

DOI: 10.5846/stxb202105131254

潘耀, 尹云鹤, 侯文娟, 韩皓爽. 基于土地利用及植被覆盖变化的黄河源区生境质量时空变化特征. 生态学报, 2022, 42(19): 7978-7988.

Pan Y, Yin Y H, Hou W J, Han H S. Spatiotemporal variation of habitat quality in the Source Region of the Yellow River based on land use and vegetation cover changes. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 7978-7988.

基于土地利用及植被覆盖变化的黄河源区生境质量时空变化特征

潘耀^{1,2}, 尹云鹤^{1,*}, 侯文娟¹, 韩皓爽^{1,2}

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

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 位于青藏高原腹地的黄河源地区生态环境脆弱, 面临生物多样性锐减、生态系统退化等问题, 黄河源区生态系统保护及其高质量发展已成为国家的重点战略之一。土地利用与植被覆盖是影响生境质量的重要因素, 量化土地利用方式、强度及格局和植被覆盖格局对生态质量影响的研究越来越受到关注, 但其对黄河源区生态质量的耦合效应尚不明确。基于 2000 年和 2015 年黄河源区土地利用类型及生长季归一化植被指数 (NDVI), 采用 InVEST 模型探究了不同时期黄河源区生境质量时空变化, 并采用地理加权回归 (GWR) 模型揭示了生境质量对土地利用和植被覆盖变化的空间响应特征。结果表明, 2000 年与 2015 年土地利用类型变化主要为未利用土地向草地的转移。植被覆盖变化方面, 源区生长季 NDVI 整体上升。从生境质量的空间分布来看, 黄河源区生境质量总体呈现南高北低的空间格局, 高值分布在南部及中部地区, 低值分布在北部布青山、东北部高海拔区及黄河乡的黄河沿岸。相较于 2000 年, 2015 年黄河源区生境质量平均提高 11.47%。草地面积和 NDVI 与生境质量均呈显著正相关关系, 其中 NDVI 是提高黄河源区生境质量的重要驱动因子。研究结果突出了 NDVI 对提高黄河源区生境质量的主导作用, 可为未来源区生态保护提供借鉴。

关键词: 生境质量; 威胁; 归一化植被指数 (NDVI); InVEST 模型; 地理加权回归模型 (GWR); 时空变化

Spatiotemporal variation of habitat quality in the Source Region of the Yellow River based on land use and vegetation cover changes

PAN Yao^{1,2}, YIN Yunhe^{1,*}, HOU Wenjuan¹, HAN Haoshuang^{1,2}

1 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The Source Region of the Yellow River is situated in the hinterland of Qing-Tibetan Plateau, with very fragile ecosystem. The Source Region of the Yellow River is facing problems such as biodiversity and ecosystem degradation. Ecological protection and high-quality development of the Source Region of the Yellow River has been risen to be one of the key concerns of the national strategy. Land use and vegetation cover are important factors affecting habitat quality. More and more attention has been paid to quantitative evaluation of the impact of the change of land use types, intensity and patterns to habitat quality and the change of the spatiotemporal pattern of vegetation cover to habitat quality. However, the coupling effects of land use and vegetation cover on the habitat quality of the Source Region of the Yellow River are still unclear. Based on the data of land use and the normalized difference vegetation index (NDVI) of vegetation growing season in the

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0403); 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) (XDA20020202, XDA19040304)

收稿日期: 2021-05-13; **网络出版日期:** 2022-05-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yinyh@igsrr.ac.cn

Source Region of the Yellow River in 2000 and 2015, this study used the InVEST model to explore the temporal and spatial changes of the habitat quality in the source area of the Yellow River in different periods, and used the geographical weighted regression (GWR) model to quantitatively analyze the coupling effect of land use and NDVI on the evolution of habitat quality. The results showed that land-use types had mainly changed from unused land to grassland in 2000 and 2015 in the Source Region of the Yellow. Overall NDVI in the Source Region of the Yellow River increased during the growing season in 2000 and 2015. From the perspective of spatial distribution, the habitat quality generally presented a spatial pattern of low in the north and high in the south. The high values were distributed in the southern and central regions, and the low values were distributed in the Buqing Mountain in the north, the high-altitude areas in the northeast and along the Yellow River in Yellow River Township. Compared with 2000, the habitat quality in the Source Region of the Yellow River in 2015 increased by 11.47% on average. Both the grassland and NDVI had a significantly positive correlation with the habitat quality, and NDVI dominated the change of habitat quality. The results of this study highlight the leading role of NDVI in improving the habitat quality in the Source Region of the Yellow River and can provide a reference for future ecological protection of the source region.

Key Words: habitat quality; threats; NDVI; InVEST; geographically weighted regression; spatiotemporal change

生境质量反映了区域生态系统可提供给系统内动植物生存和延续所需的自然资源的质量^[1],生境质量的高低是衡量生态环境水平好坏的重要指标^[2]。盲目的土地开发、建设扩张等引起的大规模土地利用方式、强度及格局的改变,将可能导致生境破碎化和生境退化^[3-4]。因此,监测评估生境质量的变化对区域生态建设与土地规划具有重要意义^[5]。

