生态工程对科尔沁沙地主要生态服务功能的影响

张 钤[1], 张方敏[1], 卢 琦[2], 李云鹏[3], 翁升恒[1], 韩典辰[1]

(1.南京信息工程大学 应用气象学院 气象灾害预报预警与评估协同创新中心/江苏省农业气象重点实验室, 江苏 南京 210044; 2.中国林业科学研究院 荒漠化研究所/沙漠林业试验中心, 北京 100091; 3.内蒙古自治区生态与农业气象中心, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘 要: [目的] 研究生态工程实施下科尔沁沙地主要生态服务功能的变化特征,为该区今后生态保护建设提供科学依据。[方法] 运用已有的生态服务评估方法定量评估了 2001—2018 年科尔沁沙地固碳量、水源涵养及水土保持服务功能的时空变化情况。[结果] ①科尔沁沙地土地利用类型主要以耕地、林地和草地为主,生态工程实施期间,林地、耕地面积分别增加 8 448 km^2,3 280 km^2,草地面积减少 12 639 km^2; ②科尔沁沙地固碳量稳步增长,林地和耕地的固碳量均增加,草地的固碳量减小,但草地固碳量依然最高; ③科尔沁沙地水源涵养量呈先增加后略微减少的趋势,所有土地类型中林地水源涵养量持续升高; ④科尔沁沙地水土保持量持续上升,约增加 1.38×10^7 t,林地水土保持量增加最显著。受地势的影响,区域水土保持总量呈西高东低的分布特征。[结论] 科尔沁沙地生态工程建设效果良好,创造了显著的生态效益。

关键词: 科尔沁; 生态工程; 固碳量; 水源涵养; 水土保持

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2021)05-0154-06 **中图分类号**: Q148, X171.1

文献参数: 张钤, 张方敏, 卢琦, 等.生态工程对科尔沁沙地主要生态服务功能的影响[J].水土保持通报, 2021,41(5):154-159.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.05.021; Zhang Qian, Zhang Fangmin, Lu Qi, et al. Effects of ecological construction projects on primary ecosystem services in Horqin sandy land [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(5):154-159.

Effects of Ecological Construction Projects on Primary Ecosystem Services in Horqin Sandy Land

Zhang Qian[1], Zhang Fangmin[1], Lu Qi[2], Li Yunpeng[3], Weng Shengheng[1], Han Dianchen[1]

(1.*Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu* 210044, *China*; 2.*Institute of Desertification Studies/Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing* 100091, *China*; 3.*Ecology and Agrometeorology Center of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia* 010051, *China*)

Abstract: [Objective] Change characteristics of the primary ecosystem services in Horqin sandy land under the implementation of ecological construction projects were studied in order to provide a scientific basis for future ecological protection and construction in this area. [Methods] The temporal-spatial changes of carbon sequestration, water source conservation, and soil conservation in this region from 2001 to 2018 were evaluated by using existing ecosystem service assessment methods. [Results] ① The land use types in Horqin sandy land were mainly farmland, forestland, and grassland. During the implementation of the ecological construction project, the area of forestland and farmland increased by 8 448 km^2 and 3 280 km^2 respectively, but the area of grassland decreased by 12 639 km^2. ② Carbon sequestration in this region increased steadily. Carbon sequestration of forestland and farmland increased, while that of grassland decreased. However, carbon sequestration of grassland was still the highest. ③ The amount of water conservation of this region first increased and then decreased slightly, but the amount of water conservation in forestland continued to increase. ④ The amount of soil conservation in Horqin sandy land increased continuously, with an increase of

收稿日期:2021-02-10 **修回日期**:2021-06-03

资助项目:科技部重大研发计划项目"多源气象资料融合技术研究与产品研制"(2018YFC1506606)。

第一作者:张钤(1998—),女(汉族),福建省三明市人,硕士研究生,研究方向为生态气象。Email:brilliant_qian@163.com。

通讯作者:张方敏(1983—),女(汉族),江苏省南京市人,博士,教授,主要从事生态气象研究。Email:fmin.zhang@nuist.edu.cn。

about 1.38×10^7 t, with forestland showing the largest increase. The spatial distribution of soil conservation was obviously limited by the terrain, with the total amount of soil conservation being highest in the west and lowest in the east. [Conclusion] The ecological construction projects in Horqin sandy land have produced good effects and significant ecological benefits.

