

谢余初, 巩杰, 张素欣, 等. 基于遥感和 InVEST 模型的白龙江流域景观生物多样性时空格局研究[J]. 地理科学, 2018, 38(6): 979-986. [Xie Yuchu, Gong Jie, Zhang Suxin et al. Spatiotemporal Change of Landscape Biodiversity Based on InVEST Model and Remote Sensing Technology in the Bailong River Watershed. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(6): 979-986.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.06.018

# 基于遥感和 InVEST 模型的白龙江流域 景观生物多样性时空格局研究

谢余初<sup>1,2,3</sup>, 巩杰<sup>2</sup>, 张素欣<sup>1</sup>, 马学成<sup>2</sup>, 胡宝清<sup>1</sup>

(1. 广西师范学院北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 广西 南宁 530001; 2. 兰州大学资源环境学院/西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院亚热带农业生态研究所 亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南 长沙 410125)

**摘要:**以甘肃白龙江流域为例, 结合遥感、GIS 技术和 InVEST 模型, 从景观地理学角度选取区域生境质量、植物净初级生产力和景观状态指数为评价指标, 构建区域景观尺度上生物多样性空间格局综合评估方法, 并在栅格像元尺度上开展白龙江流域景观生物多样性时空变化特征分析。结果表明: 白龙江流域景观生物多样性空间格局差异显著, 其生物多样性高值区主要集中在自然保护区和林业管护区, 低值区主要分布在舟曲-武都-文县的白龙江两岸及其以北区域、宕昌县岷江沿岸、高寒稀疏植被区和高山积雪-裸岩区。1990-2010 年, 流域景观生物多样性较为丰富, 整体呈现不断增长的趋势, 个别局部区域减弱, 其增长区主要体现在生态工程实施区和林业管护区, 减少区多分布在人类活动频繁的城乡农耕区和灾害多发区。

**关键词:** 生物多样性; 生境质量; InVEST 模型; 白龙江流域

**中图分类号:** X826; Q16      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0690(2018)06-0979-08

随着全球环境变化、外来物种入侵以及人类活动干扰, 全球生物多样性丧失问题正日趋严重<sup>[1-3]</sup>。《全球生物多样性展望(2011~2020)》报告指出, 全球 15 000 多个物种正在消失, 且生物多样性丧失的趋势仍没有得到有效遏制<sup>[3,4]</sup>。因此, 开展不同尺度生物多样性的监测、评价、保护、规划、管理和政策制定已迫在眉睫。在大中区域尺度上, 景观生物多样性及其时空格局研究是当前生物多样性保护和研究的核心内容之一<sup>[5]</sup>, 也是生物多样性保护优先区和生态补偿区识别、界定和规划的前提基础。然而, 传统生物多样性保护与研究工作主要是基于样方或样地水平的地面实地调查、重点关注物种、群落等水平的生物多样性变化, 而在大中尺度景观水平上开展生物多样性空间尺度和时间尺度的研究相对较少<sup>[6,7]</sup>。近

年来, 随着遥感、GIS 和卫星追踪等对地观测技术及相关生态模型发展较快, 量化、可视化和精细化地分析和评估大中尺度生物多样性空间尺度和时间尺度的变化成为可能<sup>[8,9]</sup>, 尤其是在缺乏全面的生物多样性实地监测数据的大尺度区域内, 利用遥感、GIS 技术和生态模型开展景观水平上生物多样性综合评价, 是反映区域各种潜在威胁源影响及生物多样性时空格局分异的重要手段, 也是当前生物多样性综合监测与评价研究的重要内容之一<sup>[10-12]</sup>。为此, 国内外学者展开过许多案例研究, 如在莱茵河下游洪泛平原<sup>[13]</sup>、芬兰南部<sup>[14]</sup>、美国明尼苏达州<sup>[15]</sup>以及中国的鄱阳湖湿地<sup>[16]</sup>和汶川地震灾区<sup>[17]</sup>等区域均先后结合地面人工观测与遥感(或卫星追踪)等技术开展生物多样性状况与空间分布研究。由此可见, 利用遥感、

**收稿日期:** 2017-07-11; **修订日期:** 2017-09-01

**基金项目:** 广西自然科学基金(2016GXNSFBA380047)、国家自然科学基金(41761039, 41771196)、广西师范学院博士科研启动经费项目(0819-2016L12)资助。[Foundation: Natural Science Foundation of Guangxi (2016GXNSFBA380047), National Natural Science Foundation of China (41761039, 41771196), Scientific Research Fund for Young Doctor in Guangxi Teachers Education University(0819-2016L12).]

