

黑河上游植被覆盖时空变化特征及其未来趋势

雷声剑, 张福平, 燕玉超, 刘筱

(陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062)

摘要: [目的] 分析黑河上游近 14 a 来植被覆盖时空变化特征及其未来趋势, 为区域生态保护提供决策参考。[方法] 基于 2001—2014 年 MODIS-NDVI 数据, 采用线性趋势和 Hurst 指数等数理方法进行定量分析。[结果] 研究区植被覆盖整体处于缓慢增加趋势, 年际变化呈现“波动—改善”趋势, 空间分布呈现自东南向西北逐渐降低的分布特征, 且具有明显经向地带性; 植被覆盖改善区和退化区的面积分别占 47.74% 和 21.81%, 其中改善区主要分布在研究区中部和西北部, 以高寒草原改善为主, 退化区主要位于研究区东南部, 以高寒草甸退化为主; 未来的 NDVI 将向着改善的方向发展。[结论] 近 14 a 来黑河上游植被覆盖良好, 且未来向着改善趋势发展, 但对祁连、民乐和山丹县境内的持续退化区需要采取保护措施。

关键词: 黑河上游; NDVI; 时空变化

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)03-0159-06

中图分类号: Q948.1

文献参数: 雷声剑, 张福平, 燕玉超, 等. 黑河上游植被覆盖时空变化特征及其未来趋势[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3):159-164. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.03.029

Spatial-temporal Changes and Future Trends of Vegetation Cover in Upper Reaches of Heihe River

LEI Shengjian, ZHANG Fuping, YAN Yuchao, LIU Xiao

(College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China)

Abstract: [Objective] To study the spatial-temporal changes of vegetation cover in the past 14 years and its future trend in the upper reaches of the Heihe river in order to provide a support for the regional ecological protection. [Methods] Based on the MODSI-NDVI data from 2001 to 2014, we did the quantitative analysis by linear trend analysis and Hurst index. [Results] The vegetation cover in the study area had been improving slowly, showing a “volatility-improvement” trend on year scale, the mean NDVI decreased gradually from southeast to northwest and shows a meridional zonality. The area with increased vegetation cover accounted for 47.74%, whereas the area with deceased vegetation cover accounted for 21.81%. The improved areas are mainly distributed in the central and northwestern parts of study area with alpine steppe significantly improved. The degraded areas are mainly located in the southeast of study area with alpine meadow significantly degenerated. The vegetation cover in the upper reaches of the Heihe river will increase in the future. [Conclusion] The vegetation cover in the upper reaches of the Heihe river is high and the future trends of the vegetation cover is toward improving, but we need to take measures to protect areas still degenerating in Qilian, Minle and Shandan County.

Keywords: upper reaches of the Heihe river; NDVI; spatial-temporal changes

植被是陆地生态系统的主体, 是土地覆盖最主要的类型, 其覆盖变化是反映区域性环境状况的重要指

标之一, 对全球能量循环和物质的生物化学循环具有重要的影响^[1]。而作为表征地表覆盖特征的重要参

收稿日期: 2015-03-26

修回日期: 2015-06-15

资助项目: 国家科技支撑项目“敦煌生态修复关键技术研究示范”(2012BAC08B07); 陕西师范大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(GK2011101002)

第一作者: 雷声剑(1989—), 男(汉族), 湖北省襄阳市人, 硕士研究生, 研究方向为资源环境遥感与 GIS 应用。E-mail: laolei220@126.com。

通讯作者: 张福平(1973—), 男(汉族), 山西省吕梁县人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事资源环境遥感与 GIS 应用研究。E-mail: laolei220@126.com。

数,植被指数蕴含着丰富的地表结构和功能信息^[2]。常用的植被指数有归一化植被指数,增强植被指数,比值植被指数,土壤调节指数等,其中,归一化植被指数与植被覆盖度、生长状况、生物量和光合作用强度等密切相关^[3-4],能够在时空尺度上反映研究区的植被覆盖情况^[5-8]。运用植被指数研究植被覆盖变化,可快速监测地区生态系统稳定性,为减缓退化过程甚至恢复原有自然环境提供科学依据和决策服务^[9-10]。