Keywords: Horqin sandy land; ecological projects; carbon sequestration; water source conservation; soil conservation

中国的北方农牧交错带是分割中国东部农耕区和西部畜牧区的过渡条带,亦是干旱与半湿润的过渡带[1],由于干旱少雨的气候特征以及脆弱的生态条件,加上长期放牧、过度开垦等人为因素的影响,该区的水土流失、草地退化及沙漠化等生态问题日益严重[1-3]。为了解决北方水土流失及沙漠化等生态问题,中国实施了一系列生态建设工程(如"三北"防护林工程、退耕还林工程等)[4-6]。生态工程的实施对该区生态环境的改善做出了巨大的贡献,当地的生态系统服务功能也随之发生显著的变化。

内蒙古自治区通辽市科尔沁沙地位于中国的北方农牧交错带,是气候变化较为剧烈的地区之一[7],亦是中国沙地面积最大且土地沙化较为严重的地区之一[8]。因此,在已有生态系统服务功能的研究方法基础上,开展位于农牧交错带的科尔沁生态系统服务功能变化评估,可以有助于认清气候变化背景下生态建设工程对该地区的生态建设成效。

目前,已有许多生态模型及方法应用于生态系统服务功能的评估。InVEST 模型因数据获取简单、操作方便、结果可靠而被广泛应用[9],尤其在计算水土保持服务功能时,考虑了泥沙输移和沉积,因此在评估水土保持方面更为精确[10],但在一些指标的计算上仍存在局限性,如在固碳量的计算上,忽略了土地利用类型上年际间的碳量变化,可能会由于林木生长引起的碳量增加而产生误差[11]。综合考虑科尔沁沙地的实际情况,本文根据《森林生态系统服务功能评估规范》(GB/T38582-2020)[12]及《荒漠生态系统服务功能评估规范》(LY/T2006-2012)[13]中固碳量的估算方法,以及通过水量平衡法、InVEST 模型,分别对科尔沁沙地的固碳量、水源涵养及水土保持服务功能进行评估,以期为生态保护建设提供依据。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

科尔沁沙地地处内蒙古东南部,位于 41°41′—46°05′N,117°49′—123°42′E,面积约为 1.48×10^5 km^2。该区处于中温带亚湿润边缘地区,是典型的农牧交错带[14]。年均降水量为 412.60 mm,但年际变化较大;年均气温为 6.5 ℃,平均风速为 3.8 m/s,春季大风日较多。土壤类型主要为暗棕壤、栗钙土、黑垆土、沙土、草甸土以及盐碱土,植被以蒙古植物区系的植物为主[15]。土地利用类型以耕地、林地和草地为主,地形呈西高东低的特征[14],平均海拔高度约为 446.86 m(附图 1,见封 3)。

1.2　数据来源

本文的土地利用数据(2000,2010,2018 年)和高程(DEM)数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn),空间分辨率为 1 km;气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(http://data.cma.cn),包括降水、气温日数据;遥感数据来源于 MODIS 数据产品,主要包括植被监测数据归一化植被指数(NDVI),空间分辨率为 1 km;蒸散(ET)和净生产力(NPP)数据通过生态过程模型 BEPS 模型计算得到,该模型的结果已在东亚等地区得到了很好的验证和应用[16-17]。

1.3　方 法

1.3.1　*土地利用分析*　转移矩阵可以定量描述各类土地利用类型之间的相互转化,由此确定土地利用类型的变化方向,其计算公式如下[18]:

$$M_{ij}=\begin{bmatrix} M_{11} & \cdots & M_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{n1} & \cdots & M_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$A_i=\sum_{j=1}^{n}M_{ij} \tag{2}$$

$$B_j=\sum_{i=1}^{n}M_{ij} \tag{3}$$

式中:M_{ij} 为土地利用类型 i 变为 j 的转移量;A_i 为在 t_1 时期第 i 个土地利用类型的面积(km^2);B_j 为 t_2 时期第 j 种土地利用类型的面积(km^2)。

1.3.2　*固碳量评估*　固碳服务功能是生态系统所提供的重要服务功能之一,在改善生态环境和缓解全球气候变化等方面起重要作用。根据光合作用的方程可知,植物利用太阳光能吸收 CO_2 和 H_2O,生成葡萄糖的碳水化合物并释放 O_2,再以葡萄糖转化为多糖,光合作用方程如下:

$$\begin{gathered} 6CO_2+6H_2O\rightarrow C_6H_{12}O_6+6O_2 \\ \downarrow \\ \text{多糖}+H_2O \end{gathered} \tag{4}$$

