

DOI: 10.5846/stxb201806141331

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): - .

Shui Y P, Lu H T, Wang H F, Yan Y, Wu G. Assessment of habitat quality on the basis of land cover and NDVI changes in the Lhasa River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24): - .

基于土地覆盖和 NDVI 变化的拉萨河流域生境质量评估

税燕萍¹, 卢慧婷^{2,3}, 王慧芳^{2,3}, 严岩^{2,*}, 吴钢²

1 西藏自治区环境保护厅, 拉萨 850000

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

摘要: 气候变化和人类活动导致的土地覆盖和植被变化都会对生境质量产生影响。青藏高原是众多珍稀高原动植物的栖息地, 具有重要的生物多样性维持价值。拉萨河流域是青藏高原经济最发达、人口最密集的核心地区, 人类活动对生境质量带来的胁迫和压力持续增加。为揭示近些年来土地覆盖和植被变化对拉萨河流域生境质量的影响, 本文选择生长季 NDVI 作为植被变化的指示因子, 通过对不同植被类型各年份的生境适宜度进行修正, 利用 InVEST 模型评估了拉萨河流域 1990—2015 年的生境质量时空变化。研究结果表明, 1990—2015 年拉萨河流域土地覆盖变化整体相对较小, 其中人工表面和湿地面积增幅相对较大, 分别为 82.65% 和 32.40%; 土地覆盖变化的转移方向主要为稀疏草地转化为草原和草甸、耕地转化为人工表面以及冰川/积雪转化为荒地。植被变化方面, 1990—2000 年, 除流域中上游的裸岩、裸土地区和念青唐古拉山地区外, 流域 NDVI 整体有较显著上升; 而 2000 年以后略有下降。从生境质量的空间分布来看, 高质量生境主要分布在流域下游、念青唐古拉山南侧河谷地区以及拉萨河源头等地区, 低质量生境主要分布在拉萨市市辖区及周边、林周县县城及周边, 以及流域中上游的荒地等地区。从时间变化上来看, 1990—2000 年, 拉萨河流域整体生境质量指数从 0.51 上升到 0.57; 2010 年和 2015 年整体生境质量指数分别为 0.56 和 0.55, 较 2000 年略有下降。相比于土地覆盖变化, NDVI 对生境质量变化的影响更为显著。

关键词: 生境质量; 土地覆盖变化; InVEST 模型; NDVI; 青藏高原

Assessment of habitat quality on the basis of land cover and NDVI changes in the Lhasa River Basin

SHUI Yanping¹, LU Huiting^{2,3}, WANG Huifang^{2,3}, YAN Yan^{2,*}, WU Gang²

1 Environmental Protection Bureau of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Changes in land cover and vegetation driven by climate change and human activities can both affect habitat quality. The Tibetan Plateau has very high biodiversity and provides a habitat for numerous wildlife species. The Lhasa River Basin, located in the southern part of the Tibetan Plateau, is where human activities are very intense, increasing the threat and pressure on habitat quality. To analyze the effects of land cover and vegetation changes on the habitat quality of the Lhasa River Basin, we selected growing season (from June to October) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) as

基金项目: 西藏自治区科技计划项目 (Z2016C01G01108); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0502102)

收稿日期: 2018-06-14; 修订日期: 2018-12-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yyan@rcees.ac.cn

the index for vegetation condition to adjust the suitability index of different vegetation types and then assessed habitat quality change in the Lhasa River Basin from 1990 to 2015 by using the InVEST model. Results showed that the overall change in land cover in the Lhasa River Basin was relatively small, except for the sharp increase in artificial surface and wetland (increased by 82.65% and 32.40%, respectively). The main land-cover transfer directions were from sparse grassland to meadow and steppe, farmland to artificial surface, and ice/snow to barren land. Except for the barren land in the upper and middle regions of the basin as well as Nyenchen Tanglha Mountain, overall NDVI showed a significant increase from 1990 to 2000, and then a slight decrease thereafter. From the perspective of spatial distribution, the high habitat quality area was distributed throughout the valley of the Nyenchen Tanglha Mountain as well as downstream and headstream of the Lhasa River. The low habitat quality area was mainly located at the construction sites of Lhasa City and Linzhou County and their surrounding areas, along with the barren land located in the upper and middle regions of the basin. From the perspective of temporal changes, the average habitat quality index increased significantly from 0.51 in 1990 to 0.57 in 2000; the average habitat quality indices of 2010 and 2015 were 0.56 and 0.55, respectively, and they showed a slight decrease when compared with the value in 2000. When compared with land cover change, the NDVI change had more significant effects on habitat quality in the study region.

