

# 生态系统恢复工程对康平地区生态系统格局的影响

李虹<sup>1</sup>, 朱洪波<sup>2</sup>, 王钟书<sup>3</sup>, 宁新元<sup>4</sup>, 王烽旭<sup>2</sup>

(1.沈阳大学师范学院,沈阳 110000;2.辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院,辽宁 阜新 123000;  
3.中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100000;4.盘锦华发国际学校,辽宁 盘锦 124000)

**摘要:** 为了对自 1999 年起辽宁省沈阳市康平县实施的生态系统恢复工程的成效进行评估,利用多期 Landsat 影像解译了康平地区陆表生态系统时空分布特征;利用气候要素回归分析、生态系统转移矩阵以及生态系统综合人类扰动指数等研究方法,对康平地区自 1984 年以来的陆表生态系统格局进行了研究,特别是对生态系统恢复工程实施 20 年来的生态系统时空变化规律进行了探索,并分析了其演变的驱动力机制。结果表明:(1)1999—2020 年康平地区的生态系统格局发生显著变化,主要表现为沙地面积占比减少 35.391%,耕地面积占比减少 6.240%,林地面积大幅增加。(2)通过对气候要素回归分析得出,研究时间段内康平地区气候整体转湿,并且在生态系统恢复工程实施后尤为显著,适合陆表植被生长和恢复。研究最终得出,康平地区生态系统格局演变的主要驱动力为该地区自上世纪末实施的一系列生态系统恢复工程,辅助驱动力为该地区年起沙风天数减少和气候转湿的结论。

**关键词:** 生态系统格局; 康平; 遥感; 生态系统恢复工程

**中图分类号:** P237.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2022)01-0095-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.01.014

## Impact of Ecosystem Restoration Project on Ecosystem Pattern in Kangping Area

LI Hong<sup>1</sup>, ZHU Hongbo<sup>2</sup>, WANG Zhongshu<sup>3</sup>, NING Xinyuan<sup>4</sup>, WANG Fengxu<sup>2</sup>

(1. Normal College, Shenyang University, Shenyang 110000; 2. College of Surveying, Mapping and Geographical Sciences, Liaoning University of Engineering and Technology, Fuxin, Liaoning 123000; 3. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100000; 4. Panjin Huafa International School, Panjin, Liaoning 124000)

**Abstract:** In order to evaluate the effectiveness of the ecosystem restoration project implemented in Kangping County, Shenyang City, Liaoning Province, since 1999, the temporal and spatial distribution characteristics of the land surface ecosystem in Kangping area were interpreted by using multi-period landsat images. The pattern of the land surface ecosystem in Kangping area since 1984 were studied by using the research methods such as the regression analysis of climate elements, the ecosystem transfer matrix and the comprehensive human disturbance index of the ecosystem. In particular, the temporal and spatial changes of the ecosystem in the past 20 years since the implementation of the ecosystem restoration project were explored and the driving force mechanism of its evolution was analyzed. The results showed that: (1) During 1999—2020, the ecological system pattern of Kangping area changed significantly, which was mainly reflected in reduction of the proportion of sandy land by 35.391%, reduction of the proportion of cultivated land by 6.240%, and a substantial increase in the area of forest land. (2) Through regression analysis of climatic elements, we found that the overall climate in Kangping area became wet during the study period, especially after the implementation of the ecosystem restoration project, which was suitable for the growth and restoration of land surface vegetation. Finally, it was concluded that the main driving force for the evolution of the ecological system pattern of Kangping area was a series of ecosystem restoration projects implemented in the region since the end of the last century, and the auxiliary driving force was the decrease of the days of the sand-driving wind per year the climate humidification in the region.

收稿日期: 2021-07-02

资助项目: 国家自然科学基金项目(42071343)

第一作者: 李虹(1963—), 女, 辽宁沈阳人, 理学硕士, 教授, 主要从事区域地理研究。E-mail: lhxt10@163.com

通信作者: 朱洪波(1995—), 男, 辽宁沈阳人, 博士研究生, 主要从事遥感信息智能识别与提取研究。E-mail: zhb1406681476@163.com

