

基于 InVEST 模型的四川省宜宾市 2010—2020 年碳承载力评价

许源溪, 周波, 苏杰

(四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610065)

摘要: [目的] 探究城市碳承载力基底, 为城市“双碳”目标实现和低碳发展提供科学支撑。[方法] 基于 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 年四川省宜宾市土地利用数据, 通过 InVEST 模型测度了宜宾市生境质量和碳储量, 构建了宜宾市碳承载力评价指标体系, 对宜宾市的碳承载力水平进行深度地分析研究。[结果] 宜宾市碳承载力呈现“先提升, 后下降, 再提升”的变化特征, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 年宜宾市碳承载力得分分别为 0.525 4, 0.606 1, 0.506 4, 0.385 3, 0.553 4。生境退化程度持续加深, 生境质量指数呈现“先提升, 后下降, 再提升”的变化特征。碳储量指数持续上升, 碳储存速率持续下降。宜宾市碳承载力复合系统由 2000 年的失调状态逐渐转变为 2020 年的中级协调。[结论] 宜宾市碳承载力水平整体处于上升趋势, 但局部地区碳储量和生境质量下滑较为严重。

关键词: InVEST 模型; 碳承载力; 低碳城市; 评价指标体系

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0350-09

中图分类号: X196

文献参数: 许源溪, 周波, 苏杰. 基于 InVEST 模型的四川省宜宾市 2010—2020 年碳承载力评价[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 350-358. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230220.010; Xu Yuanxi, Zhou Bo, Su Jie. Carbon carrying capacity evaluation for Yibin City of Sichuan Province based on InVEST model during 2010—2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 350-358.

Carbon Carrying Capacity Evaluation for Yibin City of Sichuan Province Based on InVEST Model Duing 2010—2020

Xu Yuanxi, Zhou Bo, Su Jie

(School of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: [Objective] The basis of urban carbon carrying capacity was determined in order to provide scientific support for urban “double carbon” and low-carbon development. [Methods] Based on land use data for Yibin City, Sichuan Province in 2000, 2005, 2010, 2015, and 2020, habitat quality and carbon storage for Yibin City were measured by the InVEST model, an evaluation index system of carbon carrying capacity for Yibin City was constructed, and an in-depth study of the level of carbon carrying capacity for Yibin City was conducted. [Results] The carbon carrying capacity of Yibin City showed a change pattern of “first increasing, then decreasing, and then increasing”. The carbon carrying capacity scores for Yibin City in 2000, 2005, 2010, 2015, and 2020 were 0.525 4, 0.606 1, 0.506 4, 0.385 3, and 0.553 4, respectively. The degree of habitat degradation continued to deepen, and the habitat quality index showed a change pattern of “first increasing, then decreasing, and then increasing”. The carbon storage index continued to increase over time, and the carbon storage rate continued to decline. The complex system of carbon carrying capacity for Yibin City has gradually changed from an imbalanced state in 2000 to an intermediate coordination state in 2020. [Conclusion] The level of carbon carrying capacity in Yibin City is on the rise, but carbon storage and habitat quality in some areas are declining significantly.

Keywords: InVEST model; carbon carrying capacity; low-carbon city; evaluation index system; Yibin City of Sichuan Pronicve

收稿日期: 2022-07-11

修回日期: 2022-08-12

资助项目: 四川大学—宜宾市人民政府市校战略合作专项资金项目“宜宾市低碳城市规划及其示范区布局研究”(2020CDYB-24)

第一作者: 许源溪(1998—), 男(汉族), 四川省泸州市人, 硕士研究生, 研究方向为城乡与区域规划理论和方法。Email: 704316700@qq.com。

通信作者: 周波(1964—), 男(汉族) 四川省成都市人, 博士, 教授, 主要从事城乡与区域规划理论和方法、城乡规划与设计等方向研究。Email: zxt001@163.com。

中国“十四五”规划建议中提出制定 2030 年前碳排放达峰行动方案,而“双碳”目标的达成需要城市碳承载力作为支撑,因此建立一套适应于我国特色碳承载力评价指标体系从而测定城市碳承载力基底尤为重要。通过总结国内外学者相关研究发现:碳承载力的研究区域多集中于耕地,草地,林地等非建设用地及生态领域,缺乏对整个城市行政区划范围碳承载力进行研究,难以为城市总体低碳发展政策提供科学参考^[1-4]。例如刘帅康^[5]通过计算耕地,草地,林地的固碳量对贵阳市的碳承载力进行分析研究。邱高会等^[6]通过对各类植物的固碳能力进行估算从而测定四川省的碳承载力。赵先贵等^[7-8]通过计算森林,草地的固碳量对山东省的碳承载力进行分析研究。ZHAO KG 等^[9]运用激光雷达数据测量了英国苏格兰阿伯弗伊尔村森林碳通量。Du Y^[10]使用氧化法和碳分析仪测定青藏高原草地有机碳含量,验证草地退化会降低土壤有机碳含量。