黄河源区位于青藏高原腹地,是黄河上游重要的水源涵养区^[6],是打赢脱贫攻坚战的重要区域,在我国经济社会发展和生态安全建设方面具有十分重要的地位^[7]。由于其复杂的地形和独特的高寒地理环境条件下的脆弱生态系统,对全球变化和人类干预响应十分敏感^[8-9]。人类干扰下的黄河源区发生生境退化^[10-11],湖泊面积变化^[12]、冰川萎缩^[13]、冻土退化^[12]、草地退化^[14]、荒漠化^[12]等生态问题,且有持续的趋势。为遏制此趋势,国家自 21 世纪初在该地区实施了一系列生态保护工程^[15];2002 年正式批准西部省区实施“退牧还草”工程,黄河源区于 2011 年开始实施第一轮草原生态保护补助奖励政策(2011—2015 年)^[15],同时 2005 年开展三江源区生态保护和建设一期工程^[16]。此间区域生长季归一化植被指数(NDVI)总体水平上升^[17],虽然该区域草地退化趋势得到有效遏制^[16],但生态整体退化趋势并未得到根本遏制^[18]。由此可见,分析评估该区 2000 年及 2015 年生境质量的变化,将为青藏高原国家公园建设及生态安全屏障体系优化提供科学支撑,该研究对于保障区域生态安全具有重要作用。

伴随着人类活动和气候影响不断加剧情况下,许多区域发现生境质量普遍下降^[5]。人类活动主导下的土地利用变化是导致生境质量变化的重要因素之一^[19-20]。除了土地利用方式带来的改变之外,植被类型、结构与生长状况也影响部分区域野生动物物种的适宜性,成为区域生境质量形成的主要驱动因素^[21-23]。不同物种对自然资源的数量和质量有所权衡^[24],物种偏好选择特定植被类型作为生境^[25]。植被结构及其垂直异质性与自然资源的多样性和可用性、庇护以及栖息繁殖或产卵场所选择直接相关,这些特性成为生境适宜性和物种生态位的驱动因素^[21]。植被生长状况的空间差异,被用以考量每个物种当前生境的适宜性^[26-27]。然而多数研究围绕土地利用下的生境质量的时空变化开展^[28-30],并且发现 NDVI 和生境质量之间具有强相关性^[31-32],但较少考虑同一种植被类型生长结构差异下的生境质量^[33]。归一化植被指数(NDVI)被认为是揭示植被生长状态及植被覆盖动态的最佳指示因子,是监测区域植被和生态环境变化的有效指标^[6]。在土地利用变化相对较小,NDVI 变化较显著的区域背景下,耦合 NDVI 与区域土地利用两者评估的生境质量结果与青藏高原总体暖湿的背景相符^[34]。本文基于 InVEST 模型评估结果,对生境质量的评估中耦合了生长季 NDVI 为指示因子的植被覆盖,以此改进生境质量评估结果。

本文利用 2000 年和 2015 年的土地利用数据和遥感植被指数数据,系统定量评估植被状况变化和人类活动共同影响下黄河源区的生境质量变化,并探讨其变化的影响因素与驱动机制。研究有助于制定青藏高原国家生态安全屏障功能优化措施,也可为更好地实现人与自然和谐发展提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

本文的研究区域主要为黄河源区。黄河源区(97°1′—99°14′N, 33°55′—35°28′E, 图 1)位于三江源自然保护区腹地,地形为中间低、四周高,该地区平均海拔在 4000m 以上。黄河源园区位于果洛州玛多县境内,包括三江源国家级自然保护区的扎陵湖-鄂陵湖和星星海 2 个自然保护分区。总面积超过 1.91 万 km²,行政区域涉及玛多县黄河乡、扎陵湖乡、玛查理镇等 19 个行政村。

黄河源区属于典型的高原大陆性气候,特征表现为冷热两季交替、干湿两季分明、年温差小、日温差大、日照时间长、辐射强烈。全年平均气温约-2℃,年平均降水量约为 437mm,整体由西北向东南递减^[35]。

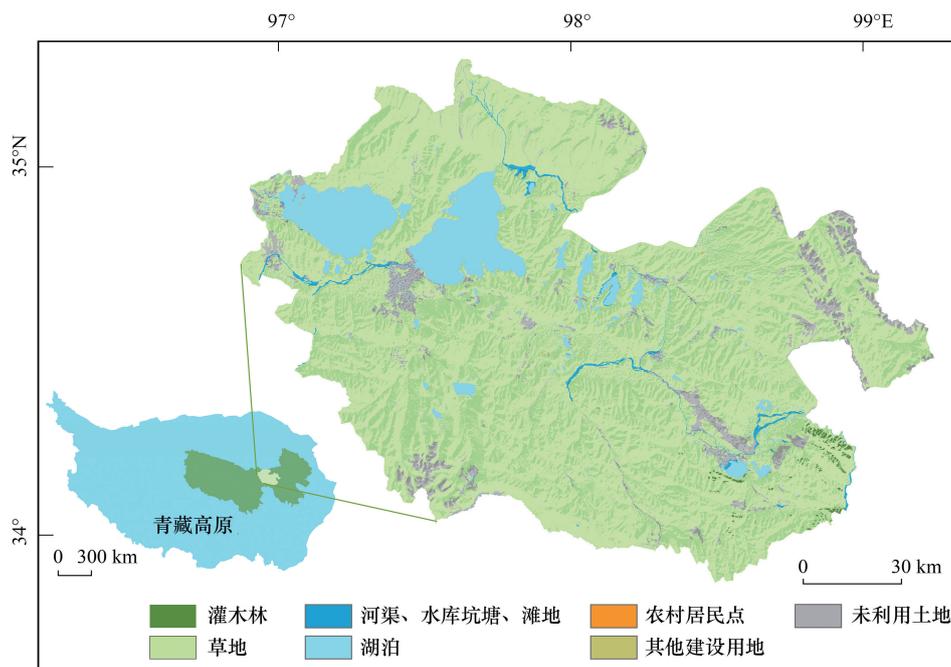


图 1 黄河源区范围示意图

Fig.1 Location of the Source Region of the Yellow River

1.2 数据

1.2.1 土地利用数据

土地利用数据来源于资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)的 2000、2015 年全国土地利用现状数据集。该数据集以 30m×30m 分辨率的遥感数据为基础,通过人机交互解译方法生成^[36]。