Key Words: habitat quality; land cover change; InVEST; NDVI; Tibetan Plateau

以城市和农田扩张为代表的土地利用/覆盖方式的改变所造成的生境破碎、退化和丧失已被认为是生物多样性丧失的最大驱动力^[1-3]。近年来已有许多学者利用景观格局指标、HSI 模型^[4-5]、IDRISI 模型^[6-7]、InVEST 模型^[8-11]等不同方法评估了土地利用/覆盖变化对生物多样性和生境质量的影响。然而,已有研究中较少考虑植被状况对生境质量的影响。诸多研究表明,植被状况与生境适宜性具有显著相关关系,如朱冰润^[12]通过主成分分析表明白琵鹭种群繁殖生境选择与植被高度、密度成正相关;张佰莲等^[13]通过 Logistic 回归分析表明生境类型对白头鹤活动分布的影响作用最大,其次是植被指数。目前,已有少数研究将 NDVI 作为评价生境质量的指标之一^[14-15],或对 NDVI 与生境质量变化的关系进行研究^[16]。

拉萨河流域位于雅鲁藏布江中游,拥有丰富的高原动植物资源和典型的高寒湿地生态系统。其中,流域内拥有国家 I 级重点保护动物胡兀鹫、黑颈鹤、金雕等 7 种,II 级重点保护动物彩鹳、黑鸢、高山兀鹫、雪豹等共 22 种。流域内拥有包括雅鲁藏布江中游河谷黑颈鹤国家级自然保护区、麦迪卡湿地国家级自然保护区、拉鲁湿地国家级自然保护区等多个国家级和地方级自然保护区^[17]。同时,拉萨河流域也是西藏自治区经济最发达、人口最密集的核心地区;拉萨河畔的拉萨市,是自治区的首府,也是自治区的政治、经济、文化及宗教中心。在青藏高原气候变化的背景下^[18-20],随着拉萨河流域城镇化和旅游业的快速发展,流域生物多样性保护所面临的压力也逐渐加大。

本研究在分析拉萨河流域土地覆盖和 NDVI 变化的基础上,选择生长季(6—10 月)NDVI 作为植被状况的指示因子,对 InVEST 生境质量模型中各植被类型的生境适宜度进行修正,评估了拉萨河流域 1990—2015 年生境质量变化,并对生境质量变化及其原因进行了分析和讨论,以期为拉萨河流域的生物多样性保护和生态规划提供理论支持。

1 研究区概况

拉萨河发为雅鲁藏布江的一级支流,流域范围为 29°20′—31°15′N, 90°05′—93°20′E(图 1),面积约为 3.26 万 km²。拉萨河流域平均海拔高程约 4500 m,年平均气温为 -7.1—9.2℃,年均降水量为 340—700 mm,且降水年内分布极不均匀,约 90% 的降水集中在 6—9 月。流域内的生态系统类型以高山草甸和高寒草原为主^[21]。