**作者简介:** 谢余初(1983-), 男, 广西南宁人, 讲师, 博士, 主要从事区域景观生态学和 GIS 应用研究。E-mail: xieych09@lzu.edu.cn

**通讯作者:** 巩杰, 副教授。E-mail: jgong@lzu.edu.cn

GIS技术和生态模型空间量化生物多样性及其分布格局是可行的。

甘肃白龙江流域地处陇南山区和生态过渡带,是长江上游生物多样性及珍稀动植物大熊猫(*Ailuropoda melanoleuca*)、珙桐(*Davidia involucrata*)、银杉(*Cathaya argyrophylla*)等保护区的重要组成部分,也是中国滑坡和泥石流灾害四大高发区之一<sup>[18]</sup>。随着社会经济发展,受工农业生产、矿山开采、森林砍伐、铁路建设、城镇化以及滑坡、泥石流等自然灾害扰动的影响(如2010年流域内舟曲特大泥石流灾害),流域景观和土地覆盖已发生巨大的变化,正影响或威胁着生物多样性保护与生态系统服务的可持续性。因此,亟待在栅格单元上量化和可视化评估白龙江流域生物多样性状况,明晰生物多样性的时空格局差异特征,以期为流域生物多样性保护与与规划管理提供定量的、可视化的评估结果和科学依据。

## 1 研究区概况

甘肃白龙江流域(103°00′~105°30′E, 32°36′~34°24′N)地处青藏高原东缘、西秦岭与岷山山脉交汇地带,地形复杂、山峦叠嶂、沟壑纵横,是长江上游重要的水源地和生物多样性保护区。流域气候类型复杂多样,气候垂直地带分异明显,夏季高温多雨,冬季温凉少雨,年均气温6℃~15℃,年降水量400~850 mm。植被覆盖较好,森林广布,流域源头属青藏高原高寒植被区域,中上游以暖温带落叶阔叶林区域为主,下游多为亚热带常绿阔叶林区域<sup>[18]</sup>,有珙桐、水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)、银杉、香果树(*Emmenopterys henryi*)、连香树(*Cercidiphyllum japonicum*)、鹅掌树(*Acer paxii*)、红椿(*Toona ciliata*)、南方红豆杉(*Taxus chinensis*)、水青树(*Tetracentron sinense*)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<sup>[18]</sup>;当归(*Angelica sinensis*)、党参(*Codonopsis pilosula*)、大黄(*Rheum palmatum*)、红芪(*Hedysarum polybotrys*)、柴胡(*Radix bupleuri*)等药用植物近700种;拥有大熊猫、金丝猴(*Rhinopithecus roxellana*)、羚羊(*Antidorcas marsupialis*)、短尾猴(*Macaca arctoides*)、麝(*Moschus moschiferus*)、毛冠鹿(*Elaphodus cephalophus*)、鲵(*Megalobatrachus japonicus daoidianuas*)等20多种保护动物<sup>[19]</sup>。

## 2 研究方法

生境质量是生态系统为个体或种群的生存提供适宜的生产条件的能力,反映着生物栖息地质量状况,是生态系统和景观生物多样性的直接体现。由斯坦福大学、大自然保护协会、世界自然基金会共同研发的InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Service and Tradeoff)模型不仅能定量分析多种生态系统服务功能(如:生境质量、碳储量、产水量和水体净化等),而且能将评估结果以专题地图的形式展现出来<sup>[20]</sup>。其中,InVEST-Habitat Quality(生境质量)模块是通过结合景观类型敏感度和外界威胁强度,分析不同景观格局下的生境对威胁源的响应程度及其分布与退化情况,计算获得生境质量来反映区域生物多样性状况,其生境质量大小将代表区域生物多样性丰富程度<sup>[13,14,20-22]</sup>。即,生境质量高的地区生物多样性水平高,生境质量低和生境范围小的则意味着生物多样性低。具体计算公式如下:

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

$$D = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left( \frac{W_r}{\sum_{r=1}^R W_r} \right) r_y \times i_{rxy} \times \beta_x \times S_{jr} \quad (2)$$

式中: $Q_{sj}$ 为第 $j$ 类土地利用/覆被类型(地类景观)在第 $x$ 个栅格的生境质量; $H_j$ 表示地类景观 $j$ 的生境适宜程度; $D_{sj}$ 为地类景观 $j$ 中栅格单元 $x$ 的生境退化程度; $k$ 为半饱和系数; $z$ 为系统固有的换算系数,其值为2.5。 $R$ 为生态威胁因子个数, $W_r$ 为生态威胁因子 $r$ 的权重, $y$ 为生态威胁因子 $r$ 的所有栅格单元, $Y_r$ 是生态威胁因子 $r$ 栅格单元的总数;根据白龙江流域具体实际情况,本文选取城镇、农村居民点、人口密度、农田、道路(国道、省道、县乡道路)、综合生态风险源(滑坡、泥石流、土壤侵蚀、地震、干旱)等对地表景观影响较大的人为或自然因素作为生态威胁因子。土地覆盖数据主要是采用监督分类方法结合目视解译获得,数据采用1990、2002、2010年3个时段是Landsat TM/ETM遥感影像(无云,空间分辨率为30 m),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,划分为6个大类12个小类,即耕地、林地(有林地、灌木林地、疏林地、其他林地)、草地(高覆盖草