**Keywords:** ecosystem pattern; Kangping; remote sensing; ecosystem restoration project

土地是人类生存和发展的重要保障。从上个世纪 90 年代开始,国际学术界和相关应用部门主要从土地覆被变化、土地覆被变化模型和土地利用机制 3 个方面对土地利用问题进行研究<sup>[1]</sup>。史利江等<sup>[2]</sup>通过采用遥感影像分析上海和重庆城区的土地利用结构及其驱动因子得出,经济发展是土地利用发生变化的主要驱动力的结论;Yuan 等<sup>[3]</sup>通过对鄱阳湖地区土地利用变化的分析,采用景观度量和等效系数表法分析该地区历史时期及未来时期生态服务功能的变化情况认为,鄱阳湖地区近年来土地利用呈碎片化的趋势,生态系统总服务价值下降;刘亚群等<sup>[4]</sup>以人类干预强度及生态系统主导服务功能为主线,构建大规模生态系统分类体系,并对我国近 20 年的生态系统格局及其时空演变特征进行分析;冯彦博<sup>[5]</sup>研究表明,城市化进程加快是导致陕西省“十二五”期间建筑用地增加的主要驱动力因子;贾菊桃等<sup>[6]</sup>通过对西北地区多年遥感影像解译,基于土地转移矩阵等方法对西北地区各生态系统类型变化进行研究提出,西北地区草地为主要转入用地,裸地为主要转出用地,西北地区生态环境向适宜植被生长和恢复方向转变;苏明伟等<sup>[7]</sup>在 2010—2020 年陕西省 LUCC 动态变化分析中认为,土地资源受人类影响较大;刘吉平等<sup>[8]</sup>研究表明,三江平原地区土地利用景观格局发生明显的改变是受自然因素和人为因素两方面的影响;通过对气候变化、人类活动、林地砍伐以及土地利用变化之间的关系进行研究;Delacote 等<sup>[9]</sup>研究认为,林地砍伐与土地利用变化的主要驱动力为人类活动,气候变化为诱因及辅助驱动力。

随着我国地区经济和工业化的迅速发展,各地区对土地的需求日益增大。但是由于生态环境存在区域差异,不同土地类型的使用和分布都对不同的生态环境有着不同程度的影响<sup>[10]</sup>。为缓解土地利用与生态环境问题之间的矛盾,各级政府于上世纪 90 年代末开始对相关地区实施一系列的生态系统恢复工程。这些工程的实施会对不同地区的生态系统格局产生不同程度的影响<sup>[11]</sup>。因此,本文通过研究康平地区生态系统格局的时空变化规律,客观地对康平地区生态系统恢复现状进行评估,进而反映生态系统恢复工程的成效,并可为生态系统恢复工程的实施提供理论依据及实际指导建议。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

康平地区位于 42°31′—43°02′N, 122°45′—123°

37′E,中心经纬度(123°19′29″E,42°44′28″N);地处辽宁省西北边陲,沈阳市北缘,南连法库县,西南接阜新市彰武县,东与铁岭市昌图县隔辽河相望,西北与内蒙古自治区科尔沁左翼后旗接壤,西南部为医巫闾山余脉,东部为辽河冲积平原,西北部为科尔沁沙地。区域内平均年降水量 615 mm,降水主要集中于夏季,以 7,8 月最为集中。夏季降水量约占全年降水总量的 65.27%,而冬季降水量仅占全年的 2.76%。蒸发量年际变化大。独特的地理位置和气候条件使其形成了别具一格的自然地理环境,进而为沙漠的扩张和萎缩提供了环境条件。

### 1.2 研究资料

研究时间自 1984—2020 年,本文采用 4 个时相的 landsat4-5 TM、landsat7 和 landsat8 为数据,影像分辨率为 30 m,数据均为植物生长季节(6—7 月)云量<10%的遥感数据,经辐射定标、几何校正、大气校正<sup>[12]</sup>等预处理工作,结合研究区生态恢复工程实际情况,将土地利用类型分为耕地、林地、草地、沙地、建筑用地和水体<sup>[13]</sup>。

### 1.3 研究方法

1.3.1 生态系统面积变化 生态系统的遥感解译分为监督分类和非监督分类。非监督分类实现较为简单,其不需要事前了解待分类样区信息,仅依靠遥感影像中不同地物在特征空间上的差异进行分类,分类精度较低;监督分类是在遥感影像中均匀地选取一些训练样本,在这些样本区域中定义一个特定的分类函数。本文选用的是基于机器学习的支持向量机分类函数(support vector machine, SVM),并按照这个标准对整幅 landsat 图像进行分类。在对研究区的多年卫星影像分类解译后,提取研究区各生态系统面积数据及其空间分布规律,通过分析研究区多年各生态系统的空间分布,掌握其时空分布规律。

1.3.2 生态系统转移矩阵 由于马尔可夫过程是一个典型的随机过程,因此,用马尔可夫过程来表示生态系统变化过程<sup>[14]</sup>。本研究采用马尔可夫转移矩阵,分析康平地区不同生态系统类型之间的生态系统转移矩阵。研究旨在确定各生态系统的时空发展趋势,达到预测未来发展趋势为目的。

$$p_{ij}(n) = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $p_{ij}$ 表示地类由  $i$  转化为  $j$ ,即某一地类单元由

