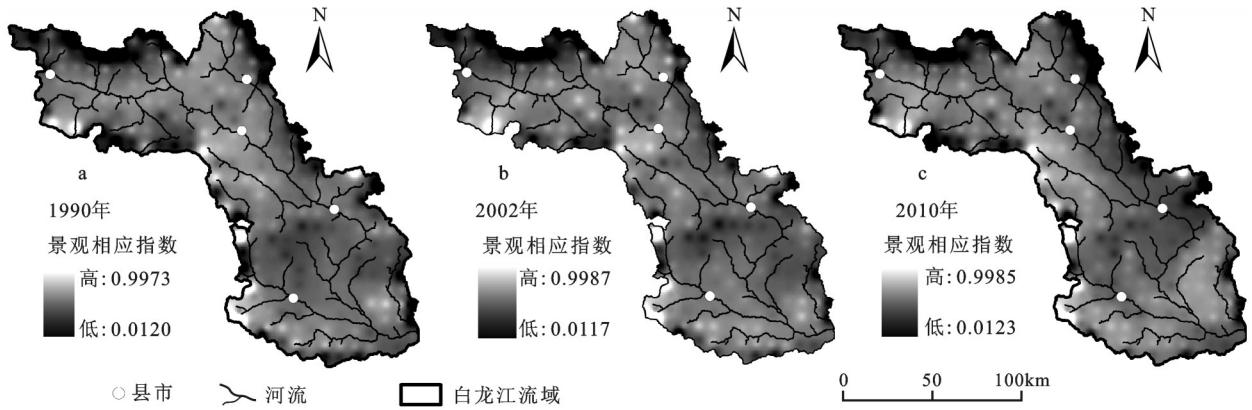


图3 1990~2010年白龙江流域景观生态响应指数

Fig.3 Landscape response distribution in Bailongjiang River watershed from 1990 to 2010

表4 白龙江流域景观生态安全等级及其面积

Table 4 Landscape ecological security grades and their cover area in the Bailongjiang River watershed

| 景观生态安全等级 | 景观生态安全指数                     | 1990年                |       | 2002年                |       | 2010年                |       |
|----------|------------------------------|----------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|-------|
|          |                              | 面积(km <sup>2</sup> ) | 比重(%) | 面积(km <sup>2</sup> ) | 比重(%) | 面积(km <sup>2</sup> ) | 比重(%) |
| 低安全区     | $L_{LES} < 0.532$            | 1227.2               | 6.66  | 1233.1               | 6.69  | 1322.0               | 7.17  |
| 轻安全区     | $0.532 \leq L_{LES} < 0.583$ | 3262.2               | 17.69 | 2957.7               | 16.04 | 2510.6               | 13.62 |
| 中度安全区    | $0.583 \leq L_{LES} < 0.626$ | 4273.1               | 23.18 | 4463.4               | 24.21 | 3105.5               | 16.84 |
| 中高安全区    | $0.626 \leq L_{LES} < 0.668$ | 4713.6               | 25.57 | 5239.1               | 28.42 | 4237.6               | 22.98 |
| 高度安全区    | $0.667 \leq L_{LES} < 0.751$ | 4961.0               | 26.91 | 4543.9               | 24.65 | 7261.4               | 39.38 |

生态安全趋向稳定,风险得到一定的控制,生态环境有所改善。然而,轻安全区域以下的面积仍占20.8%以上,且低安全区面积呈增长的态势,说明近20 a来白龙江流域景观生态安全局部不稳定及恶化。在空间上,景观生态安全分布格局极不平衡,低安全区主要集中在舟曲-武都段白龙江两岸区域、宕昌县西北及岷江东岸、迭部县北部地区(图4)。这与其他学者<sup>[13,14,19,20]</sup>研究的灾害和生态风险的空间分布成果刚好相反,即景观生态低安全区与滑坡、泥石流灾害多发区和水土流失高风险区相对应,间接表明了研究区内景观生态安全深受地貌灾害的影响。

以1990和2010年的流域景观生态安全等级分布图为例,分析不同生态安全等级之间面积动态转化情况。由图5a可知,中高安全区和中度安全区分别向高安全区和中高安全区转化的面积最大,高达2 089.95 km<sup>2</sup>和1 255.24 km<sup>2</sup>,其次是轻安全区向中度安全区转化644.48 km<sup>2</sup>。这种大面积由低生态安全区向高生态安全区转移的现象,说明研究区生态安全呈现良好的发展趋势,生态环