地、中覆盖草地、低覆盖草地)、水域(河流、湖泊水库)、建设用地、未利用地(沙地裸地、高山积雪-裸岩);然后,结合地形图、土地利用变更数据、野外实地调查和Google高清影像等资料进行精度检验以满足研究需求。 $i_{ry}$ 表示生态威胁因子 $r$ 的最大影响距离; $r_y$ 为地类景观 $y$ 栅格单元中生态威胁因子的个数; $\beta_r$ 是指法律准入程度或到达度,反映土地资源或生态系统保护程度,本文暂不考虑白龙江流域特定的土地保护区因素,将区域内各土地覆被类型在国家法律法规上受到保护的程度是平等均一的; $S_{ry}$ 为地类景观 $j$ 对于威胁因子 $r$ 的敏感度大小,取值范围为[0,1]。

然而,生物多样性评估研究是一个十分复杂的过程,在大尺度区域景观水平上除了生境质量外,还包括生态系统状况及弹性、景观结构状态等。植被净初生产力是当前自然环境条件下植物群落的净初生产能力,是区域陆地生态系统状况及弹性的直接体现<sup>[23,24]</sup>;在一定范围内,植被净初生产力高的区域,生态系统供给能力及弹性较高,生物多样性也相对较高<sup>[23]</sup>。景观结构状况是景观类别和异质性的体现,在区域景观水平上,景观结构状态越好、类别越均衡、生态系统越复杂,区域景观多样性程度越大<sup>[25]</sup>。因此,从景观地理学的角度去理解和分析生物多样性的概念、层次和丧失原因等,同时考虑到各评估指标空间表达的可操作性和可视性<sup>[19]</sup>,本文拟以生境质量、植被净初生产力和景观结构指数3个指标来分别反映生物栖息地质量、区域生态系统状况和景观多样性,并基于此,构建和分析计算区域景观水平的生物多样性综合指数。公式如下:

$$BI_x = Q_{xy} \times \beta_1 + NPP_x \times \beta_2 + LS_x \times \beta_3 \quad (3)$$

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (4)$$

$$\varepsilon(x, t) = \varepsilon_{\max} \times T_e(x, t) \times W_e(x, t) \quad (5)$$

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times 0.5 \times FPAP(x, t) \quad (6)$$

$$LS_i = 1 - S_i = 1 - (aC_i + bN_i + cF_i) \quad (7)$$

$$C_i = \frac{n_i}{A_i} \quad (8)$$

$$N_i = 0.5 \sqrt{\frac{n_i}{A}} \times \frac{A}{A_i} \quad (9)$$

$$F_i = 2 \ln \left( \frac{P_i}{4} \right) \ln A_i \quad (10)$$

式中: $BI_x$ 表示栅格单元 $x$ 的生物多样性综合指数, $Q_{xy}$ 为第 $j$ 类土地利用/覆被类型(地类景观)在第 $x$ 个

栅格的生境质量,可通过InVEST-HabitatQuality模块计算获得; $NPP_x$ 为第 $x$ 个栅格的植被净初生产力年值,可利用光能利用率模型(CASA模型)计算获得<sup>[24,26]</sup>; $T_e(x, t)$ 表示温度胁迫系数, $W_e(x, t)$ 表示水分胁迫系数, $\varepsilon_{\max}$ 表示没有受任何限制的情况下植被的最大光能利用率。 $APAR(x, t)$ 为 $t$ 月份象元 $x$ 吸收的光合有效辐射, $SOL(x, t)$ 是 $t$ 月份象元 $x$ 处的太阳总辐射量( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ), $FPAR(x, t)$ 指的是 $t$ 月份象元 $x$ 处的光合有效辐射吸收率,常数0.5表示植被所吸收的太阳有效辐射(波长范围 $0.38 \sim 0.71 \mu\text{m}$ )与植被冠层接收到的太阳总辐射之比。 $S_x$ 为景观尺度上第 $x$ 个栅格的景观结构指数,可通过构建景观指数来反映<sup>[19]</sup>。 $LS_i$ 为景观状态指数, $S_i$ 、 $C_i$ 、 $N_i$ 和 $F_i$ 分别为景观损失指数、破碎度指数、分离度指数和分维数, $A_i$ 为景观类型 $i$ 的总面积, $n_i$ 为景观类型 $i$ 的斑块数, $P_i$ 为某一景观类型 $i$ 的周长。 $\beta_x$ 为权重系数,通过结合研究区实地特点,利用层次分析法(AHP)计算生境质量、植被净初生产力和景观结构指数的权重,根据各指标对区域生物多样性的影响程度构建比较矩阵,对比较矩阵进行计算得到最大特征值为3.09所对应的归一化特征向量,获得生境质量、植被净初生产力和景观结构指数权重, $CR=0.042 < 0.1$ 通过一致性检验。