此外,碳承载力的研究方法主要分为两类,第一类主要通过测量区域碳汇能力,即计算区域的碳固持^[11-12]。这类方式的优点在于能够通过得出数值,直观地反映区域碳汇总量。其缺点在于从静态和封闭状况下计算碳汇数据,未能综合考虑生境质量,社会经济,时间变化等动态因素对于区域碳汇能力的影响。第二类主要通过建立碳承载力评价指标体系对地区碳承载力进行评价,但此类研究的数据来源主要为各城市的年鉴数据,难以直观反映城市碳承载力水平^[13-15]。

四川省宜宾市作为长江上游第一城,位于金沙江,长江及岷江交汇处,生态环境相对脆弱,但同时它也是四川省崛起最快的城市,连续两年 GDP 增速位居全省第一,在高速发展的同时如何兼顾低碳城市建设是宜宾市发展面临的最大问题。因此研究选择宜宾市行政区划范围作为研究区域,期望为同类型城市提供参考借鉴,研究区域具有一定的代表性与典型性。

通过对碳承载力评价研究的梳理分析,本研究创新性地引入生态服务领域的 InVEST 模型对宜宾市的生境质量和碳储存量进行了量化测度,并结合两类碳承载力研究的优点,构建了更为科学,准确的碳承载力评价体系,利用耦合协调模型对其碳承载力水平及演化情况进行了更为深入的研究,以期为宜宾低碳城市建设和“双碳”发展提供理论及实践参考。

1 碳承载力

1.1 碳承载力内涵

中国对碳承载力的研究尚处于探索阶段,学者们

对于碳承载力的内涵具有较多定义。中国政府在对于碳达峰碳中和目标的指导意见中提到将“巩固生态系统碳汇能力”作为碳达峰碳中和的关键环节。但本文通过总结学者们对于碳汇能力的研究发现,这一环节中“生态系统碳汇能力”与生态领域中碳承载力的内涵相耦合。其中赵先贵等认为碳承载力是某一区域内植被每年所能吸收固定二氧化碳的量^[8]。顾晓薇等^[2]认为碳承载力是研究区域内拥有的碳当量。叶祖达认为碳承载力是在一定时期内,在维持相对稳定的前提下,环境资源所能容纳的人口规模和经济规模大小,城市空间系统内含的碳储存和碳清除能力^[3]。总结学者们对于碳承载力的内涵,结合意见所提出巩固生态系统碳汇能力的方式方法,本文认为碳承载力是在不影响城市正常发展的背景下,通过强化国土空间规划和用途管控,增强区域生境质量,碳储存量所形成的区域整体碳汇能力水平。

1.2 碳承载力的影响因素

通过国内外学者对于碳汇影响因素的研究发现,碳承载力主要受自然因素和社会因素的影响,包括生境质量,碳储存量,土地利用变化,气候,温度,湿度,人均 GDP,第二产业的比例等^[11-12]。国内计算碳汇所用的方法包括,净第一性生产力法,生态足迹法,能值法等方法,主要是直接计算区域的碳固持,因此区域碳储量的直接影响因素为植物面积与固碳系数,间接影响因素则包括土地利用变化、二氧化碳浓度、温度、湿度等社会自然因素。国外学者认为碳汇的变化受到年平均温度、年平均湿度、城市土地比例、城市化指数、第二产业的比例、人均 GDP 农田与林地、草地和耕地之间变化,气候,土壤物理,化学特性以及人类活动的共同影响^[16-20]。

综上所述碳承载力是指区域整体碳汇能力,受经济环境社会的共同影响。因此本文在建立碳承载力评价指标时将其分为碳储存量、生境质量及城镇发展 3 个子系统,从空间,时间上研究宜宾市碳承载力水平。

2 研究区域、研究方法与数据来源

2.1 研究区域

本研究选择宜宾行政区划范围作为研究范围,面积为 13 283 km²,地跨北纬 27° 50′—29° 16′,东经 103° 36′—105° 20′之间,市辖 3 区 7 县,常住人口为 4.59×10⁶ 人。宜宾市位于四川南部,为长江,岷江和金沙江三江交汇地,具有较好的生态基底。2022 年四川省第 12 次党代会报告首次明确提出将宜宾作为四川省副中心城市。