西北地区气候干旱,生态环境脆弱,是中国气候变化的敏感地带,地表植被覆盖变化的研究对于该地区农业生产,环境保护和生态建设具有重要的意义^[11-12]。而黑河作为西北干旱区第二大内陆河,其植被覆盖变化对当地生态环境影响重大。刘宪锋等^[13]运用 R/S 方法研究三江源区植被覆盖变化,得出长江源区和黄河源区北部的植被未来将由改善转为退化,而澜沧江源区的植被未来将由退化转为改善;张翀等^[14]探讨了黄土高原地区植被覆盖变化的时空差异及未来趋势,结果表明,未来的地表植被覆盖改善区域有向北部扩展的趋势,退化区有向南部扩展的趋势;李芳等^[15]探讨了张掖地区植被覆盖变化,并对其进行预测,得出近 10 a 来植被覆盖呈增加趋势,旱地和人工草地未来将会继续增加;李旭谱等^[16]通过 NDVI(normalized difference vegetation index)变化度模型对黑河流域 1999—2010 年植被覆盖变化进行分析,结果表明研究区植被覆盖呈逐步改善趋势,尤其是中游地区改善明显,但流域植被覆盖水平整体较差。赵铭石等^[17]从时间和空间尺度上,对黑河流域 25 a 来植被覆盖变化进行研究,表明在年际尺度上 NDVI 的变化与温度的变化关系更为密切,黑河中游年均 NDVI 对温度的响应明显高于上、下游。

综上所述,运用 R/S 分析法对西北地区植被未来变化的研究以取得一定成果,因此将其用于研究黑河上游植被未来变化有一定依据,加上黑河流域关于植被覆盖的研究主要是集中在植被的时空变化特征,以及植被与气候因子相关性的探讨上,而关于黑河上游地区植被变化的未来趋势尚不明确。基于此,本文利用 MODIS-NDVI 数据,运用最大值合成法(maximum value composites, MVC)、线性趋势分析、Hurst 指数分析方法,研究黑河上游近 14 a 来植被覆盖的时空变化特征,并对植被未来的变化趋势进行预测,以期为区域可持续发展,生态环境保护提供一些理论依据。

1 研究区概况

黑河流域是中国西北干旱区第 2 大内陆河流,发

源于祁连山脉,经河西走廊,最后注入内蒙古北部的额济纳旗。本文以黑河上游为研究区,地理位置位于 37°30′—39°41′N,97°28′—101°16′E,包括祁连县和肃南县的大部分,民乐县和山丹县的小部分,总面积约为 2.85×10^4 km²,海拔介于 1 618~5 544 m。研究区气候阴湿寒冷,为典型的大陆性高寒半干旱气候,多年平均气温 -5~4 ℃,年降水量 250~500 mm,年蒸发量 700 mm 左右。由于高寒气候的影响,黑河上游植被类型主要以高寒草甸、高寒草原为主,另有部分灌丛、针叶林。土壤类型主要包括高山寒漠土、高山草甸土、亚高山草甸土、高山灌丛草甸土、亚高山灌丛草甸土、高山草原土、森林灰褐土、山地灰钙土等。黑河上游社会经济发展水平较低,主要以畜牧业为主,人口 8.61 万人,牲畜 250 万头,以细毛羊、藏羊和牦牛为主,是黑河流域重要的畜牧业基地^[18]。

2 数据和方法

2.1 数据来源与处理

研究采用的遥感数据为 2001 年 1 月到 2014 年 12 月的 Terra/Modis NDVI 数据,数据来源于互联网(<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>)下载的 MODIS 植被指数产品 MOD13 Q1,该数据为 250 m 分辨率的 16 d 合成植被指数产品。植被类型图来自寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>)的 1:100 万黑河流域植被类型图。

