

1977—2017 年锡林郭勒盟中部草原 植被覆盖时空演变及预测

艾丽娅¹, 王少军¹, 张志²

[1. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074]

摘要: [目的] 分析内蒙古自治区锡林郭勒盟锡林浩特市和阿巴嘎旗植被覆盖变化状况、影响因素及发展趋势, 为区域生态环境保护和治理提供科学参考。[方法] 基于 5 期 Landsat 影像反演 1977—2017 年间植被覆盖时空变化, 结合气候及社会经济数据探讨其演化影响因素, 通过 CA-Markov 模型预测 2025 年植被覆盖状况。[结果] ①在时间上, 植被覆盖显示以 2000 年为拐点先下降后缓慢上升状态; 1977—2000 年间, 中、高植被覆盖面积合计变化 $-27\ 862.42\ \text{km}^2$, 2000—2017 年间合计变化 $16\ 649.44\ \text{km}^2$ 。②在空间上, 中部植被覆盖变化大, 北部、东部变化较小。局地上, 自然保护区内植被覆盖保持良好状态; 采矿等活动导致周边植被覆盖的下降; 城镇用地等生活空间的扩张对周围植被覆盖变化影响较小。③气候变化是植被覆盖变化的基本驱动力, 人为因素起主要影响作用, 生态建设工程、畜牧量控制等起正向影响; 畜牧量过载、采矿等起负向影响。④2025 年预测结果显示植被覆盖上升, 持续恢复, 但恢复程度不理想。[结论] 应坚持绿水青山就是金山银山的发展理念, 加大生态环境建设力度, “努力把内蒙古建成中国北方重要的生态安全屏障。”

关键词: 植被覆盖度; 时空演变; Landsat 影像; CA-Markov 模型; 锡林郭勒

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)05-0249-08

中图分类号: X853, TP753

文献参数: 艾丽娅, 王少军, 张志. 1977—2017 年锡林郭勒盟中部草原植被覆盖时空演变及预测[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 249-256. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.035; Ailiya, Wang Shaojun, Zhang Zhi. Spatial-temporal evolution and prediction of vegetation cover in central part of Xilingol grassland during 1977—2017[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 249-256.

Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Vegetation Cover in Central Part of Xilingol Grassland During 1977—2017

Ailiya¹, Wang Shaojun¹, Zhang Zhi²

(1. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan,

Hubei 430074, China; 2. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: [Objective] The changes, influencing factors, and development trends of vegetation cover in Xilinhot City and Abaga Banner, Xilingol League, Inner Mongolia Autonomous Region were analyzed to provide a scientific reference for regional ecological and environmental protection and governance. [Methods] Landsat images in five phases were used to obtain the spatial-temporal evolution of vegetation coverage from 1977 to 2017, which was combined with climate and social-economic data as a means of exploring influencing factors. The CA-Markov model was also used to predict the vegetation coverage in 2025. [Results] ① In terms of time, the vegetation coverage showed a state of decrease from 1977 but then began to slowly increase after 2000. The median and high vegetation coverage area changed in two periods: $-27\ 862.42\ \text{km}^2$ during 1977—2000 and $16\ 649.44\ \text{km}^2$ during 2000—2017. ② Spatially, the vegetation cover in the central part of the study area changed greatly, while that in the northern and eastern regions changed little. In a local ecological nature reserve, the vegetation cover changed little, whereas mining and other production activities caused the

收稿日期: 2019-03-11

修回日期: 2019-04-11

资助项目: 中国地质调查局项目“全国 2017 年新增的矿山恢复治理状况监测”(121201003000172718)

第一作者: 艾丽娅(1994—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区锡林郭勒盟人, 硕士研究生, 研究方向为环境遥感监测及评价。E-mail: 714943412@qq.com

通讯作者: 王少军(1965—), 女(汉族), 湖北省黄冈市人, 副教授, 主要从事地理信息系统的教学及科研工作。E-mail: 740877917@qq.com

decline of surrounding vegetation cover, but urban land use and expansion of accommodation had little impact on the surrounding vegetation cover change. ③ Climate change was the basic driving force, and human factors were the main influencing factor. Ecological construction projects and livestock quantity control had positive effects, whereas livestock quantity overload and mineral exploitation had negative effects. ④ The predicted results for 2025 suggest that vegetation cover will increase and maintain a state of recovery, but that the degree of recovery was not very good. [Conclusion] People in the study area need to focus on the development concept “lucid waters and lush mountains are invaluable assets”. An increase in construction efforts for providing ecological and environmental security services is needed to make Inner Mongolia an important ecological security barrier in northern China.

Keywords: fractional vegetation coverage; spatio-temporal evolution; Landsat image; CA-Markov model; Xilingol

习总书记指出“内蒙古地处‘三北’，外接俄罗斯、蒙古国，具有发展沿边开放的独特优势，是中国向北开放的前沿。”锡林郭勒草原地处蒙古高原中部，是中国四大天然牧场之一^[1]，它不仅在中国北部的碳循环和气候系统中扮演着重要角色，也在畜牧业的发展中发挥着重要作用^[1-3]。但因其所处地理环境和气候条件以及人口发展和牲畜量超载等的影响，植被退化，沙尘暴频发，其生态环境日趋恶化，生态服务功能下降，严重影响了京津冀地区乃至整个华北地区的生态环境安全^[4-6]。因此对该地区草地资源进行长时间变化监测，对全面认识草原退化、草地资源的可持续利用和生态环境保护具有重要意义。