2.2 研究方法

通过 InVEST 模型的两大模块对宜宾市的生境质量及碳储量进行评估,进而构建宜宾市碳承载力评价指标体系。在建立碳承载力评价指标体系时,结合碳汇影响因素,利用 InVEST 模型中生境质量及碳储存模块所得指标数据,综合社会经济因素建立宜宾市碳承载力评价指标体系^[21-22],对宜宾市碳承载力水平进行动态评价并利用耦合协调模型对宜宾市碳承载力复合系统进行分析。本研究涉及的主要研究方法有:InVEST 模型的 Carbon 模块、Habitat Quality 模块、熵值法及耦合协调模型。

2.2.1 基于 InVEST 模型的碳储量评估 研究采用 InVEST 模型的 Carbon 模块测算宜宾市 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 年碳储存总量,单位平均碳储存量和单位平均碳储存速率的时空分布情况。该模块主要通过结合土地利用数据和碳密度数据计算区域内的碳储量,它将生态系统碳储量划分为 4 个基本碳库:地上植被碳库,地下植被碳库,土壤碳有机碳库和死亡有机碳库碳储量计算公式为:

$$C_i = C_{iabove} + C_{ibelow} + C_{isoil} + C_{idead} \quad (1)$$

$$C_{tot} = \sum_{i=1}^n C_i \times A_i \quad (2)$$

式中: i 为某种土地利用类型; C 为土地利用类型的碳密度 C_{iabove} 为土地利用类型的地上植被碳密度 (t/hm^2); C_{ibelow} 为土地利用类型 i 的地下植被碳密度 (t/hm^2); C_{isoil} 为土地利用类型的土壤碳密度 (t/hm^2); C_{idead} 为土地利用类型 i 的死亡有机碳密度 (t/hm^2); C_{tot} 为生态系统的总碳储量 (t); A_i 为土地利用类型 i 的面积 hm^2 ; n 为土地利用类型的数量,本文 n 为 6。为了尽可能精准计算区域碳储存量,碳密度主要参考成渝地区研究结果^[23-24],具体碳密度数据见表 1。

表 1 宜宾市各土地利用类型碳密度

Table 1 Carbon density of land use type in Yibin City t/hm^2

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机碳密度
耕地	38.70	80.70	92.90	1
草地	55.56	144.87	206.45	3.5
林地	29.30	52.90	135.00	1
水域	21.40	73.10	113.00	1
建设用地	3.30	87.30	115.30	0
其他	22.60	136.90	171.80	0

2.2.2 基于 InVEST 模型的生境质量评估 采用 InVEST 模型中的生境质量模块定量评估宜宾市生境质量水平。根据研究区实际情况,将水田,旱地,城

镇建设用地,农村居民点,工矿用地等人类活动密集区作为威胁因子。参考相关研究成果确定相关参数(表 2,表 3),运行模型输出生境质量结果。计算公式为:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z} \right) \right] \quad (3)$$

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} (w_r / \sum_{r=1}^R w_r) r_y i_{rxyl} \beta_x S_{jr} \quad (4)$$

$$i_{rxyl} = \exp \left\{ \left[- \left(\frac{2.99}{d_{rmax}} \right) \right] \times d_{xy} \right\} \quad (5)$$

$$i_{rxyl} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \quad (6)$$

式中: Q_{xj} 为第 j 类土地利用类型中栅格 x 的生境质量; H_j 为第 j 类土地利用的生境适宜度; D_{xj} 为第 j 类土地利用中栅格单元 x 的生境退化程度; k 为半饱和系数,默认值为 0.5; z 为尺度常数一般设置为 2.5; r 为威胁因子个数; W_r 为威胁因子 r 的权重; y 为第 r 类威胁因子的栅格数; Y_r 是威胁因子 r 栅格单元的总数; i_{rxyl}, i_{rxyl} 分别为线性或指数衰减求取的栅格 y 的胁迫值 r_y 对栅格 x 的胁迫程度; β_x 为各种威胁因子对栅格 x 的可达性; S_{jr} 为第 j 类土地利用类型对第 r 类威胁因子的敏感度; d_{xy} 为第 r 类威胁因子的最大威胁距离^[25-28]。(R, W_r, S_{jr} 及 β_x 为结合相关论文及研究区域进行设定, $y, Y_r, i_{rxyl}, i_{rxyl}$ 和 d_{xy} 为输入土地利用图及相关参数后 InVEST 模型自主运算所得)