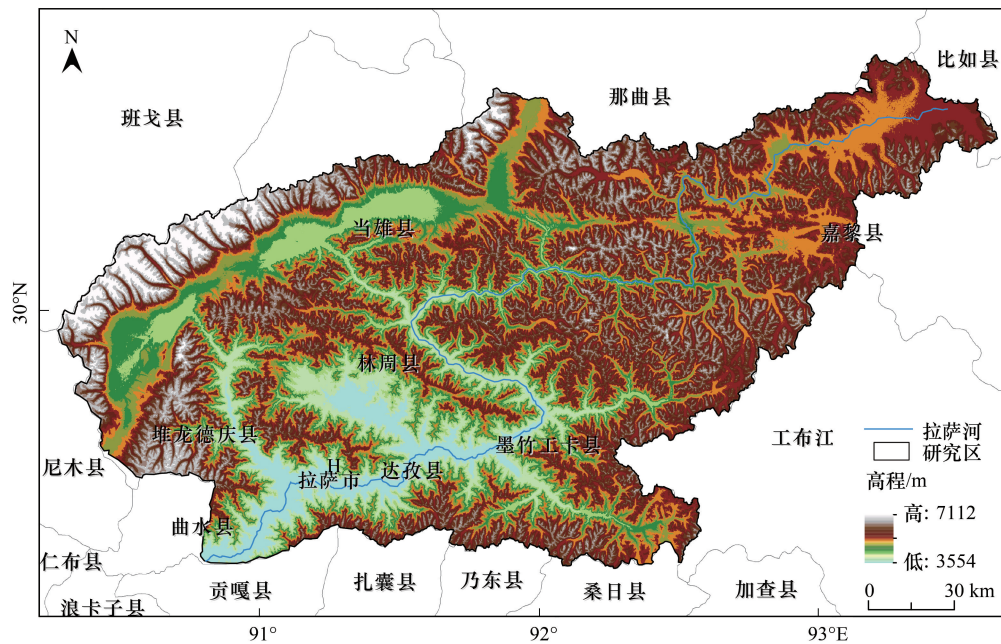


图 1 拉萨河流域高程图
Fig.1 Elevation map of Lhasa River Basin

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

1990 年、2000 年、2010 年和 2015 年 4 期土地覆盖数据(30 m)和 NDVI 月值数据(250 m)来自中国科学院遥感与数字地球研究所。DEM 数据(30 m)来自中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)。结合拉萨河流域实际情况,建立土地覆盖类型二级分类体系,包括 10 个一级类别和 28 个二级类别,如表 1 所示。

表 1 土地覆盖分类体系
Table 1 Land cover classification system

一级分类 class 1	二级分类 class 2	一级分类 lass 1	二级分类 Class 2
林地 Forest	常绿阔叶林	荒地 Barren land	裸岩
	落叶阔叶林		裸土
	常绿针叶林		沙漠
	稀疏林		盐碱地
	乔木园地	人工表面 Artificial surface	建设用地
	乔木绿地		交通用地
灌丛 Shrub	常绿阔叶灌丛		工矿用地
	落叶阔叶灌丛	湿地 Wetland	乔木湿地
草甸 Meadow	高寒草甸		灌木湿地
草原 Steppe	温性草原		草本湿地
	高寒草原		湖泊
	草本绿地		水库
稀疏草地 Sparse grassland	稀疏草地		河流
耕地 Farmland	旱地	冰川/积雪 Ice/snow	冰川/永久积雪

2.2 生境质量评估方法

InVEST 模型中的生境质量模块 (Habitat Quality Model) 将土地覆盖类型与胁迫因子建立联系, 根据不同生境对胁迫因子的敏感程度, 通过计算生境质量指数来评估不同情景下的生境质量分布和退化情况^[11]。Terrado 等^[22]将该模型中生境质量模块的计算结果与生物多样性的观测结果进行对比, 表明二者之间呈显著的相关关系, 从而证明了该方法的可靠性。

InVEST 模型中每个栅格的生境质量由两个因素决定: 1) 自身作为生境的适宜度, 取值范围介于 0—1 之间, 1 表示该生境具有最高适宜度, 0 代表非生境; 2) 生境退化度, 其计算公式如下:

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

式中, Q_{xj} 为土地覆盖类型 j 中栅格 x 的生境质量指数; H_j 为土地覆盖类型 j 中的生境适宜度; D_{xj}^z 为土地覆盖类型 j 中栅格 x 的生境退化度; z 为归一化常量, 通常取值 2.5; k 为半饱和常数。生境退化度 D_{xj}^z 的计算公式如下:

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

式中, r 为生境的胁迫因子; y 为胁迫因子栅格; w_r 为胁迫因子 r 的权重; r_y 为栅格 y 的胁迫强度; i_{rxy} 为 r_y 对生境栅格 x 的胁迫水平; β_x 为栅格 x 的可达性水平; S_{jr} 为生境类型 j 对胁迫因子 r 的敏感度。 i_{rxy} 的计算公式如下:

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{r \max}} \right) \text{ if linear}$$

$$i_{rxy} = \exp \left(- \left(\frac{2.99}{d_{r \max}} \right) d_{xy} \right) \text{ if exponential}$$

式中, d_{xy} 为栅格 x 与栅格 y 之间的直线距离; $d_{r \max}$ 为胁迫因子 r 的最大影响距离。

模型中涉及的主要参数包括土地覆盖、胁迫因子图层、各胁迫因子的最大影响距离和距离衰减函数、各胁迫因子的权重、不同土地覆盖类型的生境适宜度及其对胁迫因子的敏感度。其中, 各胁迫因子的最大影响距离、距离衰减函数和权重, 以及各生境类型对胁迫因子的敏感度参考相关文献^[9-11]并根据拉萨河流域实际情况以及专家的建议进行赋值, 如表 2、表 3 所示。