遥感技术是长时间植被覆盖变化监测的有效手段^[7-11]，目前已有较多学者展开了相关研究。巴图娜存等^[12]对锡林郭勒草原 1975—2009 年草地资源分布进行研究，发现空间分布上自东向西，草地覆盖度逐渐降低，类型依次为温性草甸草原、温性草原、温性荒漠草原。马梅等^[13]通过计算锡林郭勒草原近 30 年草地退化指数，得知该区草地处于长期退化趋势，但 2000 年是草地退化转折点。穆少杰等^[14]基于 MODIS NDVI 数据得出内蒙古植被覆盖度在空间上呈东高西低分布，2001—2010 年间呈上升趋势。张戈丽等^[15]利用 1981—2009 年 GIMMS NDVI，MODIS NDVI 数据反演呼伦贝尔地区草地变化，结合气象数据分析出从年际变化看降水是主要影响因素等等。纵观相关研究，前人对内蒙古草地覆盖状态变化进行了长时间序列的研究，并结合气象数据进行了影响因素分析，硕果累累，但依旧存在一些问题。①相关研究大多采用 MODIS NDVI 等成品数据，其分辨率最高为 250 m，远低于 Landsat 系列数据分辨率。②多数研究以省、市、县等尺度进行草原植被覆盖变化分析，却未深入对局地变化及其背景环境进行分析和探讨。③以往研究仅对过去及现状进行分析，还未见有对未来草地覆盖状况的预测研究。而预测研究对相关地区未来的生态工程建设、政策制定等有

重要参考意义^[16]。

综上，本文选取锡林郭勒盟中部的锡林浩特市和阿巴嘎旗为研究区，利用 1977, 1990, 2000, 2010, 2017 年 5 期 Landsat 遥感影像反演植被覆盖度，获得近 40 a 植被覆盖在时间、空间上的动态变化；并结合气候及社会经济数据，分析植被覆盖变化的气候、人为影响。最后通过 CA-Markov 模型，预测 2025 年植被覆盖状况，以期为认识草原植被在不同尺度上的时空演变及后期的保护和利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区属锡林郭勒盟中部的锡林浩特市和阿巴嘎旗，位于东经 113° 27′—117° 06′，北纬 43° 02′—45° 26′，面积 4.33×10^4 km²。锡林浩特市地势南高北低，平均海拔高度 988.5 m；阿巴嘎旗地势由东北向西南倾斜，平均海拔 1 127 m。该区地处中纬度西风气流带内，气候属中温带半干旱大陆性气候；冷暖剧变，昼夜温差大，降水量少，蒸发量大，春秋两季多寒潮大风，冬季寒冷漫长，夏季温凉短促。锡林浩特市是国家重要的绿色农畜产品生产基地，可利用优质天然草场面积 1.38×10^6 hm²。阿巴嘎旗 98% 的土地被原始植被覆盖，其中可利用草场面积 2.70×10^4 km²。

1.2 数据来源及预处理

①遥感数据：研究采用 1977, 1990, 2000, 2010, 2017 年 Landsat MSS, TM, OLI 遥感影像从美国地质勘探局网 (<http://glovis.usgs.gov/>) 下载，MSS 数据分辨率 79 m，TM 及 OLI 数据分辨率为 30 m，均为 L1T 级别数据，除两景影像外云量均少于 10%；成像时间每年 7—9 月份，共 26 景。通过 ENVI 软件对影像进行辐射定标及大气校正预处理，在 Seamless Mosaic 模块下进行影像镶嵌拼接。②行政区划数据：从国家基础地理信息中心获取到中国县级行政边界数据；乡镇行政边界通过地图矢量化获得。依据行政界线对镶嵌影像进行掩模裁剪。③气候数据：采

用中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供的锡林浩特市 54102 站台和阿巴嘎旗 53192 站台详细记录资料,包括 1977—2017 年间每年的年平均气温、年总降水量及 7—9 这 3 个月的月平均气温,月总降水量;7—9 这 3 个月的平均值作为生长旺盛季气候数据。④社会经济数据:包括 1977—2017 年锡林浩特市和阿巴嘎旗历年人口总量和牲畜总头数量,资料来自《内蒙古统计年鉴(1978—2018)》。

1.3 研究方法

1.3.1 植被覆盖度遥感反演 植被覆盖度(fractional of vegetation coverage, FVC)不仅可以描述地表植被覆盖,还能表示植被长势,因此可用作遥感监测草地资源的指标^[17]。采用基于像元二分模型的植被覆盖度反演方法^[18]。建立 FVC 与 NDVI(归一化植被指数)之间的转化关系直接提取植被覆盖度信息,计算公式如下:

$$FVC = \frac{(NDVI - NDVI_{soil})}{(NDVI_{veg} - NDVI_{soil})} \quad (1)$$

式中:NDVI_{soil}——完全是裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值;NDVI_{veg}——完全被植被覆盖像元的 NDVI 值;通过多次试验和前人经验,NDVI_{soil} 取置信区间累计频率为 0.5% 的 NDVI 值,NDVI_{veg} 取置信区间累计频率为 99.5% 的 NDVI 值。

1.3.2 植被覆盖度分布特征分析

①基于田海静等^[19]、闫萧萧等^[20]的研究并结合研究区情况对 FVC 进行分级;第一级为裸地,代表非植被覆盖,FVC 为 0~0.1;第二级为低植被覆盖,FVC 为 0.1~0.3,第三级为中低植被覆盖,FVC 为 0.3~0.45;第四级为中植被覆盖,FVC 为 0.45~0.6,第五级为高植被覆盖,FVC 为 0.6~1。

②计算年 FVC 均值,其值可表示年度植被覆盖总体情况,计算公式如下:

$$\overline{FVC}_i = \frac{\sum_{j=1}^n f_{ij}}{n} \quad (2)$$

式中: \overline{FVC}_i ——各地第 i 年 FVC 均值; i ——年序号; f_{ij} ——第 i 年第 j 个像元的 FVC 值; n ——总像元数。

1.3.3 影响因素分析 为分析各因素对研究区植被覆盖变化的影响,计算历年 FVC 均值与同期年平均气温、年总降水量、旺盛季平均气温、旺盛季总降水量、人口总量和牲畜总头数之间相关系数,相关系数表示两个变量之间的相关程度^[15,21],计算公式如下:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中: r_{xy} —— x, y 两个变量的相关系数, $r_{xy} > 0$ 表示正相关, $r_{xy} < 0$ 表示负相关,绝对值越大表示两要素之间相关性越强; x_i ——第 i 年 FVC 值; y_i ——第 i 年的某一其他影响因素; \bar{x} ——历年 FVC 均值; \bar{y} ——历年某一其他影响因素的平均值; i ——样本数。