表 2 威胁源影响距离及其权重

Table 2 Threat source impact distance and weight

威胁源	影响距离/km	权重	空间衰减类型
旱地	1.00	0.20	线性
水田	1.00	0.20	线性
工矿用地	5.00	0.50	指数
农村居民点	6.00	0.70	指数
城镇建设用地	10.00	1.00	指数

2.2.3 熵值法 本文遵循综合性、典型性以及可获得性等原则,从生境质量,碳储存量,城镇发展三大领域,构建宜宾市碳承载力评价指标体系(见表 5),在采用 min-max 标准化方法对所有数据进行标准化处理后,利用熵值法确定指标权重。计算公式为:

$$x_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{oj} - \min x_{oj}}{\max x_{oj} - \min x_{oj}} & (x_{oj} \text{ 为正指标时}) \\ \frac{\max x_{oj} - x_{oj}}{\max x_{oj} - \min x_{oj}} & (x_{oj} \text{ 为负指标时}) \end{cases} \quad (7)$$

$$e_i = - \frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \ln \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (8)$$

$$W_i = \frac{1 - e_i}{\sum_{i=1}^m (1 - e_i)} \quad (9)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个指标在第 j 年的预处理值; x_{ij} 为

第 i 个指标在第 j 年的标准化值; e_i 为第 i 个指标的熵; W_i 为第 i 个指标的熵权; $i \in [1, m], m$ 为指标个数; $j \in [1, n], n$ 为年份。

表 3 不同土地利用类型对生境威胁因子的敏感度

Table 3 Sensitivity of different land-use types to habitat threat factors

土地利用类型	生境适宜度	威胁源				
		旱地	水田	工矿用地	农村居民点	城市建设用地
草地	0.80	0.80	0.80	0.40	0.70	0.40
未利用地	0.60	0.50	0.10	0.60	0.70	0.90
水田	0.30	1.00	0.00	0.60	0.70	0.50
耕地	0.30	0.00	1.00	0.60	0.70	0.50
有林地	1.00	0.50	0.80	0.80	0.20	0.50
灌木林	0.90	0.50	0.80	0.70	0.20	0.80
其他林地	0.80	0.90	0.80	0.50	0.70	1.00
河流	0.70	0.20	0.30	0.20	0.30	0.30
湖泊	0.70	0.20	0.20	0.10	0.30	0.30
浅滩	0.70	0.20	0.20	0.10	0.20	0.70
城镇建设用地	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00
农村居民点	0.00	0.00	0.00	0.70	0.00	0.00
工矿用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	0.70

2.2.4 耦合协调模型 本研究将评价指标体系中 3 个子系统视为 3 个相互作用,彼此影响的系统,通过耦合度模型,定量测度宜宾市碳储存量,生境质量及城镇发展的相互关系和协调程度。参考陈科屹^[29]对林场复合系统耦合协调水平的划分结合自然断点法,对协调度等级稍做调整,将其划分为 3 个区间和 6 个发展类型(见表 4),其具体计算公式如下:

$$C = \left(\frac{U_1 U_2 U_3}{U_1 + U_2 + U_3} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

$$D = \sqrt{CT} \quad (T = aU_1 + bU_2 + cU_3) \quad (11)$$

$$U_q = \sum_{i=1}^m x_{ij} W_i \quad (12)$$

式中: C 为耦合度, $0 \leq C \leq 1$; D 为耦合协调度, $0 \leq D \leq 1$; T 为协调发展指数; a, b, c 分别为各子系统层权重,即 $a = 0.1943, b = 0.2269, c = 0.5787, U_q$ 为各子系统层($q = 1, 2, 3$)或复合系统($q = 0$)的发展指数。

表 4 耦合协调度等级划分

Table 4 Classification of coupling coordination degrees

序号	耦合协调度取值范围	耦合协调阶段	耦合协调区间
1	0.000~0.499	失调状态	不可接受区间
2	>0.499~0.599	勉强协调	
3	>0.600~0.649	初级协调	勉强接受区间
4	>0.650~0.699	中级协调	
5	>0.700~0.799	良好协调	可接受区间
6	>0.800~1.000	优质协调	