境有所改善。在空间上,高生态安全区主要分布在迭部-舟曲憨班乡段白龙江流域、文县白水江流域及武都东南部山区;而低生态安全区主要分布宕昌县岷江流域及舟曲-武都段河谷地带(图5b)。对应土地利用变化分析可以发现,高生态安全区和中高安全区主要分布在林地,其面积比重从1990年32.75%增长至2010年的40.64%。低和轻安全区主要发生在耕地和草地,两者总面积约占20.12%以上,且在中低山地区域以坡耕地和低覆盖度草地尤为突出;在高海拔山区则以高寒荒漠草地和裸岩占主导地位,这与地貌灾害发生所在的景观类型相一致<sup>[13,14]</sup>。

4 讨 论

白龙江流域景观生态安全的时空分布呈现出一定的规律性,景观生态低安全区域多集中在人类活动相对频繁,且黄土地貌向石山区过渡的交错带上,以舟曲-武都段白龙江流域最为突出。同时,景观生态安全不断减小区域(低安全区)与地貌灾害高风险区域分布相一致。景观生态高安全

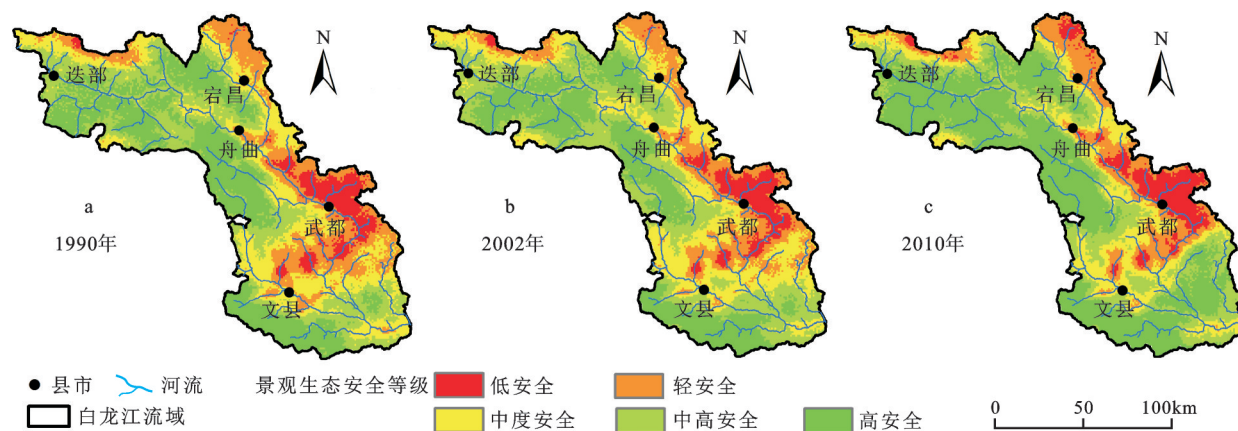


图4 1990~2010年白龙江流域景观生态安全指数

Fig.4 Landscape ecological security dynamics in Bailongjiang River watershed from 1990 to 2010

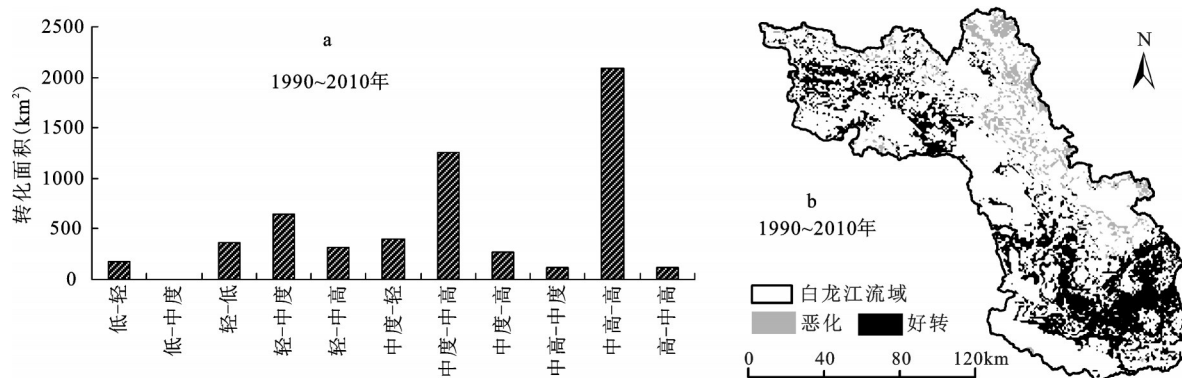


图5 1990~2010年白龙江流域景观生态安全面积转换及空间分布

Fig.5 Conversion and spatial distribution of different landscape ecological security grades from 1990 to 2010

区则主要分布在地表扰动较少的石质性山区,尤其体现在一些自然保护区和林业发展区<sup>[13,21]</sup>。2000年以来,“退耕还林还草工程”、“长江中上游防护林体系建设工程”、“天然林保护工程”等生态工程相继实施后,研究区林业经营模式也由以经济效益为核心转变为以保护区域生态环境为主的经营制度,坡耕地面积也逐渐减少,流域内生态安全得到了一定的提高。