1.3.4 植被覆盖模拟预测 CA-Markov 模型将元胞自动机(CA)和 Markov 模型结合起来,既保持了 CA 模型模拟复杂系统空间变化的能力又发挥了 Markov 模型进行长期预测的功能^[22]。CA 是一种具有时空计算特征的动力学模型;其特点是时间、空间、状态都离散,每个变量都只有有限多个状态,其(空间的)相互作用和(时间上)因果关系皆局部^[23-24];CA 模型可以表示为:

$$S_{t+1} = f(S_t, N) \quad (4)$$

式中: S ——元胞有限、离散的状态集合; N ——元胞的邻域; $t, t+1$ ——不同的时刻; f ——局部空间元胞状态的转化规则^[24]。

若一个过程存在有限多个时序,其任意时刻 t_{n+1} 的状态 a_{n+1} 只与其前一时刻 t_n 的状态 a_n 相关,则该过程存在马尔科夫性;Markov 模型可以表示为:

$$S_{t+1} = P_{ij} \times S_t \quad (5)$$

式中: S_{t+1}, S_t ——为 $t+1, t$ 时刻系统的分布状态; P_{ij} ——状态转移矩阵^[22]。

通过 IDRISI 软件以 2010 年和 2017 年数据计算转移概率矩阵,将此作为转换规则利用 MCE 模块创建适宜性图集;以 2017 年为预测起始时刻,迭代次数取 8,基于 5×5 临近滤波器模拟计算 2025 年研究区植被覆盖度,并通过 CROSSTAB 模块进行 Kappa 精度评价。

2 结果与分析

2.1 植被覆盖时空演变特征

2.1.1 时间变化特征 通过表 1 可知,裸地面积变化非常小。1977 年 FVC 均值 0.634 1,区内中、高植被覆盖比例 93.85%,覆盖程度相当高。1990 年 FVC 均值 0.489 1,中、高植被覆盖比例减至 51.52%,低、中低植被覆盖比例 47.68%,基本为持平状态。2000 年 FVC 均值 0.391 6,低、中低植被覆盖比例升至 69.65%,中、高植被覆盖比例减至 29.31%。2010 年 FVC 均值 0.483 2,低、中低植被覆盖比例 50.18%,其中低植被覆盖比例减少 21.75%,中、高植被覆盖比例 49.23%,回升至持平状态。2017 年 FVC 均值 0.5377,低、中低植被覆盖比例 31.46%,中、高植被覆盖比例 67.96%。

从统计数值可看出,低植被覆盖面积在 1977—

2000 年间增加了 11 520.51 km², 在 2000—2017 年间减少了 11 672.55 km²。中低植被覆盖面积在 1977—1990 年间大幅度增加, 1990—2010 年间小幅度增加, 总增量 16 419.08 km², 在 2010—2017 年间减少 4 922.76 km²。中、高植被覆盖面积变化为 1977—2000 年间减少, 减少量分别为 12 316.63,

15 545.79 km², 2000—2017 年间增加, 增加量分别为 10 448.18, 6 201.26 km²。总体上, 研究区植被覆盖度在时间上显示以 2000 年为拐点, 经历了 1977—2000 年的下降阶段和 2000—2017 年的上升阶段, 且下降程度大于上升, 对应于中国退耕还林(草)工程实施时间点, 与巴图娜存^[7]等的研究结果保持一致。

表 1 1977—2017 年锡林郭勒盟历年植被覆盖度统计结果

年份	植被覆盖度等级	裸地	低植被覆盖	中低植被覆盖	中植被覆盖	高植被覆盖
1977	面积/km ²	408.12	820.29	1 427.00	20 972.12	19 602.48
	百分比/%	0.94	1.91	3.30	48.51	45.34
1990	面积/km ²	346.03	6 628.65	13 948.34	11 819.65	10 411.66
	百分比/%	0.8	15.36	32.32	27.39	24.13
2000	面积/km ²	440.90	12340.80	17846.08	8655.49	4056.69
	百分比/%	1.04	28.47	41.18	19.95	9.36
2010	面积/km ²	251.14	2 904.09	18 777.18	13 735.18	7 535.20
	百分比/%	0.59	6.72	43.46	31.79	17.44
2017	面积/km ²	249.59	668.25	12 923.32	19 103.67	10 257.95
	百分比/%	0.58	1.55	29.91	44.22	23.74

2.1.2 空间演变特征 研究区 5 期植被覆盖度分布见附图 23—24。整体来看, 1977 年植被覆盖相当高, 区内基本为中、高植被覆盖, 可知植被生长繁茂, 状况极佳。1990 年阿巴嘎旗中部、西部, 锡林浩特北部出现低、中低植被覆盖交错分布现象, 但阿巴嘎旗北部、南部和锡林浩特南部仍保持中、高植被覆盖。2000 年时植被覆盖降低至最差状况; 除阿巴嘎旗北部和锡林浩特东部小部分仍保持中、高植被覆盖外, 其余基本转变为低、中低植被覆盖, 并且中部以低植被覆盖为主。2010 年植被覆盖有所增加, 中部绝大部分低植被覆盖转变为中低、中植被覆盖, 甚至为高植被覆盖; 阿巴嘎旗西北部和锡林浩特东部保持中、高植被覆盖, 其周边地区植被覆盖改善明显, 可知 2010 年时草地覆盖有所恢复。2017 年植被覆盖持续恢复, 阿巴嘎旗中部的中低植被覆盖向中、高植被覆盖转变, 锡林浩特中北部低, 中低植被覆盖向中植被覆盖转变。从宏观尺度看, 中部(包括锡林浩特中北部和阿巴嘎旗中部、南部)植被覆盖变化最大, 变化趋势为中、高植被覆盖到低、中低植被覆盖, 再到中低、中植被覆盖, 而北部和东部变化较小, 基本保持中、高植被覆盖; 可知植被覆盖变化从中部向外逐渐变小。从局部地区来看, 因各地背景环境各异, 植被覆盖变化不尽相同; 从绿色发展角度考虑, 以生态、生产、生活等不同功能区为划分, 分析其 FVC 变化。