利用 MRT(modis reprojection tools)工具、ENVI 软件,对影像进行拼接、重投影、裁剪等一系列预处理操作。为了消除云、大气以及太阳高度角的干扰,本文根据 MVC 计算求得月最大 NDVI 来代表相应月份的 NDVI 值,并依据本文得出的植被覆盖月历图,选取全区 NDVI 均值达到 0.3 时的 6—9 月为黑河上游植被的生长季,再利用生长季期间的月 NDVI 求均值得到每年的年 NDVI,并根据年 NDVI 求均值得到 14 a 来黑河上游的年平均 NDVI,以此来反映黑河上游植被覆盖的空间分布特征。另根据植被类型图,合并黑河上游荒漠和无植被地带,并将其统称为非植被区。

2.2 研究方法

2.2.1 线性趋势分析 一元线性回归分析可以模拟每个栅格的变化趋势,通过提取不同时期单个像元的变化特征,综合反映一定时间序列的区域格局演变规律,其优点在于利用不同时段数据值的拟合,消除异常因素对植被覆盖的影响,真实地反映植被覆盖的演

化趋势^[19]。Slope反映了在14 a的时间序列中,黑河上游地区NDVI的变化趋势。计算公式如下:

$$\text{Slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times \text{NDVI}_i - \sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2}$$

式中:Slope——单个像元NDVI回归方程的斜率;NDVI_{*i*}——第*i*年的NDVI值;*n*——研究时段跨度(2001—2014共14 a)。若Slope为正时,表明随时间变化NDVI升高,区域植被状况趋于正向发展趋势,且值越大正向趋势越明显;反之则为退化趋势。

2.2.2 R/S分析与Hurst指数 自相似性和长期依赖性自然界普遍存在的现象,Hurst指数是定量描述时间序列信息的长期有效性的有效方法^[20]。基于重标极差(R/S)分析方法的Hurst指数最早由英国水文学家Hurst在研究尼罗河水库流量和存储能力的关系时提出,在水文、气候、地质和地震等领域有着广泛运用,其基本原理如下^[21]:

NDVI时间序列NDVI_{*i*}, *i*=1, 2, 3, ..., *n*, 对于任意正整数*m*, 定义该时间序列:

(1) 差分序列: $\Delta\text{NDVI}_i = \text{NDVI}_i - \text{NDVI}_{i-1}$

(2) 均值序列: $\overline{\Delta\text{NDVI}(m)} = \frac{1}{m} \quad (m=1, 2, \dots, n)$

(3) 累计离差: $X(t) = (1 \leq t \leq m)$

(4) 极差: $R(m) \quad (m=1, 2, \dots, n)$

(5) 标准差: $S(m) \quad (m=1, 2, \dots, n)$

考虑比值 $R(m)/S(m) \cong R/S$, 若存在 $R/S \propto m^H$, 则说明时间序列存在Hurst现象,*H*成为Hurst指数。在双对数坐标系(ln*i*, ln*R/S*)下通过最小二乘法拟合得到。不同的Hurst指数取值范围为 $H(0 < H < 1)$, 可以判定NDVI序列是完全随机或者是存在某种趋势性成分, 而趋势性成分表现为持续性, 或者是反持续性。Hurst指数的取值包括3种形式: 如果 $0.5 < H < 1$, 则表明NDVI时间序列具有长期相关特征, 过程具有持续性; 如果 $H = 0.5$, 则表明NDVI时间序列为互相独立的随机序列; 如果 $0 < H < 0.5$, 则表明NDVI时间序列数据具有反持续性, 过去变量与未来趋势呈负相关, 序列有突变跳跃特性。*H*值越接近0, 其反持续性越强, 越接近1, 其持续性越强。