表 2 胁迫因子属性表

Table 2 Threat factor properties

胁迫因子 Threat	最大影响距离/km ² Max-distance	权重 Weight	距离衰减函数 Decay
耕地 Farmland	3	0.2	线性
建设用地 Settlement	5	0.2	线性
工矿用地 Mining/industrial field	5	0.3	线性
交通用地 Transportation land	10	0.3	指数

各土地覆盖类型的生境适宜度在参考相关文献^[9-11]的基础上, 利用生长季 NDVI 数据进行修正, 得到各个年份的生境适宜度 (表 3), 公式如下:

$$H_i = \min(\text{HABITAT}_i \times \text{NDVI}_i \times 2, 1)$$

式中, H_i 为第 i 种土地覆盖类型修正后的生境适宜度, HABITAT_i 为第 i 种土地覆盖类型的初始生境适宜度, NDVI_i 为第 i 种土地覆盖类型当年的生长季 NDVI 均值。

表 3 不同土地覆盖类型的生境适宜度及其对胁迫因子的敏感度
Table 3 Habitat score of different land cover types and their sensitivity to each threat

土地覆盖类型 Land cover type	生境适宜度 Habitat suitability index				生境类型对胁迫因子的敏感度 Sensitivity of habitat types to each threat			
	1990	2000	2010	2015	耕地 Farmland	建设用地 Settlement	工矿用地 Mining/industrial field	交通用地 Transportation land
林地 Forest	0.68	0.95	0.84	0.9	0.8	0.9	0.8	0.8
灌木 Shrub	0.97	1	1	1	0.5	0.5	0.6	0.5
草甸 Meadow	0.79	0.96	0.93	0.89	0.3	0.3	0.5	0.6
草原 Steppe	0.56	0.69	0.68	0.65	0.3	0.3	0.5	0.6
稀疏草地 Sparse grassland	0.29	0.35	0.36	0.34	0.3	0.3	0.5	0.5
耕地 Farmland	0.25	0.32	0.27	0.27	0.3	0.3	0.5	0.2
荒地 Barren land	0	0	0	0	0	0	0	0
人工表面 Artificial surface	0	0	0	0	0	0	0	0
湿地 Wetland	1	1	1	1	0.7	0.9	0.9	0.6
冰川/积雪 Ice/snow	1	1	1	1	0.6	0.8	0.8	0.6

3 结果与分析

3.1 土地覆盖变化

1990—2015 年拉萨河流域土地覆盖的主要变化是人工表面和湿地面积的快速扩张(图 2),其增幅分别为 82.65%和 32.40%。此外,草甸和草原面积分别增加了 120.09 km²和 88.43 km²,占流域总面积的 0.36%和 0.27%;稀疏草地和冰川/积雪面积分别减少了 249.63 km²和 86.31 km²,占流域总面积的 0.75%和 0.26%;其他土地覆盖类型变化较小。

根据土地覆盖转移矩阵(表 4),1990—2015 年拉萨河流域土地覆盖的转移方向主要为稀疏草地转化为草原和草甸、耕地转化为人工表面以及冰川/积雪转化为荒地。其中约 140 km²的稀疏草地转化为草原,约