(1) 生态空间。研究区有 1 个国家级自然保护区(锡林郭勒草原国家级自然保护区)及 2 个自治区级自然保护区(浑善达克沙地柏自然保护区、白音库

伦遗鸥自然保护区)。锡林郭勒盟草原国家级自然保护区成立于 1985 年, 1997 年晋升为国家级自然保护区; 主要保护对象为草甸草原、典型草原、沙地疏林草原和河谷湿地生态系统。以保护区内的毛登牧场、白音锡勒牧场和贝力克牧场为例, 1990—2017 年间各牧场年 FVC 均值基本保持在 0.5~0.7 之间(见表 2), 植被覆盖变化小, 基本保持中、高植被覆盖状态(见图 1); 表明自然保护区内植被覆盖保持良好, 变化较小。

表 2 1977—2017 年锡林郭勒盟各乡镇年植被覆盖度均值统计结果

地区	1977 年	1990 年	2000 年	2010 年	2017 年
那仁宝拉格苏木	0.646	0.328	0.356	0.479	0.531
巴彦图嘎苏木	0.655	0.534	0.509	0.568	0.635
吉日嘎郎图苏木	0.689	0.537	0.512	0.541	0.599
伊和高勒苏木	0.637	0.492	0.400	0.459	0.590
别力古台镇	0.564	0.414	0.340	0.410	0.561
查干淖尔镇	0.610	0.486	0.356	0.400	0.501
洪格勒高勒镇	0.673	0.613	0.336	0.480	0.484
阿尔善宝拉格镇	0.658	0.455	0.286	0.448	0.449
朝克乌拉苏木	0.717	0.389	0.274	0.546	0.438
巴彦宝拉格苏木	0.673	0.418	0.282	0.456	0.428
宝力根苏木	0.640	0.466	0.293	0.388	0.473
锡林浩特市	0.674	0.310	0.359	0.322	0.449
毛登牧场	0.697	0.485	0.488	0.554	0.575
白音锡勒牧场	0.642	0.620	0.520	0.574	0.547
贝力克牧场	0.522	0.621	0.504	0.512	0.521
驻草场	0.536	0.681	0.694	0.677	0.691
白音库伦牧场	0.494	0.743	0.447	0.558	0.590

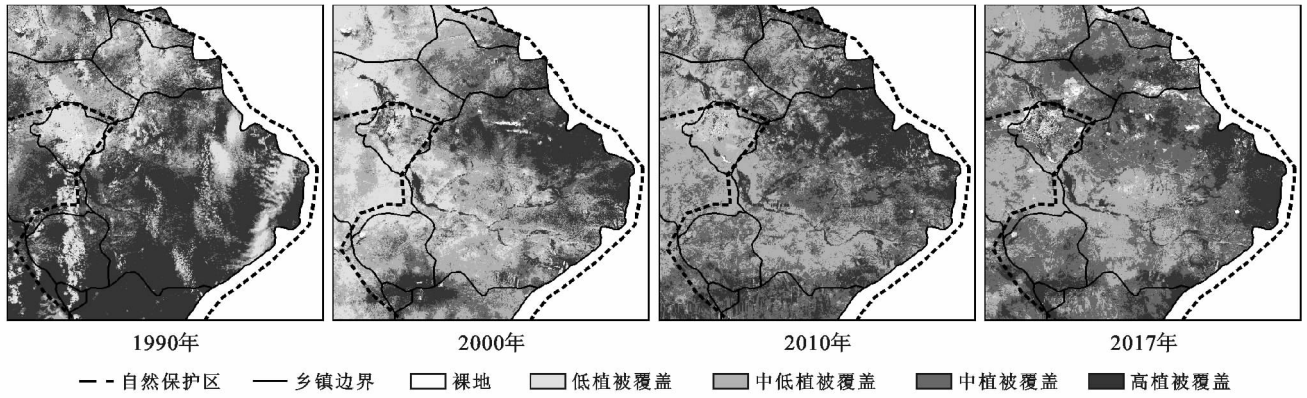
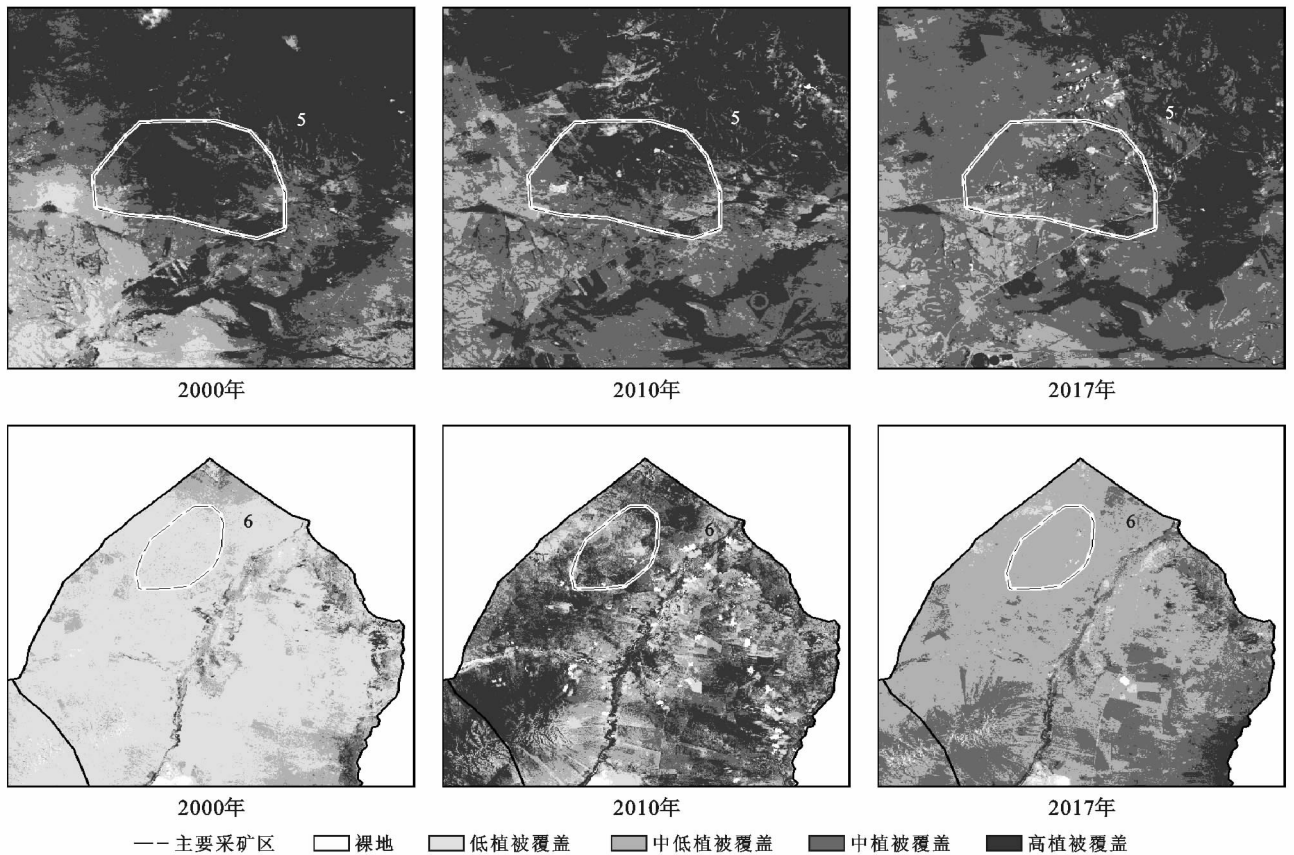