3 结果与分析

3.1 黑河上游NDVI时间变化特征

3.1.1 植被NDVI年际变化特征 为研究黑河上游植被NDVI随年份变化的特点, 取每年的年NDVI影像中区域的NDVI平均值, 代表当年植被覆盖状

态, 并作NDVI年际变化图(图1)。由图1可知, 在时间尺度上, 近14 a来黑河上游的植被NDVI总体覆盖呈现缓慢增加趋势, 增速为0.022/10 a, 略快于整个祁连山地区2000—2011年NDVI植被平均增长率0.015/10 a^[22]。2001年NDVI处于14 a的最低值, 为0.303, 2014年NDVI值相比于2001年增加了0.054, 其中2001—2002, 2008—2010年NDVI表现出明显的上升趋势, 且于2010年达到最大值0.364, 植被覆盖状况整体以良性发展为主, 并呈现出波动缓慢发展态势。

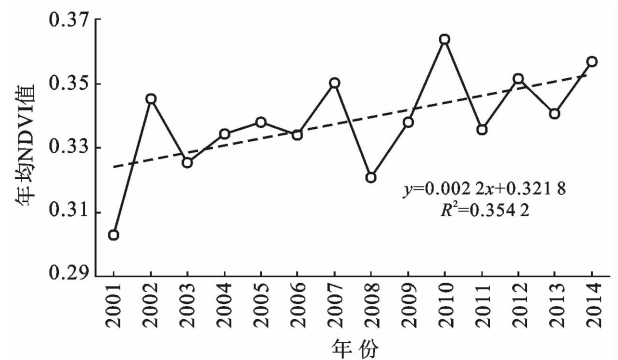


图1 2001—2014年黑河上游NDVI均值变化趋势

3.1.2 植被NDVI月变化特征 统计2001—2014年黑河上游所有像元逐月NDVI均值, 并绘制NDVI月度变化图(图2)。图中: 每一行代表NDVI在1 a中各月的变化特征, 每一列代表NDVI在14 a中对应月的年际变化特征。从月NDVI年内变化特征可知: 每年的1—5, 10—12月NDVI基本位于0.3以下, 且随月增长缓慢, 是植被生长的缓慢季节, 而从6月开始, NDVI逐月增大, 并在7或8月达到年内NDVI峰值, 介于0.4~0.44, 而后又开始逐月降低。从月NDVI年际变化特征可知: 每年对应月份的NDVI均存在一定程度上的波动, 且2002, 2007, 2010, 2012年生长季内的NDVI明显高于其他年份, 与前文NDVI年际变化的4个波峰相互吻合。从总体上看, 月尺度年内NDVI的变化规律为6—9月是植被生长的旺盛季节, 10月到来年5月是植被生长的缓慢季节。

3.2 黑河上游NDVI空间差异特征

3.2.1 NDVI空间分布特征 利用2001—2014年的年均NDVI数据, 计算14 a平均值求得NDVI均值空间分布图(图3a), 并以经度0.5°为间隔统计每0.5°范围内所有像元的NDVI均值, 得到NDVI经向变化图(图3b)。从图3a可知, 黑河上游植被NDVI

空间分布呈现出自东南向西北逐渐降低的分布特征。其中,NDVI 高值区主要位于研究区的东南部,该区域广泛分布着高寒草甸、高寒草原、灌丛以及部分针叶林,是黑河上游最重要的畜牧业基地;而低值区主要位于研究区西北部和北部,该区域多荒漠和极高山,且植被类型以半荒漠化草原为主,NDVI 值较小,而极高山地区又终年冰雪覆盖,植被无法生长。从图 3b 可知,从东经 97.3° 向东到 101°,黑河上游 NDVI 由 0.041 增长到 0.488,且随经度增大,NDVI 值迅速增加,自东向西的变化规律为 $-0.115/1^\circ$,具有经向地带性($R^2=0.936$, $p<0.001$),这是因为中部极高山的影响,阻滞了水汽的运输,导致了地区水热条件的差异,并使自西向东的植被类型表现为由半荒漠草原,到高寒草原,再到高寒草甸及灌丛的特征。