研究初始时刻的  $i$  类转化为研究终止时刻的  $j$  类。

1.3.3 驱动力因子分析 人类活动对不同生态系统的扰动程度不同。人类对未利用地的扰动程度较低,对耕地等扰动程度高<sup>[15]</sup>。通过人类扰动指数评价人类活动对自然生态系统的影响程度<sup>[16]</sup>,将人类扰动指数分为 4 级。其中盐碱地、沼泽地等自然未利用地,人类活动对其扰动程度极低,扰动分级指数为 0;林地、草地、湿地等自然再生利用地,扰动分级指数为 1;耕地等人为再生利用地扰动分级指数为 2,城市建设用地等人工表面,人类活动对其扰动程度最高,扰动分级指数为 3。对某一区域而言,多数为不同扰动指数的多种生态系统共存,因此,根据不同生态系统所占比例进行加权求和<sup>[17]</sup>,形成了在 0~3 内分布的生态系统综合人类扰动指数,方法为:

$$D = \frac{\sum_{i=0}^3 A_i \times P_i}{3 \sum_{i=1}^n P_i} \quad (2)$$

式中: $A_i$  是第  $i$  级的扰动指数; $P_i$  是某种地类面积占研究区(康平)面积的百分比(%)。

生态系统格局演变是多驱动力共同作用的结果,在获取各生态系统面积变化和生态系统转移矩阵的基础上,利用回归分析法分析各驱动力因子对生态系统格局演变的影响强度,表明驱动力因子与生态系统格局演变的显著关系。本文采用线性回归法(linear regression)<sup>[14]</sup>利用最小二乘法原理获取最佳拟合线,

判断各驱动力因子对生态系统格局演变的影响强度。

## 2 结果与分析

### 2.1 生态系统类型变化分析

土地利用变化是人地系统耦合作用的产物,在短时间内,土地利用类型发生变化的主要影响因素是人类活动<sup>[18]</sup>。为了更直观地表示研究期间康平地区各生态系统之间的时空变化情况,本文利用 ENVI 对 1984—2020 年的 landsat 影像数据以 5 年为时间间隔做生态系统格局的监督分类,并基于 ArcGIS 10.5 分别对 1984—2020 年、1984—1999 年、1999—2020 年土地利用数据进行叠加处理得到 3 个时期的土地利用变化转移矩阵。由表 1 可知,研究区 36 年间耕地大量减少,林地、建设用地大幅增加,反映出研究区在 1984—2020 年间,城市化快速推进,植被覆盖率显著增加。其中,研究区在 1984—1999 年期间沙地面积显著增多,在 1999—2020 年期间呈减少趋势,表明生态系统恢复工程促使研究区生态系统格局发生改变,沙地面积减少,林地、草地面积增加。同时,由 1984—1999 年和 1999—2020 年土地利用类型转移矩阵(表 2、表 3)可知,林地和草地 2 种生态系统面积占比持续增加,耕地在 2 个时间段均有较大幅度的减少,主要转化为草地和林地。1999—2020 年沙地减少,减幅 35.391%,主要转化为林地,林地增幅达 226.778%。这一改变与退耕还林工程、沙地经济林工程等生态系统恢复工程在康平地区的实施(图 1)相吻合。

表 1 1984—2020 年康平地区土地利用变化转移矩阵

单位: km<sup>2</sup>

1984 年	2020 年						
	水体	林地	耕地	建设用地	草地	沙地	合计
水体	42.64	6.59	13.47	0.99	1.26	3.33	68.29
林地	0.39	11.37	460.47	0.17	2.18	1.33	475.92
耕地	15.28	17.91	895.56	9.28	33.52	78.43	1049.98
建设用地	11.92	8.46	149.22	8.59	8.10	14.90	201.19
草地	1.20	7.63	138.22	0.91	9.70	11.96	169.65
沙地	1.56	7.77	139.37	0.29	10.56	42.00	201.56
合计	73.00	59.73	1796.30	20.24	65.34	151.98	
面积变化/km <sup>2</sup>	-4.71	416.19	-746.32	180.95	104.31	49.58	
增幅/%	-6.450	696.786	-41.548	894.022	159.642	32.623	

表 2 1984—1999 年康平地区土地利用变化转移矩阵

单位: km<sup>2</sup>

1984 年	1999 年						
	水体	林地	耕地	建设用地	草地	沙地	合计
水体	45.18	7.73	33.43	1.64	2.84	5.28	96.11
林地	4.57	26.42	96.34	0.87	12.05	5.37	145.64
耕地	7.59	11.38	1287.61	9.76	27.78	65.15	1409.27
建设用地	1.65	0.79	32.33	4.78	1.84	5.66	47.05
草地	11.13	8.62	111.83	2.37	11.55	11.05	156.55
沙地	2.87	4.78	234.75	0.81	9.28	59.47	311.97
合计	73.00	59.73	1796.30	20.24	65.34	151.98	
面积变化/km <sup>2</sup>	23.11	85.91	-387.04	26.81	91.22	159.99	
增幅/%	31.660	143.844	-21.546	132.469	139.613	105.271	