1.2.2 道路数据

本文使用的国道数据来源于北京大学城市与环境学院地理数据平台(<http://geodata.pku.edu.cn/>)的 2000、2015 年的交通数据集。

1.2.3 植被指数

本研究所采用的 2000、2015 年植被指数数据为地理空间数据云的 500m NDVI 月合成产品(<http://www.gscloud.cn/>)。由于研究区所在的青藏高原独特的气候特点,采用 5 月至 9 月生长季 NDVI 均值表征植被生长状况^[37]。

1.3 方法

1.3.1 生境质量评估

InVEST 生境质量模型通过识别研究区受到的外界威胁强度和研究区中各类景观对威胁的敏感性,计算研究区的生境质量^[38]。但即使是同一种生境类型,由于当年的植被生长结构差异不同,也会造成生境质量区域间的差异^[33]。利用生长季 NDVI 的均值表征植被覆盖,改进生境质量模型的生境质量结果:

$$Q_x = Q_i \times M_{NDVI} \tag{1}$$

式中, Q_x 为栅格 x 的生境质量, Q_i 为 InVEST 生境质量模型评估的生境质量, M_{NDVI} 为栅格 x 的生长季 NDVI 均值。

InVEST 模型计算生境质量,基于生境类型所受到的总威胁水平,采用半饱和函数来计算生境质量得分:

$$Q_i = H_t \left(1 - \left(\frac{D_{xt}^z}{D_{xt}^z + K^z} \right) \right) \tag{2}$$

式中, H_t 是生境适宜性, K 是半饱和常数(通常取值 0.05), z 为反映空间异质性的尺度参数, D_{xt} 为土地类型 t 下网格单元格 x 的总威胁等级^[39]。InVEST 模型输出生境质量分布,得分为 0—1,得分越高,生境质量越高^[40]。

计算在土地利用/覆盖(LULC)或生境类型 t 中栅格 x 的总威胁水平,表示如下:

$$D_{xt} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\frac{w_r}{\sum_{r=1}^R w_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{tr} \tag{3}$$

式中, y 是指 r 威胁栅格图上的所有栅格, Y_r 是指 r 威胁栅格图上的一组栅格。 w_r 为威胁 R 的影响权重(表 1), R 为威胁的个数, r_y 为每个栅格上胁迫因子的个数, i_{rxy} 为威胁 r 在栅格 x 的生境对栅格 y 的影响, β_x 为网格单元 x 的可达性(通常视作 1); S_{tr} 表示土地类型 t 对威胁因子 r 的相对敏感性(表 2)。

威胁 r 在栅格 x 的生境对栅格 y 的影响用 i_{rxy} 表示,如下式所示:

$$i_{rxy} = 1 - \frac{d_{xy}}{d_{r_max}} \quad (\text{线性}) \tag{4}$$

$$i_{rxy} = \exp \left(- \left(\frac{2.99}{d_{r_max}} \right) d_{xy} \right) \quad (\text{指数型}) \tag{5}$$

式中, d_{xy} 为像素 x 到像素 y 的距离; d_{r_max} 为 r 威胁的最大作用距离(表 1)。

1.3.2 InVEST 生境质量模型参数

InVEST 基于各土地利用类型受威胁因子的影响程度计算生境质量。InVEST 模型中每个威胁因子数据的栅格单元格都包含一个值,该值指示威胁的存在(值为 1),或威胁的不存在(值为 0)。对黄河源区生境质量产生影响的威胁因子定义为:居住地、耕地、国道。

参考文献取值^[41—43],并结合研究区特征,综合考虑威胁因子的影响距离及权重(表 1)、不同土地利用类型的生境适宜度及其对不同威胁源的相对敏感程度(表 2)。

表 1 InVEST 威胁因子参数

Table 1 Threat parameters

威胁因子 Threat	最大影响距离/km Maximum impact distance	权重 Weight	距离衰减方式 Decay
居住地 Settlement	3	1	指数
耕地 Farmland	8	0.7	线性
国道 Road	3	1	线性

表 2 不同土地利用类型的生境适宜性及其对威胁的敏感性

Table 2 Habitat score of different land cover types and their sensitivity to each threat

一级地类 First-class type	二级地类 Second-class type	生境适宜性 Suitability	居住地 Settlement	耕地 Farmland	国道 Road
耕地 Farmland	旱地	0.5	0.7	0	0.6
林地 Foerst land	有林地	1	1	0.8	0.8
	灌木林	0.85	0.9	0.7	0.7
	疏林地	0.9	1	0.8	0.8
	其他林地	0.8	1	0.8	0.8
草地 Grassland	高覆盖草地	0.8	0.9	0.7	0.7
	中覆盖草地	0.75	0.9	0.7	0.7
	低覆盖度草地	0.7	0.9	0.7	0.7
水域 Water area	河渠	0.7	1	0.8	0.8
	湖泊	0.7	1	0.8	0.8
	水库坑塘	0.7	1	0.8	0.8
	滩涂	0.7	1	0.8	0.8
	滩地	0.7	1	0.8	0.8
	永久性冰川雪地	0	0	0	0
建设用地 Built-up land	居住地(城镇用地、农村居民点)	0.1	0	0.3	0.3
	其他建设用地	0	0	0	0
未利用土地 Unused land	沙地	0.2	0.7	0.5	0.5
	戈壁	0.2	0.7	0.5	0.5
	盐碱地	0.2	0.7	0.5	0.5
	沼泽地	0.7	1	0.8	0.8
	裸土地	0.2	0.7	0.5	0.5
	裸岩石质地	0.2	0.7	0.5	0.5
	其他	0.2	0.7	0.5	0.5