### 3 结果分析

#### 3.1 白龙江流域生境质量时空变化分析

白龙江流域生境质量空间格局分布明显,其生境质量低值区所占比重较大,主要分布在土石山区交错带上人类活动相对频繁的河谷地带,如舟曲-武都段白龙江两岸区域及武都北峪河区域、文县和武都交界区、宕昌县西北部地区;生境质量高值区域主要集聚在人类活动较弱的中高山林区和自然保护区。在时间上,1990~2010年白龙江流域生境质量总体呈现上升的趋势。利用Natural Breaks(Jenks)自然断点分类法进一步分析生境质量高低值差异性(表1),表明生境质量高值区( $Q_{xy} \geq 0.33$ )面积不断增加,从1990年的5.12%增至2010年的5.98%;低值区( $Q_{xy} < 0.16$ )则表现出减少的态势,其所占面积比重由1990年的82.63%降至2010年的80.50%;而一般区( $0.16 \leq Q_{xy} < 0.33$ )表现出先减少后上升的波动状态。

#### 3.2 白龙江流域生物多样性综合评价及时空格局

由公式(3)计算获取研究区生物多样性综合指数(图1),结果表明1990~2002年白龙江流域生

表1 1990~2010年白龙江流域生境质量分级表

Table 1 Statistics of habitat quality( $Q_{ij}$ ) in the Bailong River Watershed of the Gansu Province (BRWGP) from 1990 to 2010

生境质量等级	面积比重(%)		
	1990年	2002年	2010年
高( $Q_{ij} \geq 0.33$ )	5.12	5.43	5.96
中( $0.33 > Q_{ij} \geq 0.16$ )	12.26	11.48	13.53
低( $Q_{ij} < 0.16$ )	82.63	83.08	80.50

生物多样性综合指数略有增加,其平均值由0.189增至0.211;高值区(Ⅳ和Ⅴ区间)不断扩大,其面积百分比从16.74%增至21.15%(表2),且低值区(Ⅰ和Ⅱ区间)呈现减少趋势,表明流域生物多样性两极分化趋向明显;但流域生物多样性最大值和最小值趋向减小,间接反映出局部地区(原本生物多样性就低的地区)生物多样性又减弱的态势。2002~2010年,生物多样性综合指数持续增长,两极分化趋势继续扩大。整个研究期间,生物多样性总体

呈现增长的趋势,但低值区面积比重仍在52%以上,表明研究区生物多样性恢复工作依然很严峻。在空间上,白龙江流域生物多样性空间格局分布明显,其生物多样性丰富区域(高值区)主要分布在海拔约为1 000~3 000 m的中高山林区域,这些地区物种高度丰富、植被覆盖好、生境质量高、人类活动干扰极少、生态系统类型多样,且多为自然保护区、林业管护区或天然林生态系统集中区域,是大熊猫、金丝猴、珙桐、银杉、连香树、水青树等珍稀动植物或国家重点保护动植物分布关键区域。生物多样性中等区域多是以农林生态系统为主,灌丛草地相间分布,植被覆盖良好、物种丰富度和生境质量一般,在局部山岭丘陵地区生物多样性较丰富,生物多样性指数为一般。生物多样性较低区域(低值区),主要集中在人类活动相对频繁的农业主产区、城乡区域和灾害多发区,其区域内生态环境相对脆弱,人类活动干扰强烈,滑坡、泥石流、水土流失等灾害频繁,物种相对贫