表 3 1999—2020 年康平地区土地利用变化转移矩阵

单位: km<sup>2</sup>

1999 年	2020 年						合计
	水体	林地	耕地	建设用地	草地	沙地	
水体	53.92	4.03	3.72	2.49	4.09	0.04	68.29
林地	0.57	27.17	256.79	0.09	0.69	140.62	425.92
耕地	17.10	58.73	1028.65	22.89	109.40	13.21	1321.33
建设用地	19.74	10.79	88.03	19.51	27.64	14.12	179.84
草地	1.15	29.67	100.51	1.87	11.28	25.17	169.65
沙地	3.62	15.25	60.21	0.20	3.46	118.81	201.56
合计	96.11	145.64	1409.27	47.05	156.55	311.97	
面积变化/km <sup>2</sup>	-27.82	280.28	-87.94	132.79	13.10	-110.41	
增幅/%	-28.946	192.447	-6.240	282.232	8.368	-35.391	

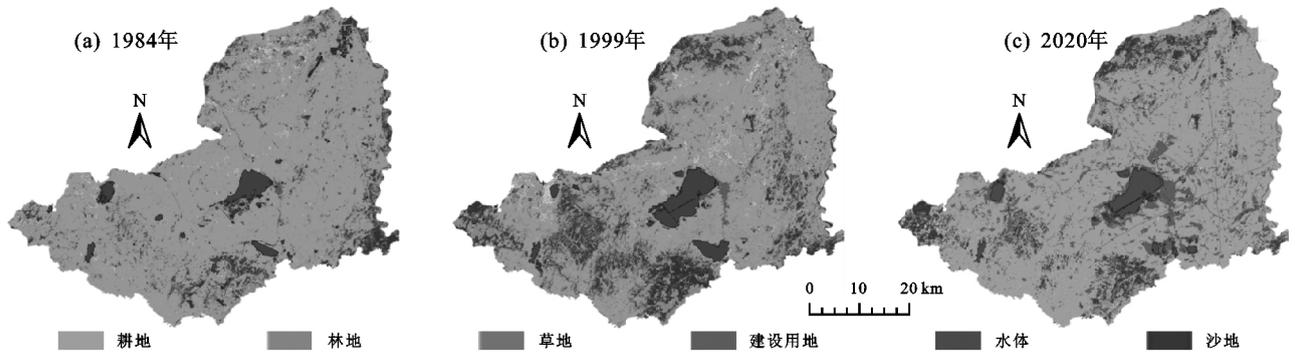


图 1 康平地区多年生态系统分布

## 2.2 生态格局变化驱动力分析

2.2.1 气候变化分析 干燥度指数( $K$ )是蒸发量与降水量的比值,反映一个地区某一时期水分的收支情况<sup>[19]</sup>。不同的干燥度指数指示了不同的干湿气候区,对应了不同的自然景观。干燥度指数  $K < 1.00$  对应的干湿气候区为湿润区,自然景观对应森林;  $1.00 \leq K \leq 1.49$

对应的干湿气候区为半湿润区,自然景观对应森林草原;  $1.50 \leq K \leq 3.99$  对应的干湿气候区为半干旱区,自然景观对应草原荒漠;  $K \geq 4.00$  对应的干湿气候区为干旱区,自然景观对应荒漠。干燥度年际变化很大,由图 2 可知,1998 年的干燥度指数为 2.26,呈现出半干旱特点; 2001 年的干燥度指数为 4.23,呈现出干旱特点。

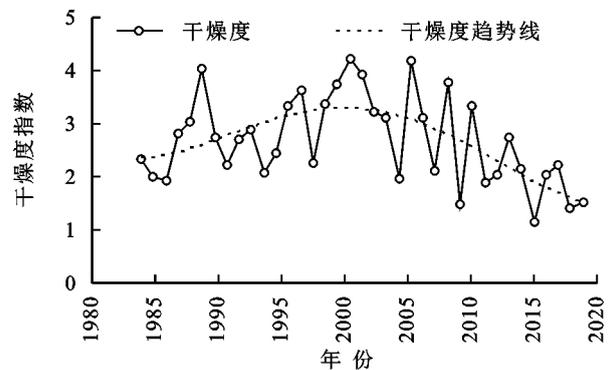
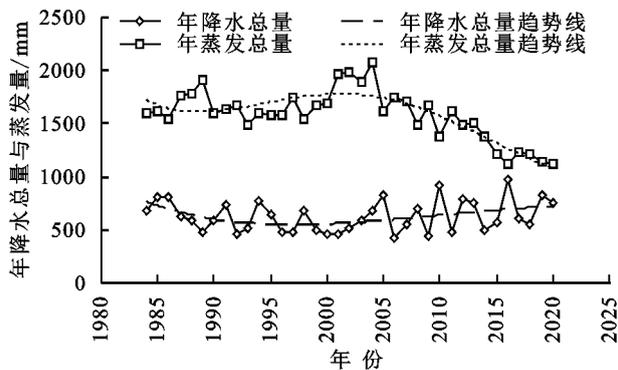