图 1 锡林郭勒盟草原自然保护区内植被覆盖变化特征

(2) 生产空间。研究区属典型草原区,畜牧业是主要生产方式,其次为矿产资源开发;5号矿区在白音锡勒牧场中部,2009—2018年间进行了萤石矿的开采。通过图2可以看出,2000—2010年间该区植被覆盖保持良好状态并有恢复,但因采矿活动的进行,到2017年时不仅采矿区范围植被覆盖下降,甚至

连矿区周围植被覆盖也明显下降。6号矿区在朝克乌拉苏木北部,2013—2017年间进行了橄榄岩矿及铬矿的开采。从图2中可知,2000年时该区植被覆盖较低,到2010年时已恢复较好,本应保持恢复状态;但因矿产资源的开发,导致了该区及其周围植被覆盖下降。



注:图中5,6代表5号矿和6号矿。

图 2 锡林郭勒盟草原采矿区植被覆盖变化特征

(3) 生活空间。居民生活集中区是别力古台镇和锡林浩特市,且75%以上人口居住在锡林浩特市

内。该市年FVC均值从1977—1990年下降后基本保持稳定状态(表2)。从图3可以看出锡林浩特市居

民区扩张明显,但除居民区扩张引起的土地占用外,对周围地区的植被覆盖变化影响较小。居民区周围的植被覆盖呈现先下降再回升的状态,同研究区其他非生态、非生产功能区基本一致。

通过以上分析可以看出,锡林浩特市属研究区内敏感地带。存在敏感性的原因在于,该地区有大面积自然保护区,属生态环境建设工程区。但由于该地区矿山开发活动较为密集,对于草地的破坏较为严重;并且由于人口的增长,其牲畜总头数增长和城市发展压力也较大。在自然条件相近的情况下,人类活动对植被覆盖变化起到了主要影响作用;由此可知不同地

区敏感性的存在重点受人为因素影响。

总的来说,在局地上植被覆盖变化对不同功能区有不同响应。以自然保护区为例的生态功能区植被覆盖保持良好状态且变化较小,说明生态保护工程对草地资源起到了良好的保护作用。矿产开发等生产活动会破坏草地资源,不仅导致该地区植被覆盖下降,更是影响了其周边环境的植被覆盖状态^[25]。城镇等生活空间由于扩张会占用土地,但对周边环境的植被覆盖变化影响较小。可知,草地植被覆盖变化受到生态保护和建设工程、矿产资源开发等人为因素的影响。

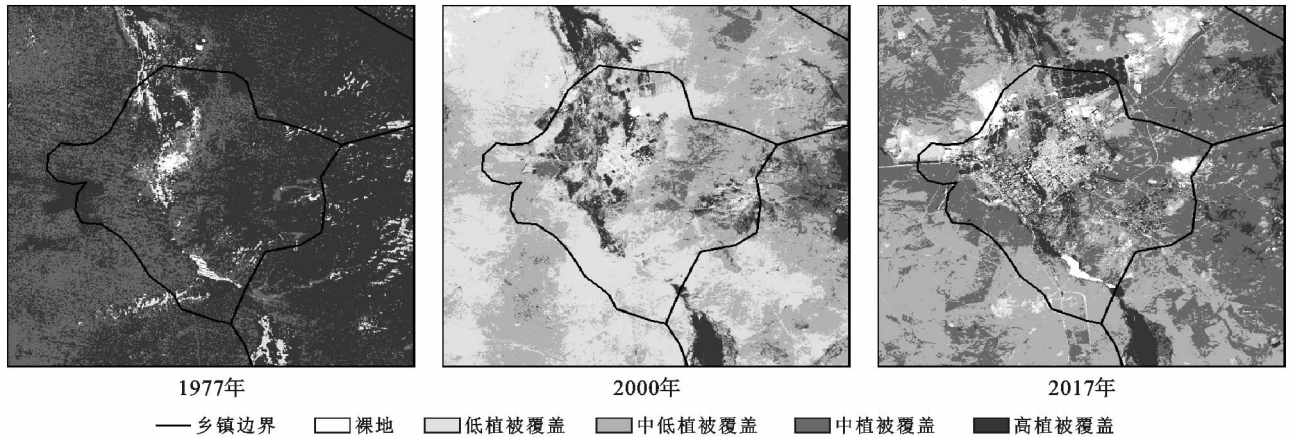


图 3 锡林郭勒盟草原植被覆盖变化特征

2.2 植被覆盖变化影响因素

2.2.1 气候因素 气候因素考虑气温和降水影响。研究区 1977—2017 年均温波动上升趋势明显(图 4a),介于 0.65~4.25 °C 之间,平均气温 2.56 °C。年

降雨量呈波动减少,年际间振荡明显(图 4b),介于 151~366 mm 之间,平均降水量 243 mm 左右。结合洪园园^[26]的研究可知该区气温波动上升,降雨量波动减少,潜在蒸发量增加,气候暖干化趋势明显。