植被每积累 1 单位干物质,吸收固定 1.63 单位的二氧化碳,固碳量计算公式为[19]:

$$G_{\text{固碳}}=1.63\times R_{\text{碳}}\times \text{NPP} \tag{5}$$

式中：$G_{固碳}$为植被年固碳量[g/(m² · a)](以 C 计)；$R_{碳}$为 CO_2中碳的含量(27.27%)；NPP 为单位面积植被净生产力[g/(m² · a)](以 C 计)。

1.3.3 水源涵养评估 本研究基于水量平衡原理计算水源涵养量。考虑降水量、蒸散及土地类型等相关因素，水源涵养量计算公式如下[20]：

$$TQ=(1-\alpha)\times PRE-ET \quad (6)$$

式中：TQ 为总水源涵养量(mm)；α 为平均地表径流系数；PRE 为年总降水量；ET 为年总实际蒸散量。

1.3.4 水土保持评估 本研究采用 InVEST 模型计算水土保持量，即为潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量之差，其计算方法总结如下[21]：

$$A_C=A_p-A_r \quad (7)$$

$$A_p=R\times K\times L\times S \quad (8)$$

$$A_r=R\times K\times L\times S\times C\times P \quad (9)$$

式中：A_C为水土保持量[t/(hm² · a)]；A_p为潜在土壤侵蚀量[t/(hm² · a)]；A_r为实际土壤侵蚀量[t/(hm² · a)]；R 为年降水侵蚀力因子[(MJ · mm)/(hm² · h · a)]；K 为土壤可蚀性因子[(t · hm² · h)/(hm² · hm² · MJ · mm)]；L，S 分别为坡长、坡度因子；C 为植被覆盖因子；P 为保持措施因子。

1.3.5 生态系统服务功能变化量 本研究采用绝对变化量直观反映生态系统服务功能的变化情况，即：

$$\Delta X=X_t-X_0 \quad (10)$$

式中：ΔX 为各生态系统服务功能变化量；X_t为第 t 年的生态系统服务功能量；X_0为研究期内初始年的生态系统服务功能量。

2 结果与分析

2.1 气候和土地利用变化特征

图 1 给出了科尔沁沙地气候要素的时间变化趋势。由图 1a 可知，降水呈显著上升趋势($p<0.05$)，年均降水量在 316.09～559.23 mm 之间变化，多年平均降水量为 412.60 mm。2001，2007，2009 年降水量较少，而 2005，2010，2012 年降水量较多，且 2012 年降水量大幅度增加，为研究期内的最高值 559.23 mm。气温呈略微升高的趋势，年均气温变化范围在 5.14～7.53 ℃之间，多年平均气温为 6.50 ℃。其中，2005，2010，2012 年气温较低，而 2007 年气温较高。综合分析降水和气温条件，2007 年科尔沁沙地高温少雨，2005，2010，2012 年气温低但降雨多，气候较为湿润。根据图 1b，蒸散呈极显著增加趋势($p<0.01$)，年均蒸散量在 357.14～429.81 mm 之间变化，多年平均蒸散为 380.20 mm。2003，2005，2008，2010 年蒸散较小，而 2001，2007，2017 年蒸散较大。

植被覆盖归一化指数(NDVI)能较好地表征植被特征。从图 1 可知，NDVI 呈现极显著上升的趋势($p<0.01$)，其变化介于 0.27～0.33 之间，多年平均 NDVI 为 0.30。2001，2007，2009 年 NDVI 处于较低水平，2003，2005，2008，2012 年以后 NDVI 处于较高水平。

科尔沁沙地的土地利用类型主要为耕地、林地和草地，面积大小为：草地＞耕地＞林地。空间上，林地集中分布在位于西北部的科尔沁右翼中旗、扎鲁特旗、阿鲁科尔沁旗和巴林左旗，耕地和草地则交错分布(图 1)。从时间变化上看(图 2)，2000—2010 年土地利用类型变化比较小，而 2000—2018 年出现较大幅度的增减。其中耕地面积增加了 3 280 km²，林地面积增加了 8 448 km² 及其他用地增加了 892 km²，草地面积减少了 12 639 km²，湿地和建设用地增减不明显。