图 2 1984—2020 年康平地区气候干湿程度的年际变化

康平地区 1984—2020 年气候干燥程度的主体变化趋势是转湿,以 2001 年为节点可以主要划分为 2 个阶段。

(1)转干期:2001 年以前,年降水量主体呈现递减趋势,蒸发量则先减后增,并在 21 世纪初达到峰值。年蒸发量的增加要略滞后于年降水量,故干燥度趋势线的峰值出现在 2001 年。这一时期气候由半干旱向干旱发展,为沙地的扩张提供了一定的条件。

(2)转湿期:2001 年以后,年降水量增多,年蒸发

量的降幅增大,波动开始减小,主体趋于稳定。干燥度的降幅明显,气候由干旱迅速向半湿润转变,为沙地面积的缩小提供了有利条件。干燥度整体变化幅度趋于平稳,与年蒸发量变化的耦合程度较高。

起沙风是风速达到一定大小,可以使地表沙质物质由静止开始运动的风。在  $0.1 \text{ mm} \leq \text{粒径}(d) \leq 0.25 \text{ mm}$  的干燥裸露沙质地表,风速需要达到  $4 \sim 5 \text{ m/s}$ <sup>[20]</sup>。起沙风吹过裸露的地表时可以使沙质颗粒物发生悬移、跃移、推移,进而形成风沙流,扩大沙漠规模。全年中单日

平均风速大于等于起沙风风速的天数为年起沙风天数。起沙风天数越多,越有利于沙漠的扩张。

从图 3 可以看出,康平县的起沙风天数变化主体可以概括为 4 个特征阶段。第 1 阶段为 1984—1990 年,平均起沙风天数约为 116 天,约占全年的 32%;第 2 阶段为 1991—1995 年,平均起沙风天数约为 91

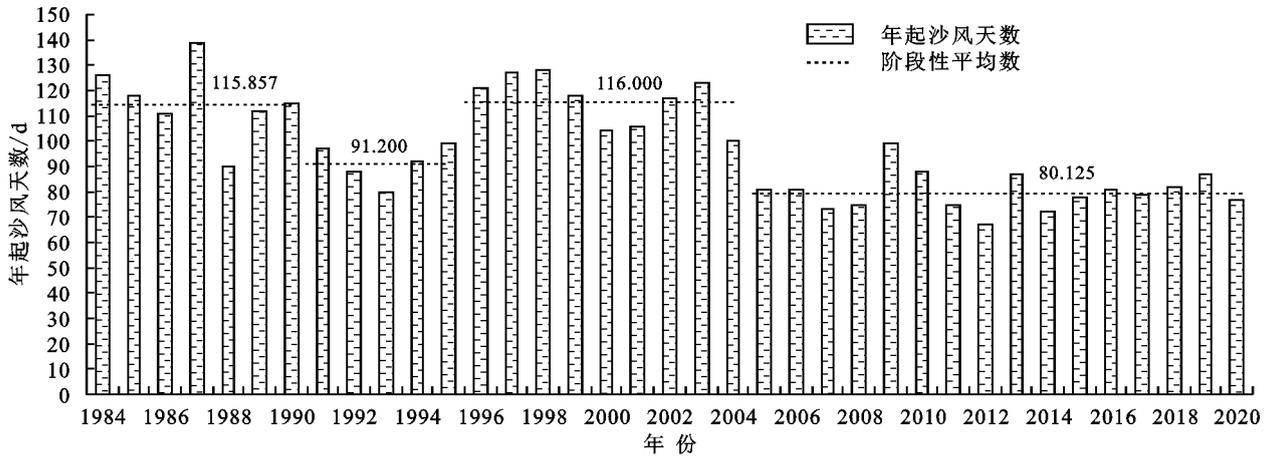


图 3 1984—2020 年康平地区年起沙风天数变化

1984—2020 年康平地区干燥度指数、年起沙风天数与沙地面积变化见表 4。根据土地利用类型变化转移矩阵和回归分析法,探究干燥度指数、起沙风天数与沙地面积之间的相关性,分析气候因子对生态系统格局变化的影响。

$$y = 0.0087x + 0.0412 \quad (3)$$

$$y = 0.4556x + 33.396 \quad (4)$$

干燥度指数与沙地面积的相关系数为  $r = 0.291$ , 2 个变量之间虽呈现线性正相关关系,但由于相关系数太小,干燥度指数虽是影响沙漠进退的因素之一,但并非气候层面的主要因素,故不是诱发自然景观和土地利用类型发生转变的主要因素。起沙风天数与沙地面积的相关系数为  $r = 0.609$ , 2 个变量之间线性相关系数较大,故年起沙风天数为沙地面积变化气候层面的主要因素,但并非生态系统格局演变的主要驱动力。