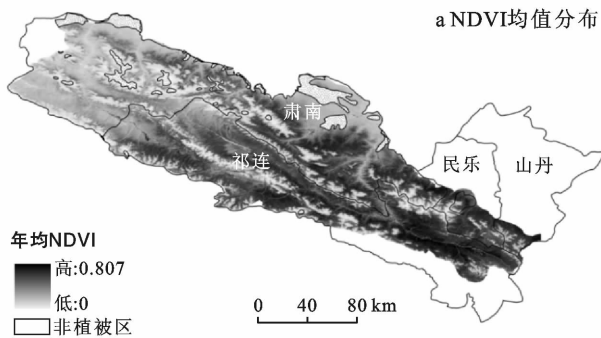


图 3 研究区 NDVI 均值空间分布及经向变化规律

3.2.2 NDVI 变化趋势性分析 为了更好的评价黑河上游植被变化趋势,参照已有研究^[23],将 Slope 分为 7 个等级:严重退化、中度退化、轻微退化、基本不变、轻微改善、中度改善、明显改善(表 1),并得到 NDVI 变化趋势图(附图 9)。由附图 9 可知,改善区域在空间上主要分布在研究区的中部和西北部,其中明显改善区域一部分位于中部祁连县境内的高山地区,这与全球气候变暖趋势,导致高山地区温度升高,高山植被长势变好有一定关系,另一部分位于肃南县北部边缘地带,中度改善和轻微改善区域则主要分布在研究区西北部,退化区域主要分布在研究区的东南部和中部,以轻度退化为主,中度退化和严重退化占比较小,且该退化区正是黑河上游的 NDVI 高值区域,植被类型主要以半湿润的高寒草甸为主,是黑河流域的主要牧场,说明该区域的人类活动已经严重危害着该区域的生态环境。

为进一步分析不同植被类型下 NDVI 的变化趋势,将植被类型数据和 NDVI 变化趋势图进行叠加,统计不同植被类型下退化与改善的面积及其比例

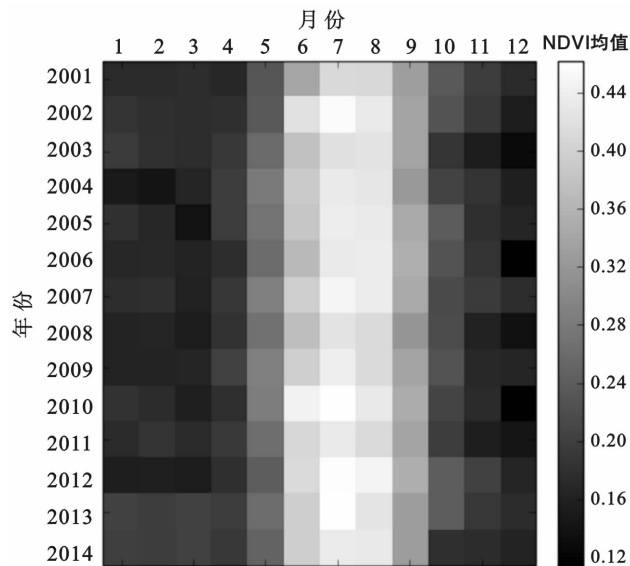
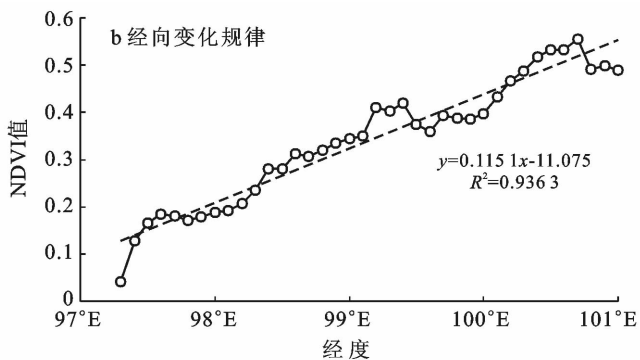