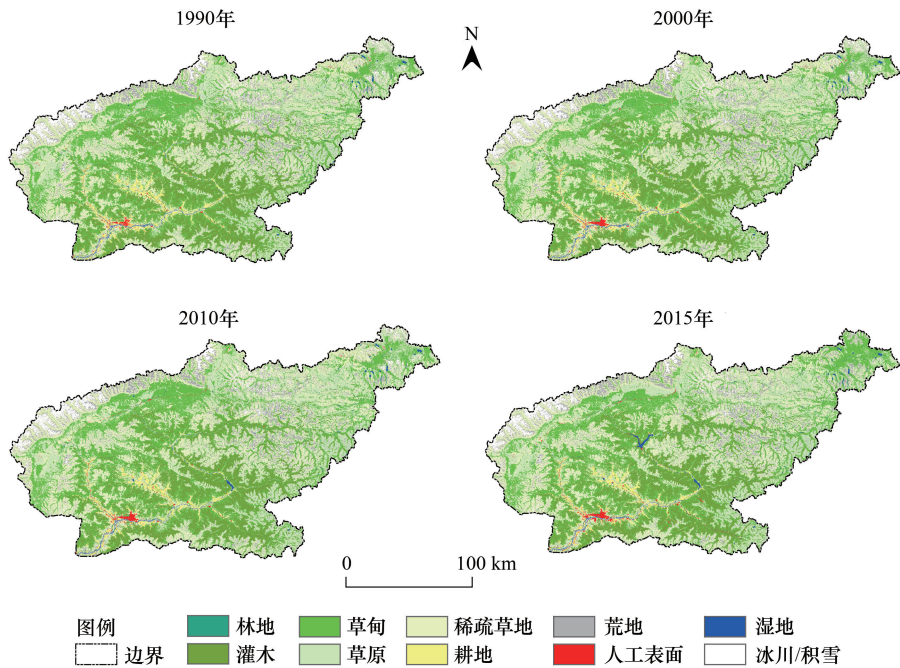


图 2 1990—2015 年拉萨河流域土地覆盖分布及其变化
Fig.2 Land cover distribution and changes of Lhasa River Basin from 1990 to 2015

326 km²的稀疏草地转化为草甸,约 36 km²的耕地转化为人工表面,约 76 km²的冰川/积雪转化为荒地。此外,草甸和草原、灌木和草甸之间的转化基本相互抵消。

表 4 1990—2015 年拉萨河流域土地覆盖转移矩阵/km²
Table 4 Land cover transfer matrix in Lhasa River Basin from 1990 to 2015

1990 年	2015 年									
	林地 Forest	灌木 Shrub	草甸 Meadow	草原 Steppe	稀疏草地 Sparse grassland	耕地 Farmland	荒地 Barren land	人工表面 Artificial surface	湿地 Wetland	冰川/积雪 Ice/Snow
林地 Forest	—	0.07	0.04	0.04	0.05	0.13	0.02	0.44	0.09	0
灌木 Shrub	0.07	—	223.67	69.25	18.37	5.29	0.66	7.36	6.81	0
草甸 Meadow	0.07	228.68	—	458.38	50.47	15.43	2.39	11.36	14.80	0.22
草原 Steppe	0.08	67.14	474.17	—	212.93	17.24	20.89	16.86	22.69	1.74
稀疏草地 Sparse grassland	0.05	19.78	140.50	325.57	—	5.79	115.44	9.75	17.59	18.07
耕地 Farmland	0.83	3.41	8.53	9.86	4.76	—	0.31	36.00	11.48	0
荒地 Barren land	0.03	0.82	26.99	36.73	110.19	0.29	—	2.81	4.46	17.82
人工表面 Artificial surface	0.44	0.20	6.70	1.71	0.52	0.92	0.06	—	0.26	0
湿地 Wetland	0.07	1.65	7.16	3.93	4.53	0.98	2.50	0.82	—	0.02
冰川/积雪 Ice/Snow	0	0	17.87	10.90	30.37	0.00	75.84	0	0.03	—

3.2 NDVI 变化

研究表明,受气候变化影响,青藏高原总体上更加暖湿,有利于植被生长,但不同地区空间差异性也较大^[23-25]。1990—2015 年拉萨河流域植被生长季(6—10 月)NDVI 变化如图 3 所示。1990—2000 年,除流域中上游的裸岩、裸土地区和念青唐古拉山地区外,拉萨河流域生境质量整体有较大提升;2000 年以后整体略有下降,尤其是拉萨河的源头——麦地卡湿地及其周边地区的 NDVI 显著下降。