表 4 1984—2020 年康平地区干燥度指数、年起沙风天数与沙地面积变化

指标	1984 年	1999 年	2010 年	2020 年
沙地面积/km <sup>2</sup>	159.99	311.97	244.31	201.56
干燥度指数	2.35	3.37	1.49	0.97
年起沙风天数/d	117	177	132	57

2.2.2 人类活动扰动分析 1984—2020 年康平地区人类扰动程度呈现下降趋势,人类活动扰动程度的变化量为  $-0.075$ 。自 1999 年以来,康平地区将退耕还林工程与沙地经济林工程相结合,实现农业转型升级,扰动级别较高的耕地向扰动程度较低的林地转化是人类扰动指数降低的主要原因。同时,沙地经济林

天,约占全年的 25%,较第 1 阶段大幅减少,但持续时间较短,不具有持久性;第 3 阶段为 1996—2004 年,平均起沙风天数为 116 天,约占全年的 32%;第 4 阶段为 2005—2020 年,平均年起沙风天数为 80 天,约占全年的 22%,较 2005 年以前明显减少,且年际变化趋于平稳。

工程等一系列生态系统恢复工程在康平地区实施使耕地大幅转化为林地,成为当地生态系统时空变化的主要驱动力。

综上所述,康平地区多年气候变化虽有波动,总体发展趋势有利于地表植被生长和恢复,且在生态系统恢复工程后变化显著,说明康平地区生态系统格局变化的主要驱动力为生态系统恢复工程的实施,气候变化为辅助驱动力。

### 3 讨论

康平地区生态系统格局的变化是气候和生态系统恢复工程共同作用的结果。在研究区内,气候因子对生态系统格局的变化影响较小,生态系统恢复工程的实施为该地区生态系统格局变化的主要驱动力。本文通过对研究区 1984—2020 年降水量、蒸发量、干燥度指数以及年起沙风天数变化趋势分析表明,研究区气候逐渐向适宜植被恢复的方向转变。通过对研究区 20 年来生态系统格局的时空变化,以及对生态系统转移矩阵的分析表明,1999—2020 年康平地区沙地、耕地面积减少,林地面积大幅增加,生态系统格局发生显著变化。而林地面积的增加,势必会加大近地面大气与地表的摩擦系数,削弱风力,使年起沙风天数减小,进一步促进地表植被恢复,使更多土地利用类型向宜林地发展,最终形成良性循环。通过对生态系统综合人类扰动指数分析表明,人类活动导致生态系统格局演变,引起生态系统综合人类扰动指数升高,这在卓静等<sup>[11]</sup>、李华林<sup>[12]</sup>、赵国松等<sup>[21]</sup>的研究中已分别得到证实。事实上,人类活动是一个多种因素影响的共同结果。于博<sup>[22]</sup>提出,康平地区上个世纪

的人为破坏使原有的林地、草地生态系统转化为耕地生态系统,耕地生态系统涵养水源能力较差,易造成水土流失,生态环境较为脆弱。同时,采挖中草药以及砍伐薪柴,一定程度上破坏了康平地区的地表植被覆盖,加剧了当地生态环境的恶化。建议通过构建人居环境保护区、生态农业保护区、生态工程治理区以及生态修复保育区等生态系统恢复工程改善研究区生态系统格局现状。刘瀛<sup>[23]</sup>在对康平地区沙化土地监测与动态分析中提出,康平地区通过合理植树、种草等生态系统恢复工程使部分半固定沙地植被覆盖度增加,并通过加大对沙区植被恢复力度,积极开展植树种草、封山育林、合理灌溉、退耕还林等措施,使康平地区沙化耕地减少,沙化草地、林地增加。戴闻书等<sup>[24]</sup>提出,康平地区生态环境脆弱,水土流失严重。当地政府把生态建设作为经济社会发展的重点,加强了“三北”防护林和辽蒙边界阻沙带工程建设,扩大了封山育林面积,并严格控制非农建设占用耕地、优化与集约配置建设用地。同时,当地政府建立和完善草原保护制度,扩大生态保护区和草场保护区面积,实施草原沙化治理工程与河道生态工程和小流域治理工程相结合,加强了水土保持,减少了水土流失。