图 2 黑河上游植被覆盖月历



(表 1)。由表 1 可知,黑河上游 NDVI 整体呈现出改善趋势,中度改善和轻微改善的区域所占比例分别为 15.92% 和 28.45%,几乎覆盖全区面积 1/2,明显改善区域占比较小,仅为 3.37%。其中,明显改善和轻度改善的植被均以高寒草地为主,轻微改善的植被是以高寒草甸为主。而 NDVI 退化区域占研究区的 21.81%,且以轻度退化为主,但在 3 种退化等级下,均以高寒草甸的退化最为严重。

从植被类型看,研究区主要以高寒草甸分布为主,高寒草原次之,其余植被分布较少。其中,高寒草甸退化面积占其总面积的 25.44%,改善面积占比 40.57%,高寒草原退化面积占其总面积的 11.38%,改善面积占比 67.77%,说明高寒草甸比高寒草原退化更为严重,这是因为相比高寒草原,单位高寒草甸的草地生物量更多,导致人类对高寒草甸的放牧利用强度更大,对植被的破坏也越为严重。

3.2.3 NDVI 变化持续性分析 利用研究区 2001—2014 年 NDVI 数据,基于 R/S 分析原理,运用 MATLAB 软件编程求得研究区每个像元的 Hurst 指

数,根据已有研究^[24],将其划分为 6 个等级,并获得 NDVI 变化的 Hurst 指数空间分布图(附图 10)。统计得知,研究区 Hurst 指数值域范围为 0.211~0.826,平均值为 0.657,根据等间距原则将持续性和

反持续性各分为弱、强、很强 3 种类别。其中,反持续序列仅占研究区 NDVI 比重的 10.74%,持续性序列占到研究区 NDVI 比重的 89.26%,表明黑河上游 NDVI 的正向持续性明显强于反持续性。

表 1 不同植被类型下 NDVI 变化面积及比例

斜率变化范围	变化等级	NDVI 变化面积/km ²						比例/%
		高寒草甸	高寒草原	灌丛	针叶林	栽培植被	高山植被	
<-0.005	严重退化	129.00	39.94	52.44	15.81	0.44	35.06	1.30
-0.005~-0.003	中度退化	417.06	129.13	168.56	46.06	1.25	91.88	3.37
-0.003~-0.001	轻微退化	2 291.69	707.38	648.81	207.38	15.56	534.88	17.14
-0.001~0.001	基本不变	3 792.56	1 607.63	668.63	292.63	45.13	1461	30.46
0.001~0.003	轻微改善	3 087.88	2 568.44	545.13	265.38	88.31	767.06	28.45
0.003~0.005	中度改善	1 250.69	2 143.13	231.81	149.88	87.38	224.19	15.92
>0.005	明显改善	187.44	512.69	29.94	28.13	25.00	28.94	3.37

从空间分布上看,黑河上游地区正向持续性序列几乎遍布全区,其中大于 0.6 的中高值区主要分布在研究区的东南部和西北部,而介于 0.5~0.6 之间的弱持续性区域则广泛分布于全区,加之 2001—2014 年呈退化趋势的面积占全区的 21.81%,由此预测黑河上游大部分区域植被覆盖变化仍将得到改善。反持续性序列主要集中分布于研究区中部,以肃南县分布居多,且均为弱反持续性,强反持续性和很强反持续性序列分布极少,说明这些地区的植被变化仍具有

反向特征,但由于比重较少,并不能改变研究区当前植被改善的大趋势。

3.2.4 NDVI 变化的未来趋势分析 为了进一步研究黑河上游 NDVI 变化的未来趋势,对一元线性回归的 slope 值与 Hurst 指数进行叠加分析(overlay),得出研究区退化或者改善趋势与可持续性的耦合结果,合并得到 6 种黑河上游 NDVI 的未来变化趋势(附图 11),再将其和植被类型图叠加分析,得到不同植被类型下的未来变化趋势统计表(表 2)。