2.3 宜宾市碳承载力评价体系的指标与构建

在已有研究的基础上,采用逐层分解的方法,把碳承载力评价指标体系分为 3 个层次。第一层为宜宾市碳承载力发展水平,用于评价区域碳承载力水平。第二层用于评价碳承载力水平的 3 个子系统,包括生境质量指数,碳储存量指数和城镇发展指数。第三层则是各子系统的评价指标,通过对碳承载力内涵,影响因素和计算方法优缺点的研究,结合对低碳城市评价指标体系的相关研究以及对国民经济和社会发展统计公报,四川省年鉴等资料中相关指标进行分类整理,采用同义替换,隶属度等五轮步骤筛选得出的 39 个末级指标,采用德尔菲法选取用于碳承载力评价的三级指标。最终筛选包括区域生境质量总分,区域生境退化总分,林地占绿地总面积比重等在内的 15 个指标(表 5)。

在构建宜宾市碳承载力模型时,本文采用加法合成法,具体计算公式如下:

$$ACC = HQI + CSI + UDI \quad (13)$$

$$HQI = \sum_{k=1}^n A_k W_k \quad (14)$$

$$CSI = \sum_{k=1}^n B_k W_k \quad (15)$$

$$UDI = \sum_{k=1}^n C_k W_k \quad (16)$$

式中: ACC 即碳承载力(ACC , carbon carrying capacity), UDI 即城镇发展指数(UDI , urban development

index), HQI 即生境质量指数 (HQI, habitat quality index), A_i, B_i, C_i 分别为各子系统指标要素, W_i 为指标权重。

表 5 宜宾市碳承载力评价指标体系

Table 5 Evaluation index system of carbon carrying capacity in Yibin City

目标层	一级指标	权重	二级指标	权重	原始数据来源	指标正负
区域 碳承 载力 水平	生境质量	0.194 3	区域生境质量总分	0.063 5	土地利用数据	+
			区域生境退化总分	0.081 4	土地利用数据	-
			区域生境退化最高值	0.049 4	土地利用数据	-
	碳储量	0.226 9	森林覆盖率	0.068 2	统计年鉴	+
			林地占绿地总面积比重	0.069 3	土地利用数据	+
			区域碳储存总量	0.044 7	土地利用数据	+
			单位平均碳储存量	0.044 7	土地利用数据	+
			城镇化率	0.061 3	统计年鉴	-
			第一产业占生产总值比例	0.079 9	统计年鉴	+
	城镇发展	0.578 7	第二产业占生产总值比例	0.076 3	统计年鉴	-
			空气质量达标天数	0.051 9	统计年鉴	+
			城市年平均温度	0.058 6	统计年鉴	-
			城市年平均降雨量	0.089 9	统计年鉴	+
			人口密度	0.105 9	统计年鉴	-
			农作物播种面积	0.054 9	统计年鉴	+

2.4 数据来源

本文所用社会经济数据来自于《四川省年鉴 2000—2020 年》《宜宾市年鉴 2000—2020 年》《宜宾市国民经济与社会发展公报 2000—2020 年》,以 5 a 为节点选取 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 年 5 a 数据进行研究。土地利用数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心 (<https://www.resdc.cn>), 空间分辨率为 30 m×30 m。

3 结果与分析

利用宜宾市土地利用数据结合 InVEST 模型的生境质量模块及碳储量模块得到宜宾 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 年生境质量及碳储量相关数据, 综合城镇发展相关指标构建宜宾市碳承载力评价指标体系对宜宾市 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 年碳承载力进行综合评价并得出结果。

3.1 宜宾市碳承载力评价结果及分析

宜宾市 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 年碳承载力呈现“先提升, 后下降, 再提升”的变化特征, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 年宜宾市碳承载力得分分别为 0.525 4, 0.606 1, 0.506 4, 0.385 3, 0.553 4 (见表 6)。根据所得数据可以看到宜宾市碳承载力从 2000—2005 年稳步提升, 2005—2015 年出现了一个持续的下滑, 2015—2020 年其数值开始快速爬升, 本文从以下几个方面分析其变化原因。

表 6 2000—2020 年宜宾市碳承载力评价结果

Table 6 Evaluation results of carbon carrying capacity of Yibin City from 2000 to 2020

年份	生境质量 指数	碳储量 指数	城镇发展 指数	碳承载力 指数
2000	0.049 4	0.061 1	0.414 9	0.525 4
2005	0.156 6	0.100 6	0.348 9	0.606 1
2010	0.167 7	0.129 3	0.209 4	0.506 4
2015	0.051 8	0.183 0	0.150 5	0.385 3
2020	0.114 3	0.208 0	0.231 1	0.553 4