生态系统恢复工程的实施作为人类活动的主要部分是康平地区 20 年来生态系统格局向森林草原方向转变的主要驱动力,年起沙风天数的减少和气候的转湿为辅助驱动力。表现为研究区的耕地、沙地减少,林地和草地增加,其中,耕地大幅度减少、林地大幅增加。但本文并未实现驱动因子各自贡献率的量化评估。本文通过对康平地区生态系统格局的演变的研究,探索其时空变化规律,建议在“三北”防护林工程、退耕还林工程、沙地经济林等生态系统恢复工程的基础上,以减少土地沙化和控制水土流失为基本点,以康平地区小流域为生态系统恢复工程实施单元,针对不同小流域的实际生态系统格局状况,除建设用地外将其划分为生态农业保护区和生态修复保育区。生态农业保护区包括耕地、草地 2 种生态系统,生态修复保育区包括林地、水体、沙地 3 种生态系统。生态农业保护区通过保护湿地、培育草地、构建人工湿地等方式建立生态系统隔离带,以减少陆源污染进入水体,净化河湖水质,并促进低产耕地及坡顶耕地退耕还草,提高林草覆盖率。生态修复保育区通过封山育林培育小流域植被,坚持适地适树的原则,采用油松、侧柏等营造水保林,并充分利用生态系统自我修复功能改善环境。陆表生态系统格局的变化会促使生态质量和生态服务价值发生一定程度的改变,本文因篇幅限制,该部分内容将另行研究加以论

述。最后,本文使用的遥感图像空间分辨率为 30 m,这一因素限制了生态系统空间分布数据的解译精度,会出现一定程度的解译误差,这一问题,随着未来高分影像的使用将得到很大程度的改善。

## 4 结论

康平地区生态系统格局发生变化的根本原因是“三北”防护林工程、沙地经济林工程以及退耕还林等生态系统恢复工程的实施。

随着退耕还林工程与沙地经济林工程的实施,人类活动扰动指数较高的耕地向人类活动扰动指数较低的林地转变。林地面积的扩大会增加近地面大气与地表的摩擦,减弱风力。起沙风的减少,沙地扩张速度放缓,更有利于生态系统恢复工程的实施。宜林地增多,沙地扩张速度进一步放缓,最终形成生态系统的良性循环。因此,气候因素成为该地区生态系统格局变化的辅助驱动力。

### 参考文献:

- [1] Meng N, Yang Y Z, Zheng H, et al. Climate change indirectly enhances sandstorm prevention services by altering ecosystem patterns on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(1): 1711-1724.
- [2] 史利江,王圣云,姚晓军,等.1994—2006 年上海市土地利用时空变化特征及驱动力分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(12): 1468-1479.
- [3] Yuan Z, Xu J J, Wang Y Q, et al. Analyzing the influence of land use/land cover change on landscape pattern and ecosystem services in the Poyang Lake Region, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(21): 27193-27206.
- [4] 刘亚群,吕昌河,傅伯杰,等.中国陆地生态系统分类识别及其近 20 年的时空变化[J]. *生态学报*, 2021, 41(10): 3975-3987.
- [5] 冯颜博.“十二五”期间陕西省土地利用变化分析[J]. *西部大开发(土地开发工程研究)*, 2020, 3(7): 53-58.
- [6] 贾菊桃,吴彩燕,张建香,等.2001—2013 年中国西北地区土地利用变化的时空格局分析[J]. *西南科技大学学报*, 2020, 33(3): 31-36, 42.
- [7] 苏明伟,张伟峰,杜鹃,等.2010—2020 年陕西省 LUCC 动态变化分析[J]. *湖北农业科学*, 2021, 60(5): 29-34.
- [8] 刘吉平,赵丹丹,田学智,等.1954—2010 年三江平原土地利用景观格局动态变化及驱动力[J]. *生态学报*, 2014, 34(12): 3234-3244.
- [9] Delacote P, Leblois A, Girard J. Agricultural households' adaptation to weather shocks in SubSaharan Africa: What implications for land-use change and deforestation? [J]. *Environment and Development Economics*, 2021, 26(1): 1-23.