1.3.3 全局最小二乘回归(OLS)和地理加权回归(GWR)分析

OLS 模型普遍用于分析两个或者多个变量的相关关系:

$$y_i = \beta_0 + \sum_{k=1}^p \beta_k x_k + \varepsilon \quad (6)$$

式中, β_0 为截距, x_k 为第 k 个解释变量的值, β_k 为第 k 个解释变量的斜率或回归系数, ε 为残差。

地理加权回归允许被解释变量与解释变量之间的关系随空间位置发生变化。GWR 模型的结构为^[44]:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{j=1}^k \beta_j(u_i, v_i) x_{ji} + \varepsilon_i \quad (7)$$

式中, (u_i, v_i) 为第 i 个样本空间单元的地理中心坐标, $\beta_0(u_i, v_i)$ 为位置 i 的截距, $\beta_j(u_i, v_i)$ 关于独立变量 x_{ji} 局部估计系数, ε_i ($i = 1, 2, \dots, k$) 是均值为 0, 方差为 σ^2 的误差项。

2 结果分析

2.1 黄河源区生境质量时空格局

研究区 2000 年生境质量均值为 0.28, 2015 年生境质量均值 0.32。相较于 2000 年, 2015 年黄河源生境质量总体平均提升 11.47%。主要是因为, 较低生境质量(0—0.2)的区域面积下降, 尤其是生境质量最低的区域(0—0.1)减少了 2625.98km²。相对中值(>0.2—0.5)的区域面积显著增加, 相对增加了 24.72%。生境质量较高值区(>0.5—0.7)面积小幅增加, 相对增加了 0.42%(表 3)。

表 3 2000 年和 2015 年黄河源区生境质量等级面积变化

Table 3 Change of total area and percentage of each habitat quality grade in the Source Region of the Yellow River in 2000 and 2015

分值区间 Value interval	2000 年		2015 年	
	面积/km ² Area	比例/% Ratio	面积/km ² Area	比例/% Ratio
0—0.1	3287.9	17.31	661.92	3.48
0.1—0.2	2434.27	12.82	2159.44	11.37
0.2—0.3	4906.91	25.83	6847.52	36.05
0.3—0.4	5735.88	30.20	6275.10	33.04
0.4—0.5	1063.74	5.60	1478.10	7.78
0.5—0.6	23.86	0.13	30.41	0.16
0.6—0.7	1540.78	8.11	1540.85	8.11

从图 2 可以看出,黄河源区生境质量呈由北向南增加的空间分布特征。研究区生境质量指数的主要构成范围是 0.2—0.5,其次是 0.5—0.7 的相对高值区以及 0—0.2 的相对低值区。其中 2000 年生境质量为 0.2—0.5 的相对中值区占区域面积的 61.63%,2015 年相对中值区的区域面积占比为 76.87%。生境质量指数在 0.2—0.5 之间的区域除北部较少,均匀分布在研究区。生境质量相对高值区分布在研究区中部及南部,2000 年及 2015 年相对高值区平均面积占比 8.26%。低值区主要分布在北部的布青山,东北部高海拔区及中东部的黄河沿岸,2000 年及 2015 年相对低值区平均面积占比 22.49%。

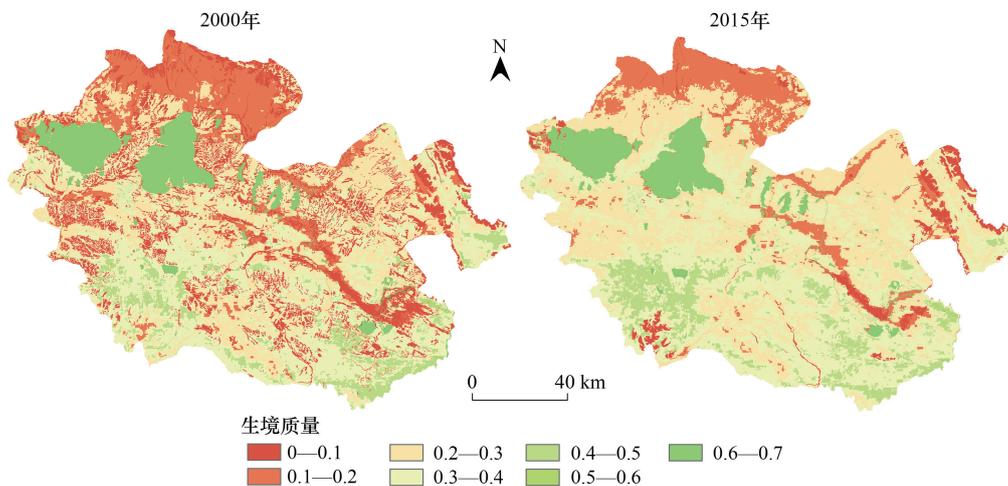


图 2 2000 年和 2015 年黄河源区生境质量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of habitat quality in the Source Region of the Yellow River in 2000 and 2015

2.2 生境质量对土地利用变化及 NDVI 变化的响应分析

2.2.1 土地利用变化及转移分析

与 2000 年相比,2015 年黄河源区约 17%的土地面积发生土地利用类型的变化,约有 83%的土地利用类型面积未发生变化(表 4)。未利用土地变化量最大(占土地利用类型增减总面积的 49.4%),其次是草地(48.2%)及水域(2.3%),其他地类的总变化量相对较小。未利用土地和草地的主导变化是净变化,净变化量占对应土地利用类型总变化量的 89.6%和 86.2%,其中未利用土地以数量的减少为主,草地以数量的增加为主。其次林地和建设用地的变化也表现为净变化,净变化量为对应土地利用类型的总变化量。水域的主导变换类型为交换变化,在 2015 年部分水域面积损失的同时获得其他土地利用类型转换而来的水域增加面积。