结合宜宾市经济发展及土地利用变化以及产业结构发展来看, 自 2005 年起, 宜宾市 GDP 开始爬坡, 由 2005 年的 3.45×10^{10} 元增长为 2020 年的 2.80×10^{11} 元。经济的发展伴随的是土地利用类型的相互转化, 2010—2015 年期间宜宾市耕地面积减少了 167.81 km^2 , 建设用地、城市绿地、水域面积大幅增加, 房屋建筑、道路、构筑物 and 人工堆掘地 4 类建设用地的总面积增加了 76.38 km^2 , 大量非建设用地转换成了建设用地^[30]。而耕地、林地作为碳承载力的关键因素, 其面积的减少也意味着碳承载力的降低。从宜宾市第一、二产业比例来看, 2000—2005 年第一产业比例下降 1%, 而 2005—2010 年下降 7%, 农业比例的急剧下降同样也带来了碳承载力的急剧下滑。自 2015 年起, 宜宾市积极调整产业结构, 第一产业比

例下滑趋势得到有效抑制,第二产业比例开始下降,工业比例的减少意味着碳排放量的减少,同样也带来了碳承载力的提升,这一现象也与评价结果相吻合。

结合宜宾市碳承载力复合系统协调耦合度来看,子系统之间的协调耦合发展变化也是引起碳承载力变化的原因之一。2000,2005,2010,2015,2020 年宜宾市碳承载力复合系统耦合协调度呈现“先上升后下降再上升”特征,2000,2005,2010,2015,2020 年宜宾市碳承载力复合系统耦合协调度分别为 0.282,0.770,0.601,0.208,0.676。从 2000 年的失调状态到 2020 年的中级协调经历了一次持续下跌即从 2005 年的良好协调下降到 2015 年的失调状态,其变化趋势与碳承载力变化趋势相耦合(表 7)。

表 7 2000—2020 年宜宾市碳承载力耦合协调度计算结果

Table 7 Calculation results of carbon carrying capacity coupling coordination degree in Yibin City from 2000 to 2020

年份	耦合度 C 值	协调指数 T 值	耦合协调度值	耦合协调程度	耦合协调区间
2000	0.137	0.577	0.282	失调状态	不可接受区间
2005	0.889	0.668	0.770	良好协调	可接受区间
2010	0.841	0.430	0.601	初级协调	勉强接受区间
2015	0.218	0.198	0.208	失调状态	不可接受区间
2020	0.895	0.510	0.676	中级协调	勉强接受区间

3.2 宜宾市生境质量评价结果及分析

在时间上宜宾市 2000,2005,2010,2015,2020 年生境质量指数呈现“先上升,后下降,再上升”的特征,分别为 0.049 4,0.156 6,0.167 7,0.051 8,0.114 3(图 1)。

宜宾市生境质量总分从 2000—2020 年呈现“先上升后下降再上升”的趋势。得分最高值为 2010 年的 7 635 425.557,最低值为 2000 年的 7 614 268.990 (表 8)。区域生境退化总分从 2000—2020 呈现“先下降后上升再下降”的趋势,但其区域生境退化得分最高值在持续上升,从 2000 年的 0.007 2 上升到 2020 年的 0.088。结合图 1 及城市发展来看,其主要原因在于宜宾市在 2010 年以后城市发展速度加快,城市扩张导致南部西部生境质量下滑,经济与生态发展出现不协调,15 a 以后重视生态发展,生境质量逐步上升。生境质量与区域生境退化呈现相反的趋势,符合客观规律,但其区域生境退化最高值出现持续下降,而生境质量,区域生境退化出现起伏,这表明政府在宏观调控区域生态环境,但在其局部地区生境质量在持续恶化。

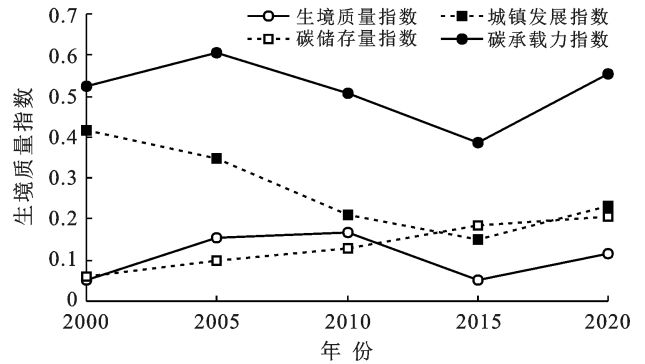


图 1 2000—2020 年宜宾市碳承载力评价体系各子系统得分的演化情况

Fig.1 Evolution of scores of each subsystem of Yibin carbon carrying capacity evaluation system from 2000 to 2020