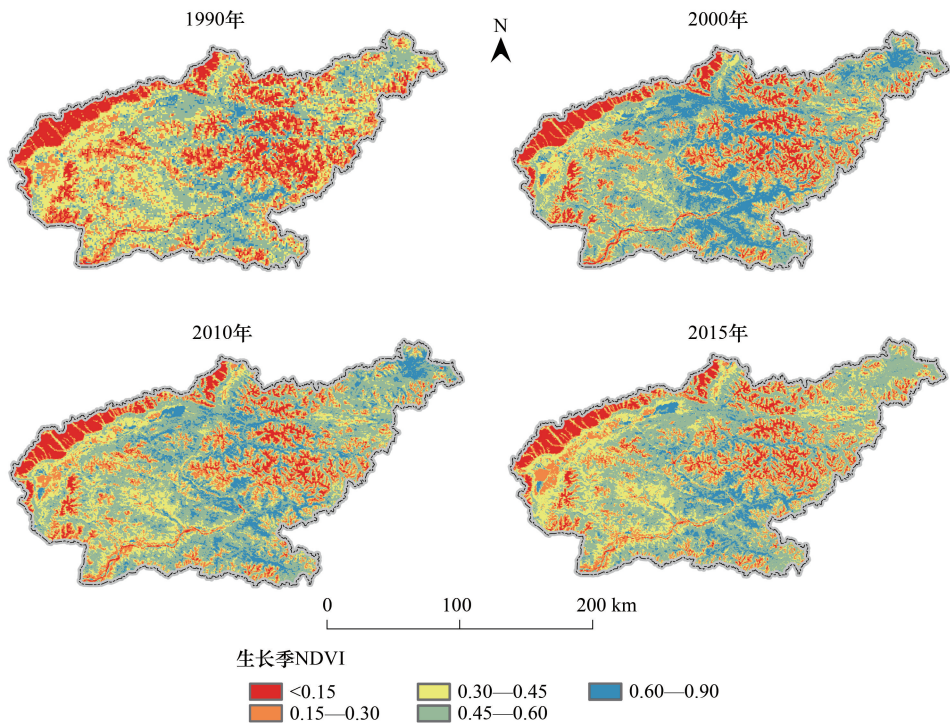


图 3 1990—2015 年拉萨河流域植被生长季 NDVI 变化
Fig.3 Growing season NDVI of Lhasa River Basin from 1990 to 2015

根据各植被类型生长季(6—10月)NDVI均值统计,1990—2000年间,拉萨河流域林地、灌木、草甸和草原等植被类型的NDVI显著上升,增幅分别为40.20%、17.47%、22.12%、22.75%;2000—2010年间,林地、灌木和草甸NDVI分别减少10.97%、3.92%、3.52%,而稀疏草地增加了5.67%;2010—2015年间,林地NDVI增加了7.10%,而稀疏草地、草原和草甸分别减少了6.66%、5.16%和4.11%。总的来看,1990—2000年各植被生长季NDVI显著增长,平均增幅达24.69%,而2000年后草甸和草原的生长季NDVI逐渐降低,呈退化趋势。

3.3 生境质量变化

InVEST模型采用生境质量指数来表征生境质量状况,其范围为0—1,值越大表明生境质量越高。通常,土地利用强度的增加会引起胁迫源地的增加和强度的增强,从而使其胁迫范围内的生境质量退化^[10]。根据模型计算结果(图4),流域下游和念青唐古拉山南侧河谷地区以及拉萨河源头地区生境质量较高,以灌木、草甸和草原等土地覆盖类型为主;拉萨市市辖区和林周县县城周边,以及流域中上游的荒地等地区生境质量较低;1990—2015年间生境质量空间格局基本未发生变化。从时间变化来看,NDVI对生境质量变化影响较为显著。其中,1990—2000年,由于NDVI的上升,拉萨河流域生境质量也显著提高,整体生境质量指数从0.51上升到0.57;2010年和2015年整体生境质量指数分别为0.56和0.55,较2000年略有下降。

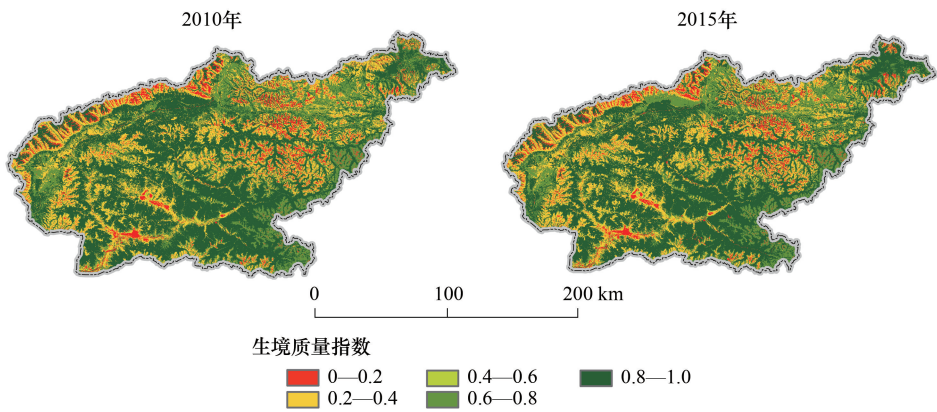


图4 1990—2015年拉萨河流域生境质量空间分布及其变化

Fig.4 Spatial distribution of habitat quality in Lhasa River Basin from 1990 to 2015