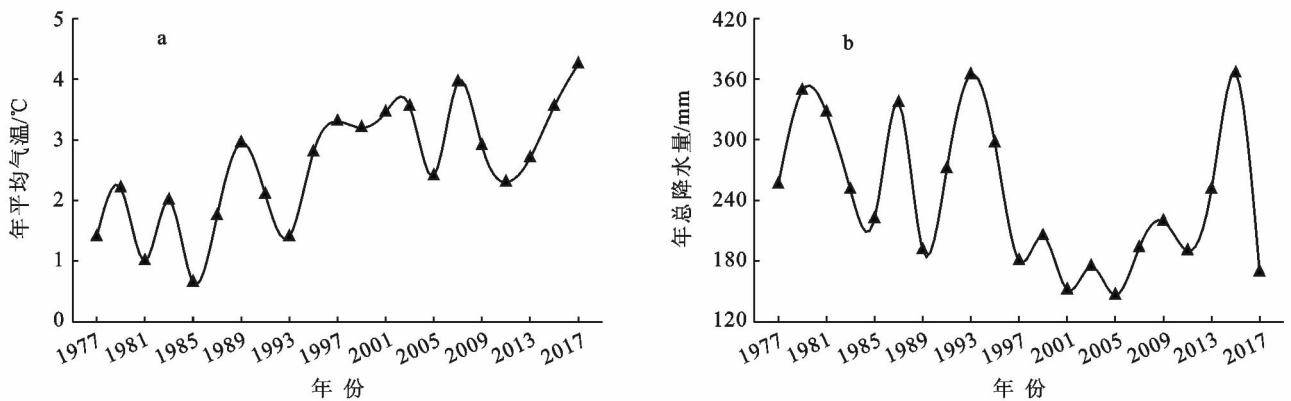


图 4 1977—2017 年锡林郭勒盟草原气候要素变化特征

2.2.2 人为因素 人为因素考虑人口总量和牲畜总头数变化影响。近 40 a 研究区人口快速增长(图 5a),从 1.18×10^5 增至 2.33×10^5 ,平均 1.76×10^5 。牲畜总

头数显示 1977 至 1999 年间增加,1999 至 2017 年间呈现波动减少状态(图 5b);从 1979 年 9.21×10^5 ,到 1999 年增至最高值 2.85×10^6 ,2015 年减至 1.45×10^6 。

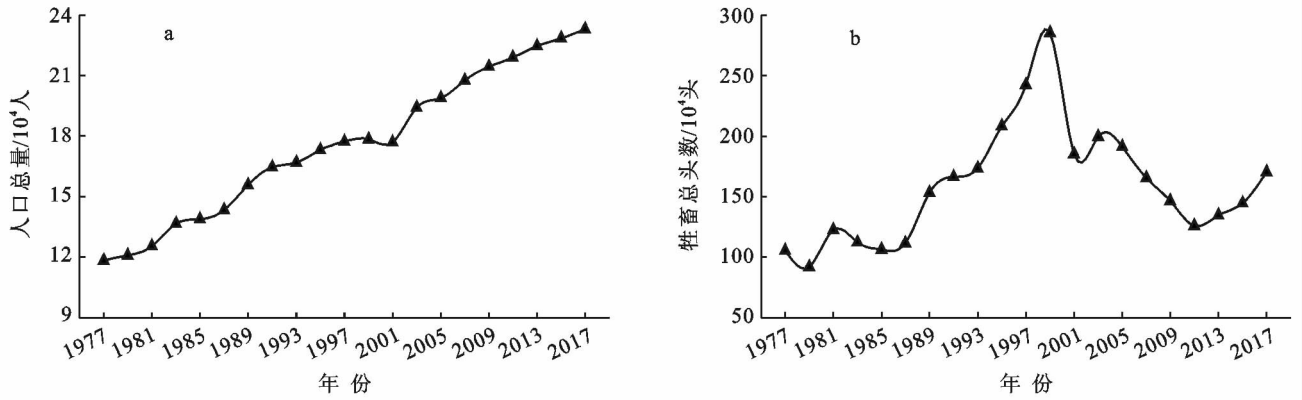


图 5 1977—2017 年锡林郭勒盟草原人口、牲畜量变化特征

2.2.3 相关性分析 FVC 与各指标间相关系数见表 3。气候因素中,FVC 变化与年平均气温、年总降水量、旺盛季平均气温中度相关,与旺盛季总降水量弱负相关;人为因素中,FVC 与人口总量呈中度负相关,而与牲畜总头数呈强负相关,说明牲畜总头数变化对该区植被覆盖变化影响较大。

结合有关植被覆盖时空演变特征分析,气候暖干化趋势导致干燥程度增加,对植被生长不利,推进草

地退化^[27],因此气候因素是影响植被覆盖变化的基本驱动力,而人为因素才是影响植被覆盖变化的主要原因。研究区人口数量的增加,引起经济发展的要求和粮食需求量的增加,因此在 1977—2000 年间过度发展畜牧业,导致畜牧量过载,引起草地大面积退化;2000 年后通过控制畜牧量和生态工程的建设,草原植被覆盖逐步恢复,但由于部分地区存在矿产资源开发等活动,植被覆盖恢复较缓,甚至导致下降^[28]。

表 3 1977—2017 年锡林郭勒盟草原植被覆盖度与各指标间相关性

指标	年平均气温	年总降水量	旺盛季平均气温	旺盛季总降水量	人口总量	牲畜总头数
相关系数	-0.408	0.453	-0.508	-0.189	-0.332	-0.823
显著性	中度负相关	中度正相关	中度负相关	弱负相关	中度负相关	强负相关

2.3 植被覆盖变化预测

由上述分析可知,该区植被覆盖变化主要受人为因素影响,以保持当前人为干预强度为前提,即保持当前的生态建设工程及矿产开发活动强度不变,通过 CA-Markov 模型基于 2010 和 2017 年植被覆盖数据预测 2025 年植被覆盖状况。

为了检验该模型的准确度,以 2000 和 2010 年植被覆盖数据为基础,模拟 2017 年植被覆盖;将模拟数据与真实数据做 Kappa 精度分析,得出总体精度为 0.825 3,模拟结果准确率较高,说明该模型预测效果可信,可用于预测研究^[29]。预测结果见附图 25 和表 4。