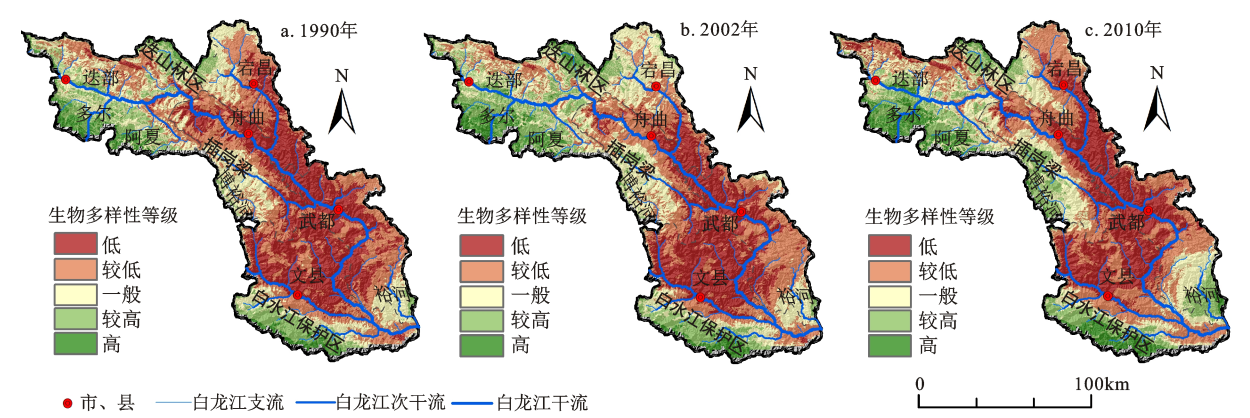


图1 白龙江流域生物多样性综合指数分布

Fig.1 Distribution of biodiversity comprehensive index in BRWGP from 1990 to 2010

表2 1990~2010年白龙江流域生物多样性综合指数统计

Table 2 Statistics of biodiversity comprehensive index in BRWGP during 1990-2010

生物多样性等级	生物多样性状况	面积比重(%)		
		1990年	2002年	2010年
低	物种相对贫乏,生境质量较差,人类活动干扰频繁而强烈,生态系统类型单一、脆弱	25.03	21.11	17.3
较低	物种较少,景观较为破碎,受人类活动干扰,生境质量一般,生物多样性相对较低	34.31	30.72	33.27
一般	物种一般,植被净初生产力良好,局部地区生物多样性较丰富,但生物多样性总体水平一般	23.91	27.02	23.41
较高	物种较丰富,植被覆盖好、特有属和种较多,人类活动干扰少、生态系统类型较多,局部地区生物多样性高度丰富	10.83	13.98	16.56
高	物种高度丰富,特有属、种多,植被净初生产力高,景观稳定高,生境质量高,人类活动干扰极少,生态系统丰富多样	5.91	7.17	9.46

乏、景观破碎化高、生境质量较差、生态系统类型较为单一,生物多样性较低(表2)。

为了进一步分析流域生物多样性时空变化特征,利用GIS空间分析的方法对研究初期和末期的生物多样性综合评价进行差值分析,差值小于0表示生物多样性降低,大于0则表示生物多样性增加(图2)。由图2可知,白龙江流域景观生物多样性增加区域主要是以林区、生态工程治理区(如退耕还林工程实施区、长防林保护区、天然林保护工程区等)、农牧过渡区和以草灌为主的中高山地林区和生态工程恢复区,如多尔、阿夏、岷山、拦坝河中上游、博裕河和大鱼团河流域的林业区。生物多样性减少区域主要分布在舟曲县两江镇-武都区汉王镇段白龙江两岸、宕昌县县城以上的岷江上游土山区、海拔3 300 m以上的迭山高海山区、文县西北部以及碧口-姚渡段白龙江河谷沿线,约占研究区总面积的26%,表明近20 a期间,白龙江流域景观生物多样性增长明显,总体呈现增长的趋势。

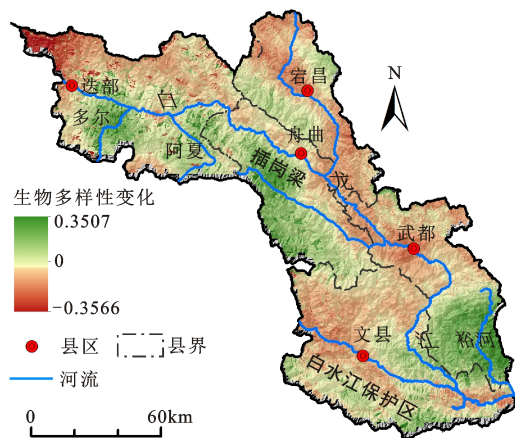


图2 1990~2010年白龙江流域生物多样性综合指数变化

Fig.2 Biodiversity comprehensive index change in BRWGP during 1990-2010

## 4 讨论

甘肃白龙江流域景观生物多样性的时空分布特征呈现出一定的规律性,生物多样性低值区主要分布在人口密集、工农业等社会经济条件较好的舟曲-武都-文县段白龙江河谷沿岸与缓丘土山区;景观生物多样性较高的区域则集中于阿夏-多尔、尖山大熊猫自然保护区和插岗梁、白水江等森林自然保护区以及迭山、博裕河、大鱼团河等林业