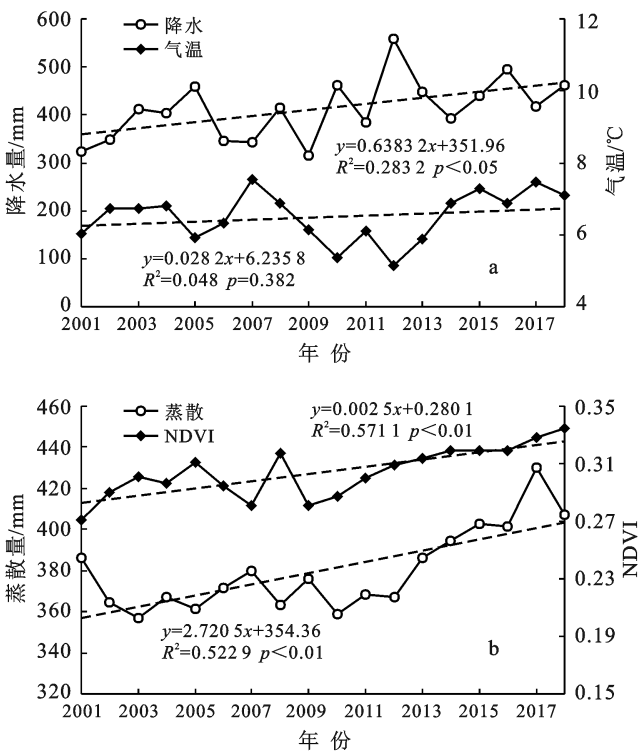


图 1 科尔沁沙地气候与植被覆盖的年际变化

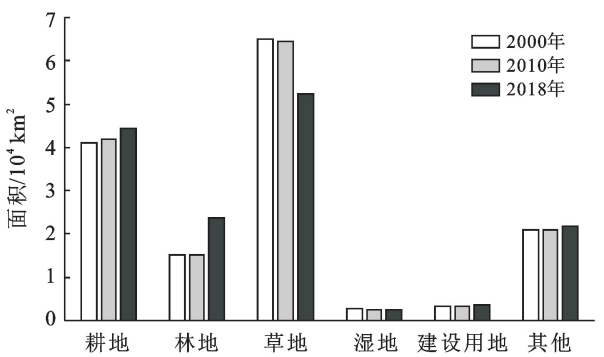


图 2 2000—2018 年科尔沁沙地土地利用类型变化情况

土地利用转移矩阵可以清晰地掌握研究时期内土地转移动向,2000—2018 年科尔沁沙地土地利用转移矩阵见表 1。2000—2018 年有 9 471 km^2 草地转为耕地,有 8 574 km^2 草地转为林地,有 6 886 km^2 草地转为其他用地。草地大幅度转为耕地的同时还有 1 989 km^2 的林地转为耕地,1 152 km^2 的建设用地转为耕地,以及 2 166 km^2 其他用地转为耕地。另外,有 3 216 km^2 的耕地转为林地,湿地、建设用地及其他用地均有不同程度地向林地转移,林地面积有明显的增加。

表 1　2000－2018 年土地利用类型转移矩阵　　km^2

项目		2018 年						总计
		耕地	林地	草地	湿地	建设用地	其他	
2000 年	耕地	24 563	3 216	6 145	528	1 095	1 575	37 122
	林地	1 989	8 322	2 543	78	117	421	13 470
	草地	9 471	8574	31 948	426	787	6 886	58 092
	湿地	663	157	302	879	29	493	2 523
	建设用地	1 152	186	480	41	856	217	2 932
	其他	2 166	549	5 446	324	340	9 917	18 742
	总计	40 004	21 004	46 864	2 276	3 224	19 509	132 881

2.2　固碳量功能变化特征

2001—2018 年,科尔沁沙地固碳量极显著增加($p<0.01$)(图 3),共增加 3.34×10^6 t(表 2)。其中,耕地和林地的固碳量呈增加趋势,而草地呈减少趋势。2001 年耕地、林地和草地的固碳量分别占所有土地类型固碳量的 26.61%,15.22%,44.28%。2018 年分别占所有固碳量的 31.21%,20.39%,32.44%。对空间上单位面积的固碳量进行分析(附图 2,见封 3),林地、草地和耕地 3 种主要土地类型相比,林地的单位面积固碳量最大,耕地次之,草地最小;对比 3 种不同土地类型的单位面积固碳量变化情况(附图 3,见封 3),2001—2018 年单位面积固碳量变化介于－60～90 g/m^2(以 C 计)之间,结果表明耕地增加最显著,草地和林地次之。