表 8 2000—2020 年宜宾市不同时期生境质量变化

Table 8 Changes of habitat quality in Yibin City at different times from 2000 to 2020

年份	生境质量		生境退化		
	平均分	总分	总分	平均分	最高分
2000	0.250 0	7 614 268.990 0	326 992.439 0	0.010 7	0.072 0
2005	0.250 5	7 631 108.736 0	123 875.655 2	0.004 0	0.080 0
2010	0.250 7	7 635 425.557 0	128 641.309 9	0.004 0	0.080 0
2015	0.250 1	7 618 536.633 0	314 388.962 9	0.010 0	0.077 0
2020	0.250 4	7 627 386.070 0	140 033.975 8	0.004 5	0.088 0

在空间上宜宾市 2000,2005,2010,2015,2020 年生境质量呈现“东北低,西南高”的状态(图 2)。从图 2 可以看到三江交汇地区也就是宜宾市区建成区域,生境质量处于最低值且持续往东部扩张,部分低值区域呈斑块状分布在其南部及西部且呈现扩张状态。生境质量较好区域位于城市西部及南部,北部及西部生境较好区域呈斑块状分布。

结合城市发展及区位来看,其主要原因在于宜宾市近年来大力发展位于城市西部南部的三江新区及南溪区,导致城市面积扩张,土地利用变化较为频繁,使得部分区域生境质量下降较大。其次在于宜宾市地形整体呈西南高,东北低态势,西南地区生态基底较好,受到城市扩张影响较小,因此生境质量数值较高。