从总体上来看,2000 年与 2015 年间黄河源区土地利用类型以草地为主,其中约 20%的面积为水域和未利用土地。地类间的转移主要表现为未利用土地向草地的转移,相较于 2000 年,2015 年草地面积增加了 17.7%。

表 4 2000—2015 年黄河源区土地利用转移矩阵 (km²) 及土地利用类型面积占比/%Table 4 Land use transfer matrix (km²) and area of land use types in the Source Region of the Yellow River in 2000—2015

年份 Year	地类 Land use type	2015							面积减少 量/km ² Area decrease
		耕地 Farmland	林地 Forest land	草地 Grassland	水域 Water area	建设用地 Built-up land	未利用土地 Unused land		
		面积占比/% Ratio	0	0.28	85.30	8.90	0.01	5.51	
2000	耕地	0	0	0	0	0	0	0	0
	林地	0.28	0	53.79	0	0.05	0	0	0.05
	草地	72.47	0	0	13434.57	31.98	1.73	295.77	329.47
	水域	8.15	0	0	1.98	1545.69	0	0.97	2.96
	建设用地	0	0	0	0	0	0.15	0	0
	未利用土地	19.09	0	0	2763.85	113.53	0.16	749.13	2877.54
	面积增加量/km ²	0	0	2765.83	145.56	1.89	296.74	3210.02	

2.2.2 植被覆盖空间变化格局

2000 年及 2015 年黄河源植被生长季 NDVI 空间分布如图 3 所示,黄河源区植被覆盖区 NDVI 总体空间分布格局为南高北低。NDVI 小于 0.15 的区域主要出现在黄河源中东部的沙地,除此之外,低值出现在北部布青山附近、西南边缘及东部高海拔山区。植被覆盖在 0.3—0.6 的区域约占黄河源面积的 72%,主导黄河源区现有 NDVI 分布格局。其中,黄河源区林地和草地植被类型的 NDVI 均值分别为 0.56 和 0.4,相比 2000 年,2015 年对应类型的 NDVI 增幅分别为 2.57% 及 0.95%。

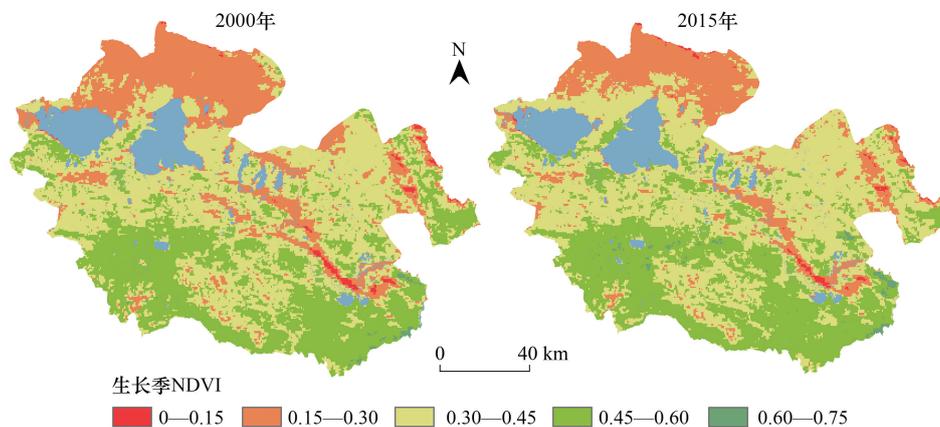


图 3 黄河源区植被覆盖区 2000 年和 2015 年生长季 NDVI (其中蓝色区域为水域)

Fig.3 Growing season NDVI in the Source Region of the Yellow River in 2000 and 2015 (The blue areas are water)

2.2.3 生境质量对土地利用及 NDVI 变化的响应分析

为了识别生境质量变化对土地利用变化响应的空间分异特征,本文建立 0.5km×0.5km 的单元网格,利用 ArcGIS 中的 GWR 工具以生境质量变化量为因变量,NDVI 变化量、土地利用变化量为自变量,计算分析土地利用类型转移区域因素间的相关关系。黄河源区未利用土地及草地覆盖面积 90% 以上,这两种土地利用类型能够代表区域土地利用变化,但经最小二乘模型计算发现两者具有共线性,最终选用 NDVI、草地变化面积作为自变量进行分析(图 4)。

从空间尺度上看,NDVI 及草地变化对生境质量影响的空间差异较大。NDVI 系数值整体上呈现西高东低,相对于草地面积变化,NDVI 对生境质量的正面影响显著,回归系数从 0.171 到 1.331,NDVI 变化在黄河源生境质量的变化占据重要影响。表明随着植被覆盖的增加,黄河源区的生境质量受到的正面影响程度逐渐加