管护区。这与中国环境保护部2015年发布的《中国生物多样性保护优先区域范围》中<sup>[27]</sup>指出中国岷山-横断山北段大熊猫、金丝猴、珙桐、银杉、连香树、水青树等珍稀动植物或国家重点保护动植物分布关键区域和保护优先保护区相一致<sup>[19]</sup>。1990~2010年,流域景观生物多样性减少区主要发生在人类活动频繁的滑坡、泥石流灾害多发区和高寒山区,而生物多样性增长区则集中在生态工程实施区和林业管护区;这与其他学者在研究白龙江流域生态风险的结果相似<sup>[28-30]</sup>。同时,白龙江流域景观生物多样性整体呈现增长的趋势,但在1990~2002年增长相对缓慢,2002~2010年增长相对较明显。

InVEST生境质量模块是根据地类景观与生态威胁源的关系,通过分析生境质量(或者生物栖息地质量)来间接反映生物多样性高低。在大中尺度的景观水平上,生物多样性还包含着生态系统状况及弹性(或区域环境状况)和生态系统景观多样性等<sup>[19]</sup>。因此,本文在景观地理学视角下,利用NPP和景观结构指数来分别表征区域环境状况和生态系统景观多样性,结合InVEST生境质量模型的评估结果改进区域生物多样性空间分布的评估方法,同时通过野外样方生物多样性本底调查、部分自然保护区科学考察报告和全国野生高等动植物名录等相关资料进行验证与分析,结果表明从区域尺度上改进后的评估结果更能较清晰和客观地体现白龙江流域生物多样性实际空间分布格局。今后,在加大生物多样本底调查和长期野外观测工作的同时上,可结合宏观尺度的遥感观测、卫星追踪和模型模拟等技术,以有效地反映区域生物多样性的时间和空间上的变化特征<sup>[31-33]</sup>。

## 5 结论

在空间分布上,甘肃白龙江流域生物多样性丰富的区域主要集中在人类活动干扰较少的自然保护区和林业管护区,生物多样性低值区则主要分布在舟曲-武都-文县的白龙江两岸及其以北区域、宕昌县岷江沿岸的城乡和农耕(或农牧)区,也是研究期间生物多样性减少的主要区域。1990~2010年间,白龙江流域生物多样性增长显著区域主要是在退耕还林、长防林工程等生态工程实施区。

本文尝试在遥感和GIS技术的支持下,结合InVEST模型、NPP和景观结构指数构建区域生物多样性空间格局的评估方法,并在栅格像元尺度

上量化分析生物多样性空间分布状况。与单纯只考虑生境质量的InVEST模型区域生物多样性评价结果相比,对于山大沟深、灾害频发、缺乏长期野外监测数据的甘肃白龙江流域而言,构建后的区域生物多样性空间格局评估方法的研究结果更为客观和真实,更符合流域生物多样性实际分布状况。

致谢:感谢陈国清、王茜茜、吴婧等大学生在数据处理与文字校对过程中给予的帮助以及广西师范学院省部级重点实验室创新基地大学生创新实践训练计划项目(201710603261、201710603263)对本研究的支持!