表 2 研究区不同植被类型下 NDVI 未来变化趋势统计

项目	未来变化趋势面积/km ²						比例/%
	高寒草甸	高寒草原	灌丛	针叶林	栽培植被	高山植被	
保持不变	3 051.44	1037.00	600.06	238.25	32.75	1 138.50	23.50
持续改善	5 292.56	5 096.44	913.19	454.50	213.06	1 334.50	51.26
持续退化	1 721.69	549.56	593.94	177.94	9.75	371.81	13.20
改善转为退化	410.94	937.94	97.19	84.69	13.56	97.50	6.33
退化转为改善	185.38	38.56	52.13	12.06	0.25	34.50	1.24
未来趋势不确定	549.00	286.56	102.69	45.06	1.63	175.38	4.47

结合附图 9 可看出,未来的黑河上游 NDVI 持续改善面积占研究区比重的 51.26%,主要分布在研究区的中部和西北部,以肃南县居多;而持续退化区仅占比 13.20%,主要分布在研究区东南的祁连、民乐和山丹境内,另有少量零星分布研究区中部;保持不变区域占比 23.50%,主要在研究区西北部的无植被地带周边聚集分布,这些地区多为半荒漠和极高山地区,植被覆盖很少,NDVI 值较低,变化不大;一部分地区未来将由改善转为退化区,该区占比 6.33%,主要分布在肃南县东北部;而退化转为改善区仅占研究区的 1.24%;另有一分部地区是未来趋势无法确定,即不确定是退化还是改善,其比例占研究区的 4.47%。

从植被类型看,草甸持续改善面积为 5 292.56 km²,占其总面积的 47.21%,持续改善面积比例升

高,退化面积比例降低。而高寒草原持续改善面积比例则由当前的 67.77%下降到 64.14%,呈微弱降低趋势。又有灌丛、针叶林、栽培植物和高山植被的改善面积均明显高于其他变化趋势,说明黑河上游植被未来变化仍将以改善为主。但是持续退化面积仍然是以高寒草甸和高寒草原为主,对于以畜牧业经济为主的地区来说,高寒草甸和高寒草地的持续退化都将成为该地区良好发展的制约性因素。

因此建议相关人员能对黑河上游东南区的持续退化区域进行保护,限制该区域的牲畜数量,缩短夏季放牧时间,延长禁牧时间,降低东南区的放牧强度,引导牧户向西北域持续改善区域进行放牧,缓解东南区群落界面上的资源竞争,同时对于由改善转为退化区和未来趋势不确定区域也应当进行一定程度的保

护,从而起到恢复和保护草原的作用。

4 讨论与结论

(1) 在时间上,黑河上游 NDVI 在年尺度上呈现出“波动—缓慢改善”趋势;在月尺度年内 NDVI 在 6—9 月是植被生长的旺盛季节。在空间上,多年 NDVI 均值有自东南向西北逐渐降低的分布特征。

(2) 近 14 a 黑河上游 NDVI 整体呈现改善趋势,改善区域占比 47.74%,主要分布在研究区中部和西北部,以高寒草原和高山植被改善为主,而退化区域占比 21.81%,集中分布于研究区东南部,以高寒草甸退化为主。

(3) 研究区 Hurst 指数介于 0.211~0.826 之间,均值为 0.657,正向持续性较强,并散布全区,反持续性较弱,主要分布于肃南县东北部。

(4) 黑河上游未来的 NDVI 变化将向着改善的大方向发展,持续改善面积将占比 51.26%,集中分布在研究区的中部和西北部,以肃南县居多,但仍存在 13.20%持续退化区域,以高寒草甸退化为主,同时该区域又是黑河上游的优质牧场,其退化所带来的环境和经济问题不可估量,因此引导牧户合理放牧,保护区域生态环境将是当地相关人员亟待解决的问题。

文本通过 Slope 值和 Hurst 指数的叠加分析对研究区的 NDVI 改善与退化趋势进行定量研究,将其植被未来变化趋势成图显示,有助于促进区域生态环境的保护,具有一定实用价值。但本研究也存在一定局限性,没有深入考虑不同植被类型的经济价值,以便进一步估算不同植被退化所带来的经济损失;也缺少对植被覆盖变化的原因分析。