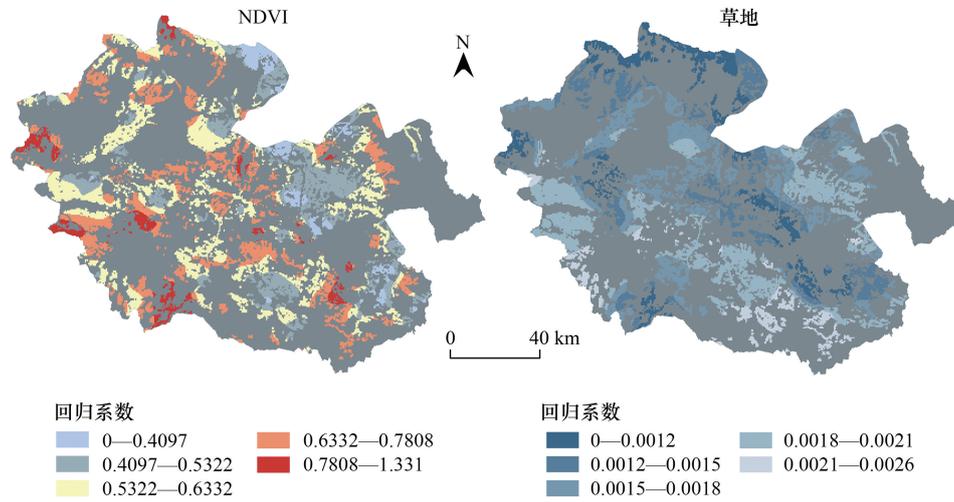


图 4 生境质量变化影响因子的 GWR 模型回归系数空间分布(灰色为背景)

Fig.4 Spatial distribution of the regression coefficients of influencing factors of habitat quality change in the GWR model (The gray area is the background)

深。草体变化与生境质量变化总体呈正相关关系,其回归系数呈由北向南增加的趋势。说明黄河源区草地面积的变化对生境质量的影响从北至南逐渐增强,从而有必要提高黄河源区南部草地面积以获得更高的生态效益。其中,黄河源区东南角的邹玛曲、勒那曲、尕拉曲附近,及岗纳格玛错附近区域的 NDVI 变化与生境质量变化相关性较强,生境质量显著增加。NDVI 变化与生境质量变化相关性比较小的地方出现在阿涌该马错以东的区域,该区域位于黄河源区核心保育区的东北端。草地变化与生境质量变化相关性低值出现在北缘布青山前及黄河乡的黄河流域周围,这与生境质量的相对较低值的范围一致。

3 讨论

本文基于土地利用并耦合 NDVI 所表征的植被覆盖情况,对黄河源区生境质量进行评价,研究结果具有合理性。本研究的生境质量结果与 Fan 等^[45]的基于 InVEST 模型计算的三江源生境质量研究结果、徐建英等^[46]的基于 InVEST 模型计算的黄河源区在内的生境质量相比较,具有基本一致的空间分布差异,呈现自北向南增加的趋势。

从空间分布上来看,由于本研究考虑 NDVI 为植被覆盖指示因子对 InVEST 的生境质量结果进行了改进,研究植被覆盖变化下的不同时期黄河源区生境质量,研究区 NDVI 变化主导了生境质量的空间分布格局。

从时间变化来看,2000 年和 2015 年间有 17% 的区域发生了土地利用变化,主要发生在未利用土地向草地的转移。相较于 2000 年,2015 年草地面积增加了 17.7%。建设用地、道路等生境胁迫因子未发生较大变化。2000 年及 2015 年生境质量的发生变化的主导因子是 NDVI 的变化。土地利用类型的转移对黄河源区的生境质量变化贡献相对较小,草地变化与生境变化的最大相关性仅为 0.003。相较于 2000 年,2005 年 NDVI 平均增幅为 3.18%,区域生境质量均值也从 0.28 提升为 0.32。

目前,对生境质量的评估从两个方面进行考虑,一方面是地类本身的生境质量差异,另一方面考虑人类活动等对生境质量的威胁。多数研究基于 InVEST 模型开展生境质量评估,评价人类干扰下的区域生境质量^[41]。若考虑不同地类本身带来的生境质量差异,有学者从不同植被类型有不同的生境适宜度角度开展研究,利用 NDVI 修正不同年份的生境适宜性,将此生境适宜度输入 InVEST 模型计算生境质量。此方法基于拉萨河流域 1990—2015 土地覆被变化相对较小,NDVI 变化较显著的区域背景,对不同植被类型各年份的生境适宜度进行修正,评估生境质量的结果与青藏高原总体暖湿的背景相符^[34]。有学者认为即使是同一种土地

利用类型但植被生长状况不同,可将植被生长状况的表征因子改进 InVEST 模型的生境质量评估结果^[33]。此外,有观点认为应综合考虑 NDVI 和植被净初级生产力(NPP)作为某一地类为物种提供服务的能力的表征^[31]。

模型参数的本地化,需要结合野外与长期的生态学研究。应用 InVEST 生境质量模型时,目前的研究主要依赖于专家知识来定义模型参数^[41],而参数取值的过程不可避免会深受专家主观性的影响。因而需要加强实地和长期的观测研究,改善生境质量模型参数化方案,包括对不同土地利用类型的生境适宜性、威胁影响特征和退地利用类型的威胁敏感性参数的优化^[47]。对不同的物种,模型参数应该设置的不同,因为不同物种对生境及植被覆盖的要求不同^[41]。在下一步研究中,将考虑如何综合不同的植被指标,评估生境质量。

对于 InVEST 生境质量模型评估的结果而言,由于目前生物多样性无法进行定量评估,很难验证^[24]。由于缺乏遥感对区域大尺度生境质量的定量和直接监测指标,目前只能基于威胁进行间接的生境质量评价^[48]。InVEST 生境质量模型中,认为土地利用类型的生境适宜性越高,受威胁的距离越远,生境质量越高。这种评估方法是对现实过程的简化,忽视了许多可变因素和未知过程,虽然不能很好地反映当地的生物多样性水平,但结合植被指数,最终的综合评估结果在一定程度上反映了区域生物多样性维持的能力和受干扰的程度。