### 参考文献(References):

- [1] Butchart S H, Walpole M, Collen B et al. Global biodiversity: Indicators of recent declines[J]. Science, 2010, 328(5982): 1164-1168.
- [2] Thompson I D, Okabe K, Parrotta J A et al. Biodiversity and ecosystem services: lessons from nature to improve management of planted forests for REDD-plus[J]. Biodivers Conserv, 2014, 23(10):2613-2635.
- [3] Isbell F, Reich P B, Tilman D et al. Nutrient enrichment, biodiversity loss, and consequent declines in ecosystem productivity [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(29): 11911-11916.
- [4] CBD (Secretariat of the Convention on Biological Diversity). Global Biodiversity Outlook 4[M]. Montreal, Canada: Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2014: 155-155.
- [5] Zhao G S, Liu J Y, Kuang W H et al. Disturbance impacts of land use change on biodiversity conservation priority areas across China: 1990-2010 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(5): 515-529.
- [6] 彭羽, 卿凤婷, 米凯, 等. 生物多样性不同层次尺度效应及其耦合关系研究进展[J]. 生态学报, 2015, 35(2):577-583. [Peng Yu, Qing Fengting, Mi Kai et al. Study progress on spatial scale effects and coupling relationships of different levels in biodiversity. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2) : 577-583.]
- [7] Lausch A, Bannehr L, Beckmann M et al. Linking Earth Observation and taxonomic, structural and functional biodiversity: local to ecosystem perspectives[J]. Ecological Indicators, 2016, 70: 317-339.
- [8] Scholes R J, Walters M, Turak E et al. Building a global observing system for biodiversity[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2012, 4(1):139-146.
- [9] Pettorelli N, Safi K, Turner W. Satellite remote sensing, biodiversity research and conservation of the future[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2014, 369:1-5.
- [10] 郭庆华, 刘瑾, 李玉美, 等. 生物多样性近地面遥感监测:应用现状与前景展望[J]. 生物多样性, 2016, 24(11):1249-1266. [Guo Qinghua, Liu Jin, Li Yumei et al. A near-surface remote sensing platform for biodiversity monitoring: Perspectives and prospects. Biodiversity Science, 2016, 24 (11): 1249-1266.]
- [11] Su Y, Guo Q, Xue B et al. Spatial distribution of forest above-ground biomass in China: Estimation through combination of spaceborne lidar, optical imagery, and forest inventory data[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 173:187-199.
- [12] 马克平. 中国生物多样性监测网络建设:从 CForBio 到 Sino BON[J]. 生物多样性, 2015, 23: 1-2. [Ma Keping. Biodiversity monitoring in China: From CForBio to Sino BON. Biodiversity Science, 2015, 23: 1-2.]
- [13] Kooistra L, Wamelink W, Schaepman-Strub G et al. Assessing and predicting biodiversity in a floodplain ecosystem: assimilation of net primary production derived from imaging spectrometer data into a dynamic vegetation model[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(5): 2118-2130.
- [14] Vihervaara P, Mononen L, Auvinen A P et al. How to integrate remotely sensed data and biodiversity for ecosystem assessments at landscape scale[J]. Landscape Ecology, 2015, 30(3): 501-516.
- [15] Polasky S, Nelson E, Pennington D et al. The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: A case study in the state of minnesota[J]. Environmental and Resource Economics, 2011, 48(2): 219-242.
- [16] 孙传淳, 甄霖, 王超, 等. 基于 InVEST 模型的鄱阳湖湿地生物多样性情景分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1119-1125. [Sun Chuanchun, Zhen Lin, Wang Chao et al. Biodiversity simulation of Poyang lake wetland by InVEST Model under different scenarios. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(7):1119-1125.]
- [17] 徐佩, 王玉宽, 杨金凤, 等. 汶川地震灾区生物多样性热点地区分析[J]. 生态学报, 2013, 33(3):718-725. [Xu Pei, Wang Yukuang, Yang Jinfeng et al. Identification of hotspots for biodiversity conservation in the Wenchuan earthquake-hit area. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3) : 718-725.]
- [18] 谢余初, 巩杰, 齐姗姗, 等. 甘肃白龙江流域生态系统粮食生产服务价值时空分异[J]. 生态学报, 2017, 37(5):1719-1728. [Xie Yuchu, Gong Jie, Qi Shanshan et al. Assessment of ecosystem food production and its spatiotemporal heterogeneity in the Bailong River Watershed, Gansu. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(5):1719-1728.]
- [19] 谢余初, 巩杰, 齐姗姗, 等. 基于综合指数法的白龙江流域生物多样性空间分异特征研究[J]. 生态学报, 2017, 37(19): 6448-6456. [Xie Yuchu, Gong Jie, Qi Shanshan et al. Assessment and spatial variation of biodiversity in the Bailong River Watershed of the Gansu Province. Acta Ecologica Sinica, 2017,