[参 考 文 献]

- [1] 陈效述,王恒. 1982—2003 年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化[J]. 地理学报,2009,64(1):84-94.
- [2] 田庆久,闵祥军. 植被指数研究进展[J]. 地球科学进展,1998,13(4):327-333.
- [3] Prince S D. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1991,12(6):1313-1330.
- [4] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index[J]. Remote Sensing of Environment, 1997,62(3):241-252.
- [5] Zhou Liming, Tucker C J, Kaufmann R K, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D17):20069-20083.
- [6] Wang Juan, Li Baolin, Yu Wanli. Analysis of vegetation trend and their cause during recent 30 years in Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012,26(2):132-137.
- [7] Yin He, Li Zhengguo, Wang Yanglin, et al. Assessment of desertification using time series analysis of hyper-temporal vegetation indicator in Inner Mongolia[J]. Acta Geographica Sinica, 2011,66(5):653-661.
- [8] Song Fuqiang, Xing Kaixiong, Liu Yang, et al. Monitoring and assessment of vegetation variation in Northern Shaanxi based on MODIS/NDVI[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011,31(2):354-363.
- [9] 韦红波,李锐,杨勤科. 我国植被水土保持功能研究进展[J]. 植物生态学报,2002,26(4):489-496.
- [10] 李秀花,师庆东,常顺利,等. 1981—2001 年中国西北干旱区 NDVI 变化分析[J]. 干旱区地理,2008,31(6):940-945.
- [11] 韦振锋,王德光,张翀,等. 1999—2010 年中国西北地区植被覆盖对气候变化和人类活动的响应[J]. 中国沙漠,2014,34(6):1665-1670.
- [12] 宋怡,马明国. 基于 SPOTVEGETATION 数据的中国西北植被覆盖变化分析[J]. 中国沙漠,2007,27(1):89-93.
- [13] 刘宪锋,任志远,林志慧,等. 2000—2011 年三江源区植被覆盖时空变化特征[J]. 地理学报,2013,68(7):897-908.
- [14] 张翀,任志远. 黄土高原地区植被覆盖变化的时空差异及未来趋势[J]. 资源科学,2011,33(11):2143-2149.
- [15] 李芳,蒋志荣. 张掖地区植被覆盖变化及其预测研究[J]. 水土保持通报,2011,31(5):220-224.
- [16] 李旭谱,张福平,魏永芬. 黑河流域植被覆盖程度变化研究[J]. 地域研究与开发,2013,32(3):108-114.
- [17] 赵铭石,勾晓华,周非飞,等. 黑河中上游地区 NDVI 对气象因子的响应分析[J]. 兰州大学学报,2011,47(6):33-38.
- [18] 安美玲,张勃,孙力伟,等. 黑河上游土地利用动态变化及影响因素的定量分析[J]. 冰川冻土,2013,35(2):355-363.
- [19] 侯西勇,应兰兰,高猛,等. 1998—2008 年中国东部沿海植被覆盖变化特征[J]. 地理科学,2010,30(5):735-740.
- [20] 严恩萍,林辉,党永峰,等. 2000—2012 年京津风沙源治理区植被覆盖时空演变特征[J]. 生态学报,2014,34(17):5008-5020.
- [21] 王桂钢,周可法,孙莉,等. 近 10 a 新疆地区植被动态与 R/S 分析[J]. 遥感技术与应用,2010,25(1):84-90.
- [22] 武正丽,贾文雄,刘亚荣,等. 近 10 a 来祁连山植被覆盖变化研究[J]. 干旱区研究,2014,31(1):80-87.
- [23] 李双双,延军平,万佳. 近 10 a 陕甘宁黄土高原植被覆盖时空变化特征[J]. 地理学报,2012,67(7):960-969.
- [24] 田义超,陈志坤,梁绍忠. 北部湾海岸带植被覆盖时空动态特征及未来趋势[J]. 热带地理,2014,34(1):76-86.