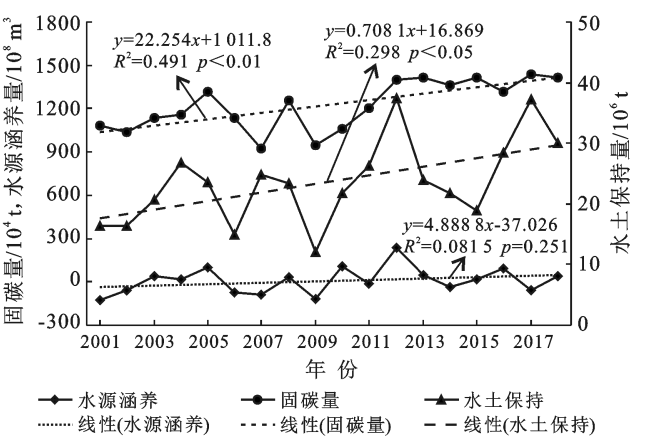


图 3　2001－2018 年各生态系统服务功能时间序列

表 2　2001－2018 年科尔沁各土地利用类型固碳量

年份	项目	土地利用类型						总计
		耕地	林地	草地	湿地	建设用地	其他	
2001	单位面积量/(g·m^{-2},以 C 计)	69.93	108.29	73.45	60.99	70.05	52.59	435.30
	总量/10^4 t	287.23	164.29	478.05	16.96	22.79	110.16	1 079.49
	总量比例/%	26.61	15.22	44.28	1.57	2.11	10.20	100
2010	单位面积量/(g·m^{-2},以 C 计)	75.35	94.79	68.95	68.33	73.56	55.48	436.47
	总量/10^4 t	315.72	143.74	444.36	17.61	24.12	116.19	1 061.75
	总量比例/%	29.74	13.54	41.85	1.66	2.27	10.94	100
2018	单位面积量/(g·m^{-2},以 C 计)	99.48	122.03	87.46	89.65	98.55	77.02	574.19
	总量/10^4 t	441.24	288.24	458.67	22.39	35.05	168.19	1 413.77
	总量比例/%	31.21	20.39	32.44	1.58	2.48	11.90	100

2.3　水源涵养功能变化特征

2001—2018 年科尔沁沙地水源涵养功能明显改善,水源涵养总量呈先增加后略微减少的趋势,从 2001 年的 3.19×10^8 m^3 增加到 2010 年的 1.40×10^{10} m^3,后减少为 2018 年的 6.41×10^9 m^3(表 3)。在所有土地利用类型中,林地的水源涵养总量持续增加,2001

年林地水源涵养总量为 3.10×10^7 m^3，占所有地类水源涵养总量的 9.71%，2018 年增长为 9.14×10^8 m^3，占所有地类水源涵养总量的 14.25%。受降水量、蒸散等多方面影响，空间上单位面积水源涵养量分布不均，如 2018 年的巴林左旗、开鲁县、科尔沁区和敖汉旗基本无水源涵养能力，翁牛特旗、通榆县、科尔沁右翼中旗、左翼中旗和左旗后旗的平均单位面积水源涵养量大于 30 mm，水源涵养能力较强（附图 2，见封 3）。2001—2018 年单位面积水源涵养变化量由北向南逐渐降低（附图 3，见封 3），变化范围为－260～360 mm，表明研究期间通榆县和科尔沁右翼中旗在生态工程实施下的水源涵养能力改善明显。

表 3 2001－2018 年科尔沁各土地利用类型水源涵养量

年份	项目	土地利用类型						总计
		耕地	林地	草地	湿地	建设用地	其他	
2001	单位面积量/mm	3.54	2.04	0.78	6.23	0	3.54	16.13
	总量/10^8 m^3	1.45	0.31	0.51	0.17	0	0.74	3.19
	总量比例/%	45.65	9.71	15.97	5.43	0	23.24	100
2010	单位面积量/mm	131.13	53.82	67.89	148.50	40.57	135.32	577.24
	总量/10^8 m^3	54.94	8.16	43.76	3.83	1.33	28.34	140.36
	总量比例/%	39.15	5.81	31.17	2.73	0.95	20.19	100
2018	单位面积量/mm	36.17	38.68	36.35	61.99	0.62	83.70	257.51
	总量/10^8 m^3	16.04	9.14	19.06	1.55	0.02	18.28	64.09
	总量比例/%	25.03	14.25	29.75	2.42	0.03	28.52	100

2.4 水土保持功能变化特征

2001—2018 年科尔沁沙地水土保持总量呈持续显著上升的趋势（$p<0.05$）（表 4），2001 年水土保持总量为 1.63×10^7 t，2018 年为 3.01×10^7 t，约增加 1.38×10^7 t。2001—2018 年耕地和草地的水土保持总量在所有土地类型水土保持总量中的占比有所下降，而林地占比升高，2001 年耕地、草地和林地占比分别为 21.41%，46.70%，24.03%。2018 年三者的比例分别为 20.55%，34.00%，37.53%。单位面积水土保持的空间分布受地势影响，大致呈现西高东低的分布特征，比如 2018 年科尔沁右翼中旗西北部、扎鲁特旗、巴林左旗的平均单位面积水土保持量较高，超过 3 t/hm^2（附图 2，见封 3）。2001—2018 年单位面积水土保持量变化范围介于－2.5～35.0 t/hm^2 之间，总体表现为西北增加显著，其次为西南，其中增长较高的地区主要集中分布在科尔沁右翼中旗西北部、扎鲁特旗、阿鲁科尔沁旗西北部、巴林左旗北部、翁牛特旗西部（附图 3，见封 3）。