根据生境质量评估结果,将拉萨河流域生境质量划分为高、较高、中等、较低和低共5个级别,对每个级别的面积和占流域总面积的百分比进行统计,如表5所示。1990—2015年高生境质量的比例明显增多,从20.59%增加到45.14%,面积增加了8003.30 km²;中等生境质量的比例显著减少,从23.47%减少到0.34%,面积减少了7540.38 km²;其他等级的生境面积变化相对较小。

表5 拉萨河流域不同年份各等级生境质量比例

评估等级 Valuation level	分值区间 Value interval	1990 年		2000 年		2010 年		2015 年	
		面积	%	面积	%	面积	%	面积	%
		Area/km ²	%	Area/km ²	%	Area/km ²	%	Area/km ²	%
低 Low	0—0.2	2334.16	7.16	2226.58	6.83	2295.04	7.04	2347.2	7.20
较低 Relatively low	0.2—0.4	7879.42	24.17	7996.78	24.53	7931.58	24.33	7700.12	23.62
中等 Medium	0.4—0.6	7651.22	23.47	61.94	0.19	65.2	0.20	110.84	0.34
较高 Relatively high	0.6—0.8	8022.86	24.61	7654.48	23.48	7638.18	23.43	7703.38	23.63
高 High	0.8—1.0	6712.34	20.59	14660.22	44.97	14666.74	44.99	14715.64	45.14

4 讨论与结论

尽管以建设用地为主的人工表面和湿地等土地覆盖类型的面积变化速度较快,但是整体而言 1990—

2015 年拉萨河流域土地覆盖景观格局变化相对较小,建设用地、工矿用地、交通用地等生境胁迫因子对生境质量的影响也未发生较大变化,主要集中分布在拉萨市市辖区、林周县县城及周边地区(图 4)。相比于土地覆盖变化,在气候变化和人类活动的共同驱动下,研究期间内拉萨河流域的植被变化更为显著。由于本研究将 NDVI 作为修正因子对不同植被类型不同时期的生境适宜度进行了修正以期反应植被状况对生境质量的影响,因此研究区不同植被类型生境适宜度的变化是其生境质量变化的主要原因。以生境适宜度变化较为显著的林地和草甸为例,1990—2000 年林地和草甸的生境适宜度分别从 0.68 和 0.79 增加到了 0.95 和 0.96,2000—2015 年略有下降,分别下降至 0.9 和 0.89,表明在未受到胁迫因子干扰的情况下,1990—2000 年林地和草甸的生境质量有较大提升,而 2000 年以后略有降低。

本研究根据土地覆盖变化,并选择 NDVI 数据作为植被状况的指示因子,通过对不同植被类型各年份的生境适宜度进行修正,评估了 1990—2015 年拉萨河流域生境质量的时空变化,主要结论如下:研究期间内拉萨河流域土地覆盖变化相对较小,而代表植被状况的 NDVI 变化较显著;从生境质量的空间分布来看,高质量生境主要分布在流域下游、念青唐古拉山南侧河谷地区以及拉萨河源头等地区,以灌木、草甸和草原等土地覆盖类型为主;低质量生境主要分布在拉萨市市辖区、林周县县城及周边,以及流域中上游的荒地等地区;1990—2015 年间生境质量空间格局基本未发生变化;从时间变化上来看,NDVI 对生境质量变化影响较为显著。1990—2000 年,由于 NDVI 的显著上升,各植被类型的生境适宜度相应增加,拉萨河流域生境质量也有较大提高,整体生境质量指数从 0.51 上升到 0.57;2010 年和 2015 年整体生境质量指数分别为 0.56 和 0.55,相比 2000 年略有下降。

位于青藏高原雅鲁藏布江中游的拉萨河流域具有重要的生物多样性保护意义,然而随着气候变化和城镇扩张、旅游业和矿产资源开发等人类活动的加剧,流域生境质量面临的胁迫和压力还将继续增大。根据本研究结果并结合拉萨河流域的实际情况,针对流域的生态规划和生物多样性保护提出以下建议:关注流域气候和植被变化,加强对生态系统的遥感和定位监测以及野外调查;合理规划布局城镇建设用地、道路、农田等,并加强对自然保护区的规划和管理,最大限度减少社会经济发展对生境的胁迫;加强对植被的保护与管理,对植被退化严重的地区开展退化机制和原因的研究,采取针对性措施进行保护和恢复;对流域内的矿产资源开发活动实施严格的开采许可和监督管理制度,并对废弃矿地进行生态修复。

参考文献(References):