由附图 25 和表 4 可知,2025 年植被覆盖上升,相较 2017 年,高植被覆盖面积变化 2 437.97 km²,中植被覆盖面积变化 -28.12 km²,中低植被覆盖面积变化 -2 282.5 km²,低植被覆盖面积变化 -174.84 km²。其中阿巴嘎旗巴彦图嘎苏木、伊和高勒苏木、别力古台镇和锡林浩特市宝力根苏木、白音库伦牧场植被覆盖增长较为明显。总体来说,到 2025 年时研究区植被覆盖将持续保持上升,除阿巴嘎旗南部和锡林浩特中北部为中低植被覆盖,其余基本转变为中、高植被覆盖,比例为 73.5%,低植被覆盖面积非常小,植被覆盖恢复较好。

表 4 锡林郭勒盟草原植被覆盖变化预测结果统计

植被覆盖度等级	裸地	低植被覆盖	中低植被覆盖	中植被覆盖	高植被覆盖
面积/km ²	324.26	493.41	10 640.82	19 075.55	12 695.92
百分比/%	0.75	1.14	24.61	44.13	29.37

3 结论与讨论

本文选取锡林郭勒盟中部的锡林浩特市和阿巴嘎旗为研究区,利用 1977—2017 年 5 期 Landsat 遥

感影像反演植被覆盖度,获得近 40 a 植被覆盖时空变化及其影响因素,并预测了 2025 年植被覆盖状况。

(1) 在时间上,该区植被覆盖显示以 2000 年为拐点,1977—2000 年减少,2000—2017 年增加的变化

特征。在空间上,研究区中部植被覆盖变化最大,而北部和东部变化较小,植被覆盖变化从中部向外逐渐变小。在自然保护区内植被覆盖保持良好状态;矿产开发活动区及其周围草地受到破坏,植被覆盖下降;城镇用地的扩张对周边环境植被覆盖变化的影响较小。

(2) 气候暖干化是植被覆盖变化的基本驱动力,人为影响是导致植被覆盖退化的主要原因。研究区中部人为活动最为活跃,这也是植被覆盖变化及敏感性存在的主要原因。畜牧量过载、矿产资源开发等会导致草地退化;控制畜牧量、生态建设工程等人为干涉起到了保护和恢复草地资源的作用。

(3) 预测 2025 年研究区植被覆盖将持续增长,中、高植被覆盖占研究区面积绝大部分,植被覆盖保持恢复状态。

本文在分析气候因素、人为因素对生态环境的影响时采用各因素及 FVC 平均数值进行相关系数计算,其样本量较少,具有一定的不确定性;接下来的研究中应寻找更为精确的方法。虽然 2025 年预测结果显示研究区植被覆盖呈持续恢复状态,但中、高植被覆盖面积比例为 73.5%,相较于 2017 年,仅上升了 5.54%;年植被覆盖度均值也仅从 0.538 变为了 0.562,增长幅度并不大,恢复较为缓慢。

中国高度重视生态环境问题。研究区作为中国北方典型的干旱—半干旱草原区,其研究结论可为相关地区开展生态环境工程提供一定的参考依据。建议相关地区持续绿水青山就是金山银山的发展理念,继续发挥主观能动性,加大生态环境建设力度,并对草原区内矿产开发活动进行严把关,加强废弃矿区的植被覆盖恢复工作,努力恢复及保护草地资源,以期早日建成中国北方重要的生态安全屏障。

[参 考 文 献]

- [1] 杭玉玲,包刚,包玉海,等. 2000—2010 年锡林郭勒草原植被覆盖时空变化格局及其气候响应[J]. 草地学报, 2014, 22(6): 1194-1204.
- [2] Wang Zhan, Deng Xiangzheng, Song Wei, et al. What is the main cause of grassland degradation: A case study of grassland ecosystem service in the Middle-South Inner Mongolia[J]. *Catena*, 2017, 150: 100-107.
- [3] Zhou Wei, Yang Han, Huang Lu, et al. Grassland degradation remote sensing monitoring and driving factors quantitative assessment in China from 1982 to 2010[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 83: 303-313.
- [4] 贾若楠,杜鑫,李强子,等. 近 15 年锡林郭勒盟植被变化时空特征及其对气候的响应[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(5): 47-56.
- [5] 张圣微,赵鸿彬,张发,等. 基于 MODIS NDVI 的锡林郭勒草原近 10 年的时空动态[J]. 草业科学, 2014, 31(8): 1416-1423.
- [6] 杨强,王婷婷,陈昊,等. 基于 MODIS EVI 数据的锡林郭勒盟植被覆盖度变化特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 191-198, 315.
- [7] 范娜,谢高地,张昌顺,等. 2001 年至 2010 年澜沧江流域植被覆盖动态变化分析[J]. 资源科学, 2012, 34(7): 1222-1231.
- [8] Yang Yue, Wang Zhaoqi, Li Jianlong, et al. Comparative assessment of grassland degradation dynamics in response to climate variation and human activities in China, Mongolia, Pakistan and Uzbekistan from 2000 to 2013[J]. *Journal of Arid Environments*, 2016, 135: 164-172.
- [9] 张韵婕,桂朝,刘庆生,等. 基于遥感和气象数据的蒙古高原 1982—2013 年植被动态变化分析[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(5): 1022-1030.
- [10] 温小乐,李洋,林征峰. 海岛建设引发的植被覆盖度变化的遥感分析[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(2): 273-280.
- [11] 陈桃,包安明,何大明. 基于 MODIS NDVI 的攀枝花市植被覆盖变化及其驱动力[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(8): 1847-1857.
- [12] 巴图娜存,胡云锋,艳燕,等. 1970 年代以来锡林郭勒盟草地资源空间分布格局的变化[J]. 资源科学, 2012, 34(6): 1017-1023.
- [13] 马梅,张圣微,魏宝成. 锡林郭勒草原近 30 年草地退化的变化特征及其驱动因素分析[J]. 中国草地学报, 2017, 39(4): 86-93.
- [14] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1255-1268.
- [15] 张戈丽,徐兴良,周才平,等. 近 30 年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 47-58.
- [16] 程先富,张方方,邓良,等. 安徽省霍山县植被覆盖度动态变化及预测[J]. 水土保持通报, 2014, 34(4): 104-109.
- [17] 张丽,何晓旭,魏鸣. 基于 NDVI 的淮河流域植被覆盖度动态变化[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(S1): 51-56.
- [18] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等. 密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J]. 资源科学, 2004, 26(4): 153-159.
- [19] 田海静,曹春香,戴晟懋,等. 准格尔旗植被覆盖度变化的时间序列遥感监测[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(1): 126-133.