表 4 2001－2018 年科尔沁各土地利用类型水土保持量

年份	项目	土地利用类型						总计
		耕地	林地	草地	湿地	建设用地	其他	
2001	单位面积量/(t·hm^{-2})	0.85	2.59	1.17	0.59	0.79	0.41	6.41
	总量/10^4 t	349.70	392.42	762.70	16.49	25.74	86.13	1 633.19
	总量比例/%	21.41	24.03	46.70	1.01	1.58	5.27	100
2010	单位面积量/(t·hm^{-2})	1.44	2.82	1.46	1.13	1.31	0.61	8.77
	总量/10^4 t	604.37	427.99	937.88	29.09	43.03	128.31	2 170.67
	总量比例/%	27.84	19.72	43.21	1.34	1.98	5.91	100
2018	单位面积量/(t·hm^{-2})	1.39	4.78	1.95	1.21	1.28	0.75	11.36
	总量/10^4 t	618.55	1 129.68	1 023.33	30.16	45.46	162.98	3 010.17
	总量比例/%	20.55	37.53	34.00	1.00	1.51	5.41	100

3 讨论

生态建设工程的实施改变当地土地利用情况，并对生态系统服务功能产生一定影响[22]。研究表明研究区固碳量显著增长主要是由于耕地和林地固碳量的增加造成，这与耕地和林地面积增加相吻合，说明土地利用类型面积的变化是固碳量变化的主要原因，与杨殊桐等[22]的研究结果一致。水源涵养总量呈先增加后略微减少的趋势，在生态工程实施期间，植被覆盖得到改善，水源涵养量增加，但同时也加大了蒸

散量,从而引起水源涵养量的减少,并且随着耕地面积的扩大,农业耗水量增加,亦使水源涵养量减少,与祝萍等[23]、王秀明等[24]和曹叶琳等[25]的研究结果相近。水土保持总量持续上升,林地水土保持总量在所有土地类型水土保持总量中的占比有所提高,说明林地在改善水土保持方面起着重要作用,与康慧慧等[26]的研究结果一致。

另外,分析各生态系统服务功能的时间序列可知,2005 年和 2012 年固碳量、水源涵养及水土保持均处于高水平,而 2007,2009 年处于低水平。结合降水与气温的年际变化,发现 2005,2012 年降雨充沛,气温略低,而 2007,2009 年高温少雨。说明干旱会造成生物量的减少以及植物生产力的降低,从而导致固碳量的减少,水源涵养量和水土保持量也因干旱而略微降低。由此可以判断位于农牧交错带的科尔沁沙地各项生态系统服务功能的变化受气候条件的影响,尤其受降水量影响明显。因此,在未来的生态系统服务功能的评估中需加强驱动因素分析,使评估结果更准确和科学。

4　结 论

本研究计算并评估 2001—2018 年科尔沁沙地的固碳、水源涵养和水土保持生态服务功能的变化情况,得出如下结论:

(1) 科尔沁沙地 2000—2018 年土地利用类型主要为耕地、林地和草地,在生态建设工程下土地利用类型面积变化显著,耕地面积增加 3 280 km^2,林地面积增加 8 448 km^2,草地面积减少 12 639 km^2,这主要是耕地、林地和草地间相互转移的结果。

(2) 2001—2018 年科尔沁沙地固碳量显著增长,耕地、林地的固碳量在所有土地类型固碳量中的占比分别增加 4.50%,5.17%。草地固碳量占比减少 10.84%,但草地固碳量仍最大。林地单位面积固碳量最大,耕地和草地次之。

(3) 2001—2018 年科尔沁水源涵养总量呈先增加后略微减少的趋势,与植被覆盖及气候条件密切相关,林地的水源涵养总量不断增加。2001 年林地水源涵养总量为 3.10×10^7 m^3,占所有土地类型的 9.71%。2018 年增加为 9.14×10^8 m^3,占所有土地类型的 14.25%。

(4) 2001—2018 年科尔沁沙地水土保持总量持续上升,约增加 1.38×10^7 t,但受地势影响,呈西高东低的分布特征。林地水土保持总量在所有土地类型水土保持总量中的占比有所提高,2001 年为 24.03%,而 2018 年提高到 37.53%,说明林地具有较好的水土保持能力。

[参 考 文 献]

[1] 赵哈林,赵学勇,张铜会,等.北方农牧交错带的地理界定及其生态问题[J].地球科学进展,2002,17(5):739-747.