景观生态安全变化在土地利用类型变化上表现为:景观结构和生态服务功能相对稳定的生态高安全区域主要是自然保护区和林业发展区;低生态安全区域主要是耕地和中低山区低覆盖度草地;轻和中度生态安全区域主要是草地、耕地和林地。由于流域内耕地和草地往往首先被交通、居民及工矿等建设用地侵占,致使景观生态安全变化过程中是轻和中度安全区域的面积大量减少。景观生态安全的空间分布格局及其在不同土地利

用类型上的变化时空格局总体上与滑坡、泥石流和水土流失等地貌灾害的空间分布及其在不同景观类型上的分布格局相反,间接表明流域生态安全受地貌灾害的影响较大。因此,建议研究区在结合自身实际情况,坚持生态优先,在保护“源景观”(自然保护区、林业发展区)的同时,优先发展多年生的经济林果产业,如核桃、花椒、橄榄等,而对地表扰动较大的农作物(如糜子、玉米、谷物等粮食作物及蔬菜瓜果种植等)则不适宜大规模发展<sup>[14,21]</sup>。

PSR框架模型是目前评估区域生态安全变化最为广泛的方法之一<sup>[24]</sup>,然而其在评估自然灾害因素影响下区域生态安全研究中相对较少。本文尝试在不考虑人类活动影响下,仅从滑坡、泥石流和水土流失等山区地貌灾害压力胁迫视角出发,其研究结果仍较客观地反映了白龙江流域景观生态安全变化的特征,间接表明PSR模型在单独评估

自然灾害影响下的区域生态安全的可行性。

## 5 结 论

1990~2010年期间甘肃白龙江流域景观生态安全总体呈现增长的趋势,其空间分布格局变化不大,但呈一定的规律性,即景观生态安全的空间分布与滑坡、泥石流和水土流失等地貌灾害发生的空间格局相反,但在土地利用类型上的分布格局相似。具体而言,其生态低安全区(灾害高风险区)以舟曲-武都段白龙江两岸及其以北区域最为严重,生态高安全区(灾害低风险区)则主要分布在自然保护区和林业发展区。

2000年后,流域景观生态安全指数在林地类型上提高明显,这与研究区积极实施“长防林”、“天保林”和“退耕还林”等生态工程相关,因此未来在维持现有自然保护区基础上,对地貌灾害常发生的坡耕地实施退耕还林还草政策,在宜林荒山荒地中进行植树造林,同时,加大水土保持生态建设重要性的宣传力度及山区灾害宣传教育,增强人们的忧患意识,促进区域可持续发展。

## 参考文献:

- [1] Chorley R J, Schumm S A, Sugden D E. *Geomorphology* [M]. London: Methuen & Co. Ltd, 1984: 574-589.
- [2] 刘希林, 莫多闻. 地貌灾害预测预报的基本问题——以泥石流预测预报为例[J]. 山地学报, 2001, 19(2): 150~156.
- [3] 崔 鹏. 中国山地灾害研究进展与未来应关注的科学问题[J]. 地理科学进展, 2014, 33(2): 145~152.
- [4] 周寅康, 金晓斌, 王 千, 等. 基于GIS的关中地区农业生产自然灾害风险综合评价研究[J]. 地理科学, 2012, 23(1): 1465~1472.
- [5] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容[J]. 应用生态学报, 2002, 13(3): 354~358.
- [6] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 等. 区域生态安全格局: 概念与理论基础[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 761~768.
- [7] 陈 星, 周成虎. 生态安全: 国内外研究综述[J]. 地理科学进展, 2005, 24(6): 8~20.
- [8] Soffer A. Environmental quality and national security[J]. *Water Science and Technology*, 2000, 42(1-2): 361-366.
- [9] Li Y F, Sun X, Zhu X D, et al. An early warning method of landscape ecological security in rapid urbanizing coastal areas and its application in Xiamen, China[J]. *Ecological Modelling*, 2010, 221(19): 2251-2260.
- [10] 吕建树, 吴泉源, 张祖陆, 等. 基于RS和GIS的济宁市土地利用变化及生态安全研究[J]. 地理科学, 2012, 32(8): 928-935.
- [11] 杨青生, 乔纪纲, 艾 彬. 快速城市化地区景观生态安全时空演化过程分析——以东莞市为例[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1230~1239.
- [12] 王 耕, 王嘉丽, 龚丽妍, 等. 基于GIS-Markov区域生态安全时空演变研究——以大连市甘井子区为例[J]. 地理科学, 2013, 33(8): 957~964.
- [13] 赵彩霞. 甘肃白龙江流域生态风险评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
- [14] 谢余初, 巩 杰, 赵彩霞. 甘肃白龙江流域水土流失的景观生态风险评价[J]. 生态学杂志, 2014, 33(3): 702~708.
- [15] 彭 建, 吴健生, 潘雅婧, 等. 基于PSR模型的区域生态持续性评价概念框架[J]. 地理科学进展, 2012, 31(7): 933~940.
- [16] Whitall D, Bricker S, Ferreira J, et al. Assessment of eutrophication in estuaries: Pressure-State-Response and nitrogen source apportionment[J]. *Environ Manage*, 2007, 40(4): 678-690.
- [17] Wolfslehner B, Vacik H. Evaluating sustainable forest management strategies with the analytic network process in a pressure-state-response framework[J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, 88(1): 1-10.
- [18] 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.
- [19] 邢 钊. 基于信息熵与AHP模型的白龙江流域泥石流危险性评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [20] 周 伟. 基于Logistic回归和SINMAP模型的白龙江流域滑坡危险性评价研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [21] 巩 杰, 谢余初, 赵彩霞, 等. 甘肃白龙江流域景观生态风险评价及其时空分异[J]. 中国环境科学, 2014, 34(8): 2153~2160.
- [22] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189~196.
- [23] 刘英英, 石培基, 刘春雨, 等. 基于GIS陇南市生态功能区划及环境友好型土地利用模式[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(1): 39~43.
- [24] 左 伟, 王 桥, 王文杰, 等. 区域生态安全综合评价模型分析[J]. 地理科学, 2005, 25(2): 209~214.