减少入湖污染物总量;同时,加强监测,研究沙湖的水环境变化规律,防止发生水华等突发性水污染事件。

[参 考 文 献]

- [1] Phillips G, Kelly A, Pitt J, et al. The recovery of a very shallow eutrophic lake, 20 years after the control of effluent derived phosphorus[J]. *Freshwater Biology*, 2010,50(10):1628-1638.
- [2] Guo L. Ecology: Doing battle with the green monster of Taihu Lake[J]. *Science*, 2007,317(5842):1166-1166.
- [3] Xu Fuli, Tao Shu, Dawson R W, et al. Lake ecosystem health assessment: indicators and methods[J]. *Water Research*, 2001,35(13):3157-3167.
- [4] Yu Tao, Zhang Yuan, Wu Fengchang, et al. Six-decade change in water chemistry of large freshwater lake Taihu, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013,47(16):9093-9101.
- [5] 何德进,邢友华,姜瑞雪,等.东平湖水体中氮磷的分布特征及其富营养化评价[J]. *环境科学与技术*, 2010,33(8):45-48,61.
- [6] Baulch H M. Asking the right questions about nutrient control in aquatic ecosystems[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013,47(3):1188-1189.
- [7] 张晟,李崇明,郑坚,等.三峡水库支流回水区营养状态季节变化[J]. *环境科学*, 2009,30(1):64-69.
- [8] 金相灿.湖泊富营养化控制和管理技术[M].北京:化学工业出版社,2001.
- [9] 王霞,吕宪国,闫伯茹,等.基于富营养化阈值的松花湖水环境容量分析[J]. *湖泊科学*, 2006,18(5):503-508.
- [10] 郝芳华.流域水质模型与模拟[M].北京:北京师范大学出版社,2008.
- [11] 罗燕珠,曠向宁.宁夏沙湖历年水质变化趋势分析[J]. *水土保持通报*, 2011,31(5):246-249.
- [12] 鲁小珍,刘茂松,胡海波,等.宁夏沙湖风景区的生态环境问题与对策[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2001,25(3):89-92.
- [13] 任学蓉,郎勇设,金辉.沙湖水体富营养化评价及防治对策[J]. *干旱区资源与环境*, 2007,21(2):118-122.
- [14] 赵红雪,邱小琮,杨艳梅,等.宁夏沙湖水体富营养化分析与评价[J]. *湖北农业科学*, 2010,49(10):2414-2417.
- [15] 陈珂,张健,李娇,等.宁夏平罗沙湖水体富营养化变化特征分析及防治对策[J]. *宁夏农林科技*, 2016,57(11):56-58,63.
- [16] 张小东.福建省棉花滩水库富营养化状况评价及分析[J]. *水生态学杂志*, 2012,33(5):20-24.
- [17] 王明翠,刘雪芹,张建辉.湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. *中国环境监测*, 2002,18(5):47-49.
- [18] 金相灿.中国湖泊环境[M].北京:海洋出版社,1995.
- [19] 中国标准化管理委员会,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T25173-2010 水域纳污能力计算规程[S].北京:中国标准出版社,2010.
- [20] 逢勇,陆桂华.水环境容量计算理论及应用[M].北京:科学出版社,2010.
- [21] 国家环境保护总局,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 3838-2002 地表水环境质量标准[S].北京:中国标准出版社,2002.
- [22] 于凤存,方国华,徐佳,等.中小型湖库型饮用水水源地污染负荷总量控制探讨[J]. *水文*, 2015,35(4):42-46,19.
- [23] Martin J R, Keller C H, Jr C R, et al. Long-term performance summary for the Boot Wetland treatment system[J]. *Water Science & Technology*, 2001,44(11/12):413-420.
- [24] 刘信安,湛敏,马艳娥.三峡库区流域藻类生长与营养盐吸收关系[J]. *环境科学*, 2005,26(4):95-99.
- [20] 闫萧萧,李晶,杨震.2000—2016年陈巴尔虎旗植被覆盖度时空变化遥感动态监测[J]. *中国农业大学学报*, 2018,23(06):121-129.
- [21] 李丽丽,王大为,韩涛.2000—2015年石羊河流域植被覆盖度及其对气候变化的响应[J]. *中国沙漠*, 2018,38(5):1108-1118.
- [22] 王良玉,杜会石.近35年松嫩沙地风沙—植被动态演变及模拟预测[J]. *水土保持研究*, 2018,25(4):380-385.
- [23] 赵建军,张洪岩,乔志和,等.基于CA-Markov模型的向海湿地土地覆被变化动态模拟研究[J]. *自然资源学报*, 2009,24(12):2178-2186.
- [24] 郑青华,罗格平,朱磊,等.基于CA-Markov模型的伊犁河三角洲景观格局预测[J]. *应用生态学报*, 2010,21(4):873-882.
- [25] 邢龙飞,黄超,雷少刚,等.锡林浩特市胜利矿区近30a植被覆盖度变化研究[J/OL]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2019(03):61-69.
- [26] 洪园园,春风,包玉海,等.近57年锡林浩特市和阿巴嘎旗气温变化特征比较分析[J]. *草原与草业*, 2015,27(3):15-21.
- [27] 焦全军,付安民,张肖,等.基于MODIS数据的锡林郭勒草原植被覆盖变化及驱动因子分析[J]. *北京工业大学学报*, 2017,43(5):659-664.
- [28] 赵汝冰,肖如林,万华伟,等.锡林郭勒盟草地变化监测及驱动力分析[J]. *中国环境科学*, 2017,37(12):4734-4743.
- [29] 胡碧松,张涵玥.基于CA-Markov模型的鄱阳湖区土地利用变化模拟研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2018,27(6):1207-1219.

(上接第 256 页)