[2] 殷小菡,孙希华,徐新良,等.我国北方农牧交错带西段退耕对土壤保持功能影响研究[J].地球信息科学学报,2018(12):1721-1732.

[3] 蒋卫国,陈云浩,李京,等.中国北方农牧交错带生态环境的空间格局演变[J].自然资源学报,2005,20(6):77-84.

[4] 刘峰,杨光,韩雪莹,等.科尔沁沙地土地利用时空演变及空间自相关分析:以奈曼旗为例[J].西北林学院学报,2020,35(4):148-157.

[5] 王涛,宋翔,颜长珍,等.近 35 a 来中国北方土地沙漠化趋势的遥感分析[J].中国沙漠,2011,31(6):1351-1356.

[6] 张晓明.三北防护林工程建设成效及发展对策[J].防护林科技,2020(2):52-54.

[7] 渠翠平,关德新,王安志,等.近 56 年来科尔沁沙地气候变化特征[J].生态学杂志,2009,28(11):2326-2332.

[8] Zhu Wenjie, Gao Yang, Zhang Hanbing, et al. Optimization of the land use pattern in Horqin Sandy Land by using the CLUMondo model and Bayesian belief network [J]. Science of the Total Environment, 2020,739:139929.

[9] 王梅娟,李阳.基于 Invest 模型对生态系统服务功能评估的研究综述[J].旅游纵览(下半月),2018(10):185.

[10] 王森,王海燕,谢永生,等.延安市退耕还林前后土壤保持生态服务功能评价[J].水土保持研究,2019,26(1):280-286.

[11] 邹文涛,何友均,叶兵,等.基于 InVEST 模型的钱江源国家公园生态系统碳储量研究[J].中南林业科技大学学报,2021,41(3):120-128.

[12] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. GB/T 38582-2020,森林生态系统服务功能评估规范[S]. 2020-03-06.

[13] 国家林业局. LY/T 2006-2012,荒漠生态系统服务评估规范[S].2012-02-23.

[14] 于静,高亚敏,付铭.科尔沁草原 NDVI 时空变化特征及其对气候的响应[J].中国草地学报,2020,42(6):82-90.

[15] 李建华.科尔沁沙地生态系统退化特征及原因[J].辽宁林业科技,2008(1):46-48,60.

[16] Chen J M, Ju Weimin, Ciais P, et al.Vegetation structural change since 1981 significantly enhanced the terrestrial carbon sink [J]. Nature Communications, 2019,10(1):1-7.

[17] 张方敏,居为民,陈镜明,等.基于 BEPS 生态模型对亚洲东部地区蒸散量的模拟[J].自然资源学报,2010,25(9):1596-1606.

[18] 邬亚娟,刘廷玺,童新,等.基于长时间序列 landsat 数据的科尔沁沙地土地利用演变分析[J].生态学报,2020,40(23):8672-8682.

(下转第 165 页)

规划管理保障机制。随着中国与“一带一路”沿线国家的持续深入合作,中国经济特区和粮食生产基地的发展经验可以为老挝提供借鉴,同时结合凯山丰威汉市的发展现状、特色、需求和未来发展目标,在土地资源优化配置研究的基础上,合理布局经济特区、粮食生产基地和生态保护区,并建立健全规划管理保障机制,促进地区经济建设、农业生产和生态保护协调发展,真正发挥研究区作为老挝经济中心的优势。

(3) 利用区位优势发展经济特区,利用地形和水土资源优势发展水稻、咖啡、茶叶等绿色农业和特色产业,布局灌溉排水设施和交通设施。通过农业、旅游业等产业的反哺作用,促进农业现代化和机械化建设,改变部分地区原始的农业生产模式,提高农业生产效率、解放生产力,形成土地、产业、生产力之间相互促进的良性发展模式,促进区域经济发展。

[参 考 文 献]

[1] 王甜,闫金凤,乔海燕.马来西亚吉隆坡市土地利用变化特征分析与预测[J].水土保持通报,2020,40(5):268-275,341.

[2] 韩会然,杨成凤,宋金平.北京市土地利用空间格局演化模拟及预测[J].地理科学进展,2015,34(8):976-986.