- [1] Sala O E, Chapin III F S, Armesto J J, Berlow E, Bloomfield J, Dirzo R, Huber-Sanwald E, Huenneke L F, Jackson R B, Kinzig A, Leemans R, Lodge D M, Mooney H A, Oesterheld M, Poff N L, Sykes M T, Walker B H, Walker M, Wall D H. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 2000, 287(5459): 1770-1774.
- [2] Falcucci A, Maiorano L, Boitani L. Changes in land-use/land-cover patterns in Italy and their implications for biodiversity conservation. *Landscape Ecology*, 2007, 22(4): 617-631.
- [3] 吴建国, 吕佳佳. 土地利用变化对生物多样性的影响. *生态环境学报*, 2008, 17(3): 1276-1281.
- [4] 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. *湿地科学*, 2009, 7(3): 197-201.
- [5] 金龙如, 孙克萍, 贺红土, 周宇飞. 生境适宜度指数模型研究进展. *生态学杂志*, 2008, 27(5): 841-846.
- [6] Shvarts E A, Pushkaryov S V, Krever V G, Ostrovsky M A. Geography of mammal diversity and searching for ways to predict global changes in biodiversity. *Journal of Biogeography*, 1995, 22(4/5): 907-914.
- [7] 刘春艳, 朱康文, 刘吉平. 三峡库区重庆段土地覆盖和生物多样性功能演化及预测. *农业工程学报*, 2017, 33(19): 258-267.
- [8] Leh M D K, Matlock M D, Cummings E C, Nalley L L. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 165: 6-18.
- [9] 刘智方, 唐立娜, 邱全毅, 肖黎姗, 许通, 杨丽. 基于土地利用变化的福建省生境质量时空变化研究. *生态学报*, 2017, 37(13): 4538-4548.
- [10] 包玉斌, 刘康, 李婷, 胡胜. 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. *干旱区研究*, 2015, 32(3): 622-629.
- [11] 陈妍, 乔飞, 江磊. 基于 InVEST 模型的土地利用格局变化对区域尺度生境质量的评估研究——以北京为例. *北京大学学报: 自然科学*

版, 2016, 52(3): 553-562.

- [12] 朱冰润. 基于 NDVI 技术的白琵鹭繁殖期生境选择研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [13] 张佰莲, 王健, 刘群秀, 田秀华. 黑龙江大沾河自然保护区白头鹤生境质量评价. 东北林业大学学报, 2011, 39(5): 92-94.
- [14] 张月. 黑龙江干流沿江区域湿地水禽生境质量变化遥感评估[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2017.
- [15] 郎学东, 彭明春, 王崇云, 李永杰, 段禾祥, 李晓华, 江望高. 南滚河流域亚洲象生境质量现状评价. 云南大学学报: 自然科学版, 2008, 30(4): 415-423.
- [16] 刘雪华, 靳强. 秦岭中段南坡 NDVI 格局与生境质量变化研究. 林业调查规划, 2008, 33(3): 1-8.
- [17] 李士成, 李少伟, 希娜·吉, 次仁罗布, 央珍, 邓雨杰, 孙维. 西藏自然保护区现状分析及其空间布局评估. 生态学报, 2018, 38(7): 2557-2565.
- [18] Liu X D, Chen B D. Climatic warming in the Tibetan plateau during recent decades. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(14): 1729-1742.
- [19] Yan Y, Zhang Y J, Shan P, Zhao C L, Wang C X, Deng H B. Snow cover dynamics in and around the Shangri-La County, southeast margin of the Tibetan Plateau, 1974-2012: the influence of climate change and local tourism activities. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2015, 22(2): 156-164.
- [20] Qiu J. China: the third pole. *Nature*, 2008, 454(7203): 393-396.
- [21] 方广玲, 香宝, 赵卫, 谢强, 刁兆岩, 迟文峰. 基于 GIS 和 RUSLE 的拉萨河流域土壤侵蚀研究. 水土保持学报, 2015, 29(3): 6-12.
- [22] 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.
- [23] 王青霞, 吕世华, 鲍艳, 马迪, 李瑞青. 青藏高原不同时间尺度植被变化特征及其与气候因子的关系分析. 高原气象, 2014, 33(2): 301-312.
- [24] 刘振元, 张杰, 陈立. 青藏高原植被指数最新变化特征及其与气候因子的关系. 气候与环境研究, 2017, 22(3): 289-300.
- [25] 纪迪. 青藏高原气候变化及其 NDVI 的响应[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.