- 37(19):6448-6456.]
- [20] Tallis H T, Ricketts T, Guerry A et al. InVEST 2.5.6 User's Guide[M]. Stanford: The Natural Capital Project, 2013.
- [21] Lisa M, Douglass J, Lozano J S et al. An open-source software tool for integrating biodiversity and ecosystem services into impact assessment and mitigation decisions[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 84:121-133.
- [22] Herzog F, Lüscher G, Arndorfer M et al. European farm scale habitat descriptors for the evaluation of biodiversity[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 77:205-217.
- [23] Lausch A, Bannehr L, Beckmann M et al. Linking earth observation and taxonomic, structural and functional biodiversity: local to ecosystem perspectives[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 70: 317-339.
- [24] Liu C Y, Dong X F, Liu Y Y. Changes of NPP and their relationship to climate factors based on the transformation of different scales in Gansu, China[J]. *Catena*, 2015, 125: 190-199.
- [25] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007. [Wu Jianguo. *Landscape ecology: Pattern, process, scale and hierarchy* (2nd edition). Beijing: Higher Education Press, 2007.]
- [26] Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results[J]. *Global change biology*, 1999, 5(1): 1-15.
- [27] 中国环境保护部. 关于发布《中国生物多样性保护优先区域范围》的公告[N/OL]. 2015. [http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201601/t20160105\\_321061.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201601/t20160105_321061.htm) [Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Public announcement of biodiversity conservation priority areas in China. 2015. [http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201601/t20160105\\_321061.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201601/t20160105_321061.htm).]
- [28] 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. [Gong Jie, Xie Yuchu, Zhao Caixia et al. Landscape ecological risk assessment and its spatiotemporal variation of the Bailongjiang watershed, Gansu. *China Environmental Science*, 2014, 34(8): 2153-2160.]
- [29] 谢余初, 巩杰, 张玲玲. 基于PSR模型的白龙江流域景观生态安全时空变化[J]. *地理科学*, 2015, 35(6): 790-797. [Xie Yuchu, Gong Jie, Zhang Lingling. Dynamics of landscape ecological security based on PSR Model in the Bailongjiang River Watershed. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(6): 790-797.]
- [30] 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. [Gong Jie, Zhao Caixia, Wang Heling et al. Ecological risk assessment of Longnan mountainous area based on geological disasters: A case study of Wudu. *Journal of Mountain Science*, 2012, 30(5):570-577.]
- [31] 马克平. 生物多样性监测依赖于地面人工观测与先进技术手段的有机结合[J]. *生物多样性*, 2016, 24 (11): 1201-1202. [Ma Keping. Biodiversity monitoring relies on the integration of human observation and automatic collection of data with advanced equipment and facilities. *Biodiversity Science*, 2016, 24 (11): 1201-1202.]
- [32] Gillison A N, Asner G P, Fernandes E C M et al. Biodiversity and agriculture in dynamic landscapes: Integrating ground and remotely-sensed baseline surveys[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 177:9-19.
- [33] Mendenhall C D, Shields-Estrada A, Krishnaswami A J et al. Quantifying and sustaining biodiversity in tropical agricultural landscapes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 113(51): 14544-14551.

## Spatiotemporal Change of Landscape Biodiversity Based on InVEST Model and Remote Sensing Technology in the Bailong River Watershed

Xie Yuchu<sup>1,2,3</sup>, Gong Jie<sup>2</sup>, Zhang Suxin<sup>1</sup>, Ma Xuecheng<sup>2</sup>, Hu Baoqing<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Ministry of Education, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530001, Guangxi, China; 2. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, 410125, Hunan, China)

**Abstract:** Biodiversity is the material foundation and the environment guarantee that people are taken for their survival and development, and has four levels: molecular, species, ecosystem and landscape. The identification and understanding of the spatiotemporal variation of biodiversity in the landscape level are not just an important part of regional biodiversity monitoring and assessment, but also the first step in the formulation and implementation of the protection scheme. The Bailong River Watershed of the Gansu Province (BRWGP), one of the most abundant biodiversity regions in China, locating in the transitional ecotone along the Tibetan Plateau, Loess Plateau, and Qinba Mountains. The BRWGP served as a case to analyze the spatiotemporal heterogeneity of biodiversity. Based on the data integration analysis platforms of RS, GIS technology and InVEST 2.5.6, a comprehensive index system of biodiversity spatial patterns constructed with the incorporation of habitat quality, vegetation net primary productivity, and landscape state index by considering the difference of three assessment indicators intensity and influence degree. Meanwhile, AHP was used to determine the weights of index and GIS spatial technology apply to analyze the spatial distribution and differentiation of biodiversity under the landscape geography perspective. Our goal went to revise the biodiversity evaluation module of the InVEST model and demonstrate biodiversity spatial patterns on a grid cell. The results indicated that biodiversity was high and had obvious spatial pattern variations in the BRWGP. Areas with higher biodiversity mainly distribute in the national nature reserve and forest, while the relatively poor biodiversity areas distribute in the valleys of the BRWGP between Zhouqu-Wudu-Wenxian, the valley of Minjiang in Tanchang County, alpine mountain snow regions, and bare rock zones. Moderate biodiversity areas appeared in agroforestry ecosystem, shrub and grassland, which a vegetation cover, species richness and habitat quality were general. In 1990-2010, biodiversity was high and increasing, the area proportion of higher biodiversity (critical areas) increased from 16.74% to 26.02%. Meanwhile, the high growth area of biodiversity change was concentrated in the ecological engineering zone and forest districts (Such as these forest districts of Duoer, Axia, the Minshan Mountain, Baishuijiang Nature Reserve), while biodiversity reduction area locates in the region of human activities intensively and frequently, such as cultivated area, urban and rural areas.

**Key words:** biodiversity; habitat quality; InVEST model; the Bailong River Watershed