[3] 许小亮,李鑫,肖长江,等.基于 CLUE-S 模型的不同情景下区域土地利用布局优化[J].生态学报,2016,36(17):5401-5410.

[4] 包塔娜,布仁,齐晓明,等.基于多模型测度的内蒙古中部地区土地利用空间布局优化研究[J].干旱区资源与环境,2020,34(11):110-117.

[5] Jiang Weiguo, Chen Zheng, Lei Xuan, et al. Simulating urban land use change by incorporating an autologistic regression model into a CLUE-S model [J]. Journal of Geographical Sciences, 2015,25(7):836-850.

[6] 彭玉玲,林爱文,王珂,等.老挝中部地区林业用地空间适宜性多尺度评价[J].地域研究与开发,2019,38(2):139-146.

[7] 李鑫,肖长江,欧名豪,等.基于生态位适宜度理念的城镇用地空间优化配置研究[J].长江流域资源与环境,2017,26(3):376-383.

[8] 刘学.面向热岛强度削减的城乡建设用地动态模拟与空间治理路径研究[D].浙江 杭州:浙江大学,2020.

[9] 陆文涛,代超,郭怀成.基于 Dyna-CLUE 模型的滇池流域土地利用情景设计与模拟[J].地理研究,2015,34(9):1619-1629.

[10] 杨露,颉耀文,宗乐丽,等.基于多目标遗传算法和 FLUS 模型的西北农牧交错带土地利用优化配置[J].地球信息科学学报,2020,22(3):568-579.

[11] 张骏杰.基于“多规合一”的地级市国土空间优化方法研究[D].北京:中国地质大学(北京),2018.

[12] 樊天相,杨庆媛,何建,等.重庆丘陵地区农村居民点空间布局优化:以长寿区海棠镇为例[J].地理研究,2015,34(5):883-894.

[13] 单薇,金晓斌,冉娜,等.江苏省土地利用“生产—生活—生态”功能变化与耦合特征分析[J].长江流域资源与环境,2019,28(7):1541-1551.

[14] 焦利民,刘耀林.可持续城市化与国土空间优化[J].武汉大学学报(信息科学版),2021,46(1):1-11.

[15] 危小建,谢亚娟,孙显星.基于空间贝叶斯识别城市扩张与生态保护潜在的兼容区和冲突区:以鄱阳湖生态经济区为例[J].长江流域资源与环境,2020,29(2):310-321.

[16] 王海军,曾浩然,张文婷,等.基于改进的 GPU 并行 NSGA-Ⅲ的土地利用优化配置[J].农业工程学报,2020,36(21):283-291.

[17] 毛鹏.老挝沙湾拿吉地区土地利用变化及其综合生态效应[D].湖北 武汉:武汉大学,2017.

[18] 袁沫汐,彭玉玲,林爱文,等.老挝沙湾水经济区生态用地利用评价[J].水土保持通报,2017,37(1):234-240.

[19] 许小亮,李鑫,肖长江,等.基于 CLUE-S 模型的不同情景下区域土地利用布局优化[J].生态学报,2016,36(17):5401-5410.

(上接第 159 页)

[19] 杜瑶.八仙山森林生态系统固碳释氧服务价值的遥感估算[J].内蒙古煤炭经济,2017(8):71-72,86.

[20] 王耀,张昌顺,刘春兰,等.三北防护林体系建设工程区森林水源涵养格局变化研究[J].生态学报,2019,39(16):5847-5856.

[21] 刘翊涵,苏正安,潘洪义,等.张家口市土地利用和土壤保持功能的变化特征[J].草业科学,2020,37(7):1281-1292.

[22] 杨殊桐,时鹏,李占斌,等.大理河流域退耕还林工程对生态系统服务功能的影响[J].水土保持研究,2018,25(6):251-258.

[23] 祝萍,刘鑫,郑瑜晗,等.北方重点生态功能区生态系统服务权衡与协同[J].生态学报,2020,40(23):8694-8706.

[24] 王秀明,刘谓承,龙颖贤,等.基于改进的 InVEST 模型的韶关市生态系统服务功能时空变化特征及影响因素[J].水土保持研究,2020,27(5):381-388.

[25] 曹叶琳,宋进喜,李明月,等.陕西省生态系统水源涵养功能评估分析[J].水土保持学报,2020,34(4):217-223.

[26] 康惠惠,潘韬,盖艾鸿,等.生态退化与恢复对三江源区土壤保持功能的影响[J].水土保持通报,2017,37(3):7-14.