- Soil Science, 2001, 52(1): 59-68.
- [10] Ma D H, Zhang J B, Horton R, et al. Analytical method to determine soil hydraulic properties from vertical infiltration experiments[J]. Soil Science Society of America Journal, 2017, 81(6): 1303-1314.
- [11] Brooks R H, Corey A T. Hydraulic properties of porous media[D]. Fort Collins: Colorado State University, 1964.
- [12] Ma D H, Zhang J B, Lu Y X, et al. Derivation of the relationships between Green-Ampt model parameters and soil hydraulic properties[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79(4): 1030-1042.
- [13] Ma D H, Zhang J B, Lai J B, et al. An improved method for determining Brooks-Corey model parameters from horizontal absorption[J]. Geoderma, 2016, 263: 122-131.
- [14] 王小燕, 蔡崇法, 李鸿, 等. 三峡库区碎石含量对紫色土容重和孔隙特征的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 379-386.
- [15] 党宏宇, 邵明安, 陈洪松, 等. 不同煤矸石厚度及位置对土壤水分入渗过程的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 62-66.
- [16] 吕刚, 王婷, 王韞策, 等. 辽西低山丘陵区坡地砾石含量及粒径对土壤入渗性能的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 86-92.
- [17] 司曼菲, 甘永德, 刘欢, 等. 土石混合介质碎石性质对土壤入渗和产流过程影响[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 59-63, 107.
- [18] Zhou B B, Shao M A, Shao H B. Effects of rock fragments on water movement and solute transport in a Loess Plateau soil [J]. Comptes Rendus-Géoscience, 2009, 341(6): 462-472.
- [19] 马晨雷, 戴翠婷, 刘窑军, 等. 砾石覆盖对紫色土坡面流水动力学参数的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 150-155, 161.
- [20] 杨艳芬. 土石混合介质入渗与干旱区滴灌葡萄生长发育特征试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010.
- [21] 王清, 张民, 王通. 不同石砾条件对土壤水分入渗的影响[J]. 湖南农业科学, 2012, 21(13): 43-47, 50.
- [22] 李源, 宋维峰, 马建刚. 中国西南水梯田土壤水分特性研究: 以哈尼梯田为例[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 160-169.
- [23] Lv J R, Luo H, Xie Y S. Effects of rock fragment content, size and cover on soil erosion dynamics of spoil heaps through multiple rainfall events [J]. Catena, 2019, 172: 179-189.
- [24] Qiu Y, Xie Z K, Wang Y J, et al. Influence of gravel mulch stratum thickness and gravel grain size on evaporation resistance[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 1908-1913.
- [25] Wang X Y, Li Z X, Cai C F, et al. Effects of rock fragment cover on hydrological response and soil loss from Regosols in a semi-humid environment in South-West China[J]. Geomorphology, 2012, 151: 234-242.
- (上接第 100 页)
- [10] 李秀芬, 蔡慧君, 金磊, 等. 辽西北土地利用动态变化及影响因素分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(3): 257-265.
- [11] 卓静, 朱延年, 何慧娟, 等. 生态恢复工程对陕北地区生态系统格局的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8627-8637.
- [12] 李华林. 塔里木河上游胡杨林遥感动态监测与分析[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
- [13] 吕志强, 庆旭瑶, 任玉芬, 等. 山地城市河流土地利用结构对水质的影响: 以重庆市为例[J]. 湖泊科学, 2016, 28(2): 319-327.
- [14] 钟国敏. 河南省典型市域土地利用变化及与土壤多样性的关联分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2013.
- [15] 徐增让, 邹秀萍. 羌塘高原自然保护地社会生态效果评价[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8743-8752.
- [16] 黄麟, 曹巍, 巩国丽, 等. 2000—2010 年中国三北地区生态系统时空变化特征[J]. 生态学报, 2016, 36(1): 107-117.
- [17] 王秀明, 苏耀明, 许乃中, 等. 广东南岭生态功能区系统服务功能与人为扰动因素研究[J]. 环境影响评价, 2020, 42(3): 52-56.
- [18] 肖思思, 吴春笃, 储金宇. 1980—2005 年太湖地区土地利用变化及驱动因素分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(23): 1-11.
- [19] 尚雪, 何钊全, 张铜会. 增强型植被指数时空变化特征及其驱动机理[J]. 森林与环境学报, 2020, 40(5): 478-485.
- [20] 胡光印, 董治宝, 张正偲, 等. 若尔盖盆地起沙风况与输沙势特征[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 20-24.
- [21] 赵国松, 刘纪远, 匡文慧, 等. 1990—2010 年中国土地利用变化对生物多样性保护重点区域的扰动[J]. 地理学报, 2014, 69(11): 1640-1650.
- [22] 于博. 康平县生态清洁小流域治理措施研究[J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(2): 179-181.
- [23] 刘瀛. 辽宁省康平县沙化土地监测与动态分析[J]. 防护林科技, 2020(12): 62-63, 81.
- [24] 戴闻书, 潘辉, 赵宏利. 浅谈康平县生态建设对土地保护和利用的作用[Z]. 沈阳市委、沈阳市人民政府: 沈阳市科学技术协会, 2011: 6.