4 结论

本研究基于 2000 年和 2015 年土地利用现状遥感监测数据,结合 NDVI 对黄河源区生境质量进行了空间评估,并揭示了生境质量变化与 NDVI 变化、土地利用变化之间的空间关系。通过与以专家为基础的方法和明确的空间方法相结合,本研究以高空间分辨率在黄河源范围内评估生境状况。主要结论如下:

(1) 相对于 2000 年,2015 年黄河源区生境质量总体提升 11.47%,研究区的南部及中部生境质量增加明显。然而北部的布青山、东北部高海拔区及中东部的黄河沿岸生境质量仍然较低。

(2) 2000 年与 2015 年地类间的转移主要表现为未利用土地向草地的转移,相较于 2000 年,2015 年草地面积增加了 17.7%。

(3) 研究区植被生长季 NDVI 总体增加,平均增幅达 3.18%。其中林地和草地植被类型的 NDVI 均值分别为 0.56 和 0.4,相比 2000 年,2015 年对应类型的 NDVI 增幅分别为 2.57% 及 0.95%。

(4) 空间上,生境质量和 NDVI 总体空间分布格局一致,为南高北低。时间上,NDVI 变化主导着区域生境质量的变化。草体面积变化与生境质量变化总体呈正相关关系,且自北向南两者相关性逐渐增强。

参考文献(References):

- [1] 刘孟竹,张红娟,王彦芳,裴宏伟. 基于土地利用的北方农牧交错带生境质量研究. 水土保持研究, 2021, 28(3): 156-162.
- [2] 张华,韩武宏,宋金岳,李明. 祁连山国家公园生境质量时空演变. 生态学报, 2021, 40(5): 1419-1430.
- [3] Sun X Y, Jiang Z, Liu F, Zhang D Z. Monitoring spatio-temporal dynamics of habitat quality in Nansihu Lake basin, eastern China, from 1980 to 2015. *Ecological Indicators*, 2019, 102: 716-723.
- [4] Luan W F, Li X. Rapid urbanization and its driving mechanism in the Pan-Third Pole region. *Science of the Total Environment*, 2021, 750: 141270.
- [5] Wu R D. China's ecosystems: focus on biodiversity. *Science*, 2016, 353(6300): 657-657.
- [6] 刘启兴,董国涛,景海涛,周俊利,党素珍,贾培培. 2000—2016 年黄河源区植被 NDVI 变化趋势及影响因素. 水土保持研究, 2019, 26(3): 86-92.
- [7] 习近平. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话. 求是, 2019, (20): 4-11.
- [8] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,张懿铤. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. 地理学报, 2012, 67(1): 3-12.
- [9] Hu Y R, Maskey S, Uhlenbrook S. Trends in temperature and rainfall extremes in the Yellow River source region, China. *Climatic Change*, 2012, 110(1/2): 403-429.
- [10] Liang S, Ge S, Wan L, Zhang J. Can climate change cause the Yellow River to dry up?. *Water Resources Research*, 2010, 46(2): W02505.
- [11] Pan B Z, Wang Z Y, Li Z W, Yu G A, Xu M Z, Zhao N, Brierley G. An exploratory analysis of benthic macroinvertebrates as indicators of the ecological status of the Upper Yellow and Yangtze Rivers. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(5): 871-882.