## Dynamics of Landscape Ecological Security Based on PSR Model in the Bailongjiang River Watershed

XIE Yu-chu, GONG Jie, ZHANG Ling-ling

(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), Research School of  
Arid Environment and Climate Change, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** Bailongjiang River watershed (BRW), a typical geomorphic area with frequent-hazards, located in the transitional ecotone among the Loess Plateau, Qinba Mountains and Tibet Plateau, was chosen as the study area to analyze the landscape ecological security (LES). Based on the Pressure-State-Response (PSR) conceptual framework and platforms of GIS and RS technology, an evaluation system for landscape ecological security was suggested with three dimensions (Pressure, State and Response) from 1990 to 2010. The three components, namely each of the three dimensions and two factors specific to the particular dimension, were determined separately from each other, and then integrated into a single rating. The factors were also divided into two types, depending on their impact on the ecological security: positive (+) or negative (-). Here the pressure index, which reflected the pressure that geomorphic hazard exerted on the environment, consists of landslides, debris flows, soil and water erosion. The landscape state index, which was related to the quality of the environment, was composed of landscape vulnerability index and ecological service value. The response index, which was described as reaction of human beings to landscape dynamics, was defined as adjusted intensity of natural reserve districts, water area, forest, grazing district and crop lands. And then, the landscape ecological security was classified into 5 levels: low, slight, medium, medium-high and high. In the same time, the evaluation units were Landsat TM pixels and the fundamental data set was obtained by classifying raw TM data in this study; and the factors used in PSR model were obtained by using different data from meteorological station, soil surveys and maps, digitized topographic maps, NDVI, DEM and Landsat TM images. The results showed that: the maximum value of landscape pressure index was 0.697, 0.699, and 0.709 in 1990, 2002 and 2010 respectively, although the average value change was not obvious, which means the landscape pressure increased locally. The values of landscape state index and response index increased from 0.531 and 0.802 in 1990 to 0.550 and 0.815 in 2010, respectively, suggesting that landscape security became more secure. After then, landscape ecological security, which was the weighted sum of the pressure index, the landscape security state index and the response index, increased from 0.623 in 1990 to 0.636 in 2010. In the meantime, the change of LES pattern was small and trended to be better, and the cover area of medium to medium-high grades increased (2 089.95 km<sup>2</sup>) during the whole period of 1990-2010; especially after 2002, the proportion of above high ecological security levels was up to 52%, showing that the performing of ecological engineering (such as Grain for Green, Construction of Shelter Forest System in the Upper- Middle Changjiang River.) were very effective. As to the spatial distribution pattern, the districts with low ecological security mostly located along the Bailongjiang River and its tributaries, northwestern part of Tanchang County and northern mountains of Diebu County, while the high ecological security happened as nature reserve and forest district. And then, the distribution pattern of LES was opposite to that of landscape ecological risk on the landslides, debris flows, soil and water erosion. This research showed that the PSR model based on gridding GIS was a useful way for the quantitative evaluating and mapping LES under natural hazard stress and can be used in other similar regions.

**Key words:** landscape ecological security; pressure-state-response; geomorphic hazard; Bailongjiang River watershed