- [12] Liu J, Milne R I, Cadotte M W, Wu Z Y, Provan J, Zhu G F, Gao L M, Li D Z. Protect Third Pole's fragile ecosystem. *Science*, 2018, 362(6421): 1368-1368.
- [13] Jiang C, Zhang L B. Climate change and its impact on the eco-environment of the three-rivers headwater region on the Tibetan Plateau, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(10): 12057-12081.
- [14] Jiang C, Zhang L B. Effect of ecological restoration and climate change on ecosystems: a case study in the Three-Rivers Headwater Region, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(6): 382.
- [15] 徐田伟, 赵新全, 耿远月, 王循刚, 毛绍娟, 徐世晓. 黄河源区生态保护与草牧业发展关键技术及优化模式. *资源科学*, 2020, 42(3): 508-516.
- [16] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 黄麟, 曹巍, 徐新良, 葛劲松, 吴丹, 李志强, 巩国丽, 聂学敏, 贺添, 王立亚, 邴龙飞, 李其江, 陈卓奇, 张更权, 张良侠, 杨永顺, 杨帆, 周万福, 刘璐璐, 祁永刚, 赵国松, 李愈哲. 三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估. *地理学报*, 2016, 71(1): 3-20.
- [17] 神祥金, 张佳琦, 吕宪国. 青藏高原沼泽湿地植被 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应. *生态学报*, 2020, 40(18): 6259-6268.
- [18] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 黄麟, 曹巍, 刘璐璐. 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. *中国科学院院刊*, 2017, 32(1): 35-44.
- [19] Tang L P, Ke X L, Chen Y Y, Wang L Y, Zhou Q S, Zheng W W, Xiao B Y. Which impacts more seriously on natural habitat loss and degradation? Cropland expansion or urban expansion? *Land Degradation & Development*, 2021, 32(2): 946-964.
- [20] Foley J A, DeFries R, Asner G P, Barford C, Bonan G, Carpenter S R, Chapin F S, Coe M T, Daily G C, Gibbs H K, Helkowski J H, Holloway T, Howard E A, Kucharik C J, Monfreda C, Patz J A, Prentice I C, Ramankutty N, Snyder P K. Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [21] Zellweger F, Baltensweiler A, Ginzler C, Roth T, Braunisch V, Bugmann H, Bollmann K. Environmental predictors of species richness in forest landscapes: abiotic factors versus vegetation structure. *Journal of Biogeography*, 2016, 43(6): 1080-1090.
- [22] Rechsteiner C, Zellweger F, Gerber A, Breiner F T, Bollmann K. Remotely sensed forest habitat structures improve regional species conservation. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2017, 3(4): 247-258.
- [23] Wilsey C B, Lawler J J, Cimprich D A. Performance of habitat suitability models for the endangered black-capped vireo built with remotely-sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 119: 35-42.
- [24] Johnson M D. Measuring habitat quality: a review. *The Condor*, 2007, 109(3): 489-504.
- [25] Münsch T, Helbing F, Fartmann T. Habitat quality determines patch occupancy of two specialist Lepidoptera species in well-connected grasslands. *Journal of Insect Conservation*, 2019, 23(2): 247-258.
- [26] Marshall E, Valavi R, O'Connor L, Cadenhead N, Southwell D, Wintle B A, Kujala H. Quantifying the impact of vegetation-based metrics on species persistence when choosing offsets for habitat destruction. *Conservation Biology*, 2021, 35(2): 567-577.
- [27] Yuan W, Wu S Y, Hou S G, Xu Z W, Lu H Y. Normalized Difference Vegetation Index-based assessment of climate change impact on vegetation growth in the humid-arid transition zone in northern China during 1982-2013. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(15): 5583-5598.
- [28] 王军, 严有龙, 王金满, 应凌霄, 唐倩. 闽江流域生境质量时空演变特征与预测研究. *生态学报*, 2021, 41(14): 5837-5848.
- [29] Hou Y Z, Zhao W W, Liu Y X, Yang S Q, Hu X P, Cherubini F. Relationships of multiple landscape services and their influencing factors on the Qinghai-Tibet Plateau. *Landscape Ecology*, 2021, 36(7): 1987-2005.
- [30] 江伟康, 吴隽宇. 基于地区 GDP 和人口空间分布的粤港澳大湾区生境质量时空演变研究. *生态学报*, 2021, 41(5): 1747-1757.
- [31] 彭建, 徐飞雄. 不同格网尺度下的黄山市生境质量差异分析. *地球信息科学学报*, 2019, 21(6): 887-897.
- [32] 李胜鹏, 柳建玲, 林津, 范胜龙. 基于 1980—2018 年土地利用变化的福建省生境质量时空演变. *应用生态学报*, 2020, 31(12): 4080-4090.
- [33] Zhu C M, Zhang X L, Zhou M M, He S, Gan M Y, Yang L X, Wang K. Impacts of urbanization and landscape pattern on habitat quality using OLS and GWR models in Hangzhou, China. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106654.
- [34] 税燕萍, 卢慧婷, 王慧芳, 严岩, 吴钢. 基于土地覆盖和 NDVI 变化的拉萨河流域生境质量评估. *生态学报*, 2018, 38(24): 8946-8954.
- [35] Liu X F, Zhu X F, Pan Y Z, Zhu W Q, Zhang J S, Zhang D H. Thermal growing season and response of alpine grassland to climate variability across the Three-Rivers Headwater Region, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 220: 30-37.
- [36] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 徐新良, 张树文, 颜长珍, 李仁东, 吴世新, 胡云锋, 杜国明, 迟文峰, 潘涛, 宁静. 2010-2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征. *地理学报*, 2018, 73(5): 789-802.
- [37] Zhang G L, Zhang Y J, Dong J W, Xiao X M. Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(11): 4309-4314.
- [38] Terrado M, Sabater S, Acuña V. Identifying regions vulnerable to habitat degradation under future irrigation scenarios. *Environmental Research*

- Letters, 2016, 11(11): 114025.
- [39] Yang S Q, Zhao W W, Liu Y X, Wang S, Wang J, Zhai R J. Influence of land use change on the ecosystem service trade-offs in the ecological restoration area: dynamics and scenarios in the Yanhe watershed, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 556-566.
- [40] Huang Z D, Bai Y, Alatalo J M, Yang Z Q. Mapping biodiversity conservation priorities for protected areas: a case study in Xishuangbanna Tropical Area, China. *Biological Conservation*, 2020, 249: 108741.
- [41] Terrado M, Sabater S, Chaplin-Kramer B, Mandle L, Ziv G, Acuña V. Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning. *Science of the Total Environment*, 2016, 540: 63-70.
- [42] Polasky S, Nelson E, Pennington D, Johnson K A. The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: a case study in the State of Minnesota. *Environmental and Resource Economics*, 2011, 48(2): 219-242.
- [43] Rimal B, Sharma R, Kunwar R, Keshtkar H, Stork N E, Rijal S, Rahman S A, Baral H. Effects of land use and land cover change on ecosystem services in the Koshi River Basin, eastern Nepal. *Ecosystem Services*, 2019, 38: 100963.
- [44] Brunson C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity. *Geographical Analysis*, 1996, 28(4): 281-298.
- [45] Fan F F, Liu Y X, Chen J X, Dong J Q. Scenario-based ecological security patterns to indicate landscape sustainability: a case study on the Qinghai-Tibet Plateau. *Landscape Ecology*, 2021, 36(7): 2175-2188.
- [46] 徐建英, 陈吉星, 刘焱序, 樊斐斐, 魏建瑛. “一带一路”地区生态系统服务关系的时空分异与区域响应. *生态学报*, 2020, 40(10): 3258-3270.
- [47] Hack J, Molewijk D, Beissler M R. A conceptual approach to modeling the geospatial impact of Typical Urban threats on the Habitat Quality of River Corridors. *Remote Sensing*, 2020, 12(8): 1345.
- [48] Wang H N, Tang L N, Qiu Q Y, Chen H X. Assessing the impacts of urban expansion on habitat quality by combining the concepts of land use, landscape, and habitat in Two Urban Agglomerations in China. *Sustainability*, 2020, 12(11): 4346.