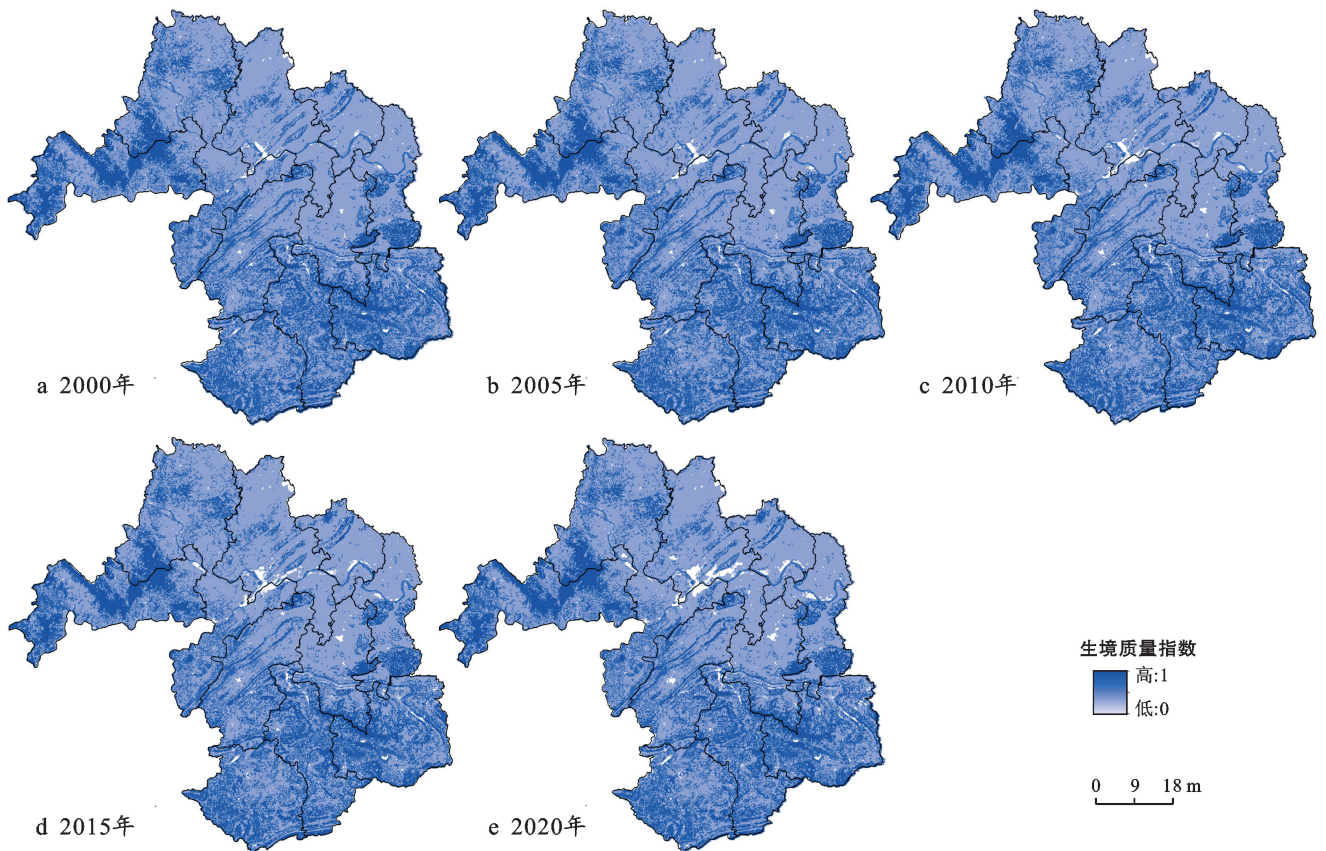


图 2 2000—2020 年宜宾市生境质量分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of habitat quality in Yibin City from 2000 to 2020

3.3 宜宾市碳储量评价结果及分析

在时间上宜宾市 2000—2020 年碳储量指数呈现“持续上升”的特征,2000,2005,2010,2015,2020 年宜宾市区域碳储量指数别为 0.061 1,0.100 6,0.129 3,0.183 0,0.208 0(表 6)。结合相关数据及得分可以看到,2000—2020 宜宾市碳储存总量呈现“先上升后下降”的趋势(图 3),2000,2005,2010,2015,2020 年宜宾市碳储存总量分别为 368 152 084.53,368 769 300.83,369 147 154.26,369 102 190.73,

368 936 973.16 t。其碳储存速率呈现持续下降的趋势并在 2010 年达到负值,到 2020 年碳储存量每年减少 95 166.138 t。结合宜宾市生境质量及土地利用覆盖图来看,城市扩张的同时导致了土地利用类型的相互转换,耕地林地等高碳储量用地转化为建设用地,这也是宜宾市碳储存总量减少的主要原因。但与此同时宜宾市注重生态建设,城市发展的同时,森林覆盖率也在逐步增加,而森林也是内陆碳汇的主要要素,这也是其碳储量得分稳步上升的主要原因。

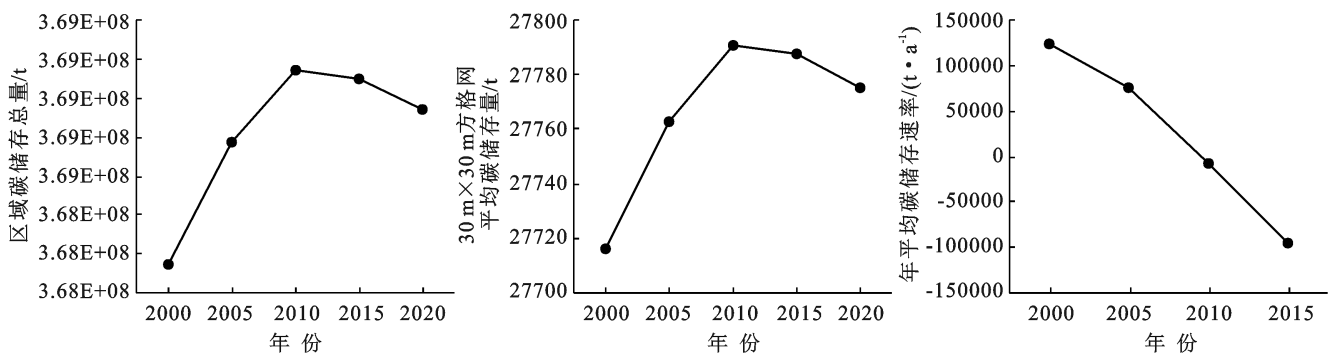


图 3 2000—2020 年宜宾市碳储量及相关数据变化特征

Fig.3 Changes in carbon storage and related data in Yibin City from 2000 to 2020

在空间上宜宾市 2000—2020 年碳储量呈现“南密北疏”的状态(图 4)。其碳密度较高地区呈斑

块状散布于宜宾南部及西部地区。从空间变化来看,呈现低密度区域持续变低,高密度区域持续加深的趋

势,其主要原因在于低密度地区主要位于宜宾市建成区,城市不断扩张,土地利用变化较大。而在高密度

地区,宜宾市重视生态培育,森林密度持续增加,碳密度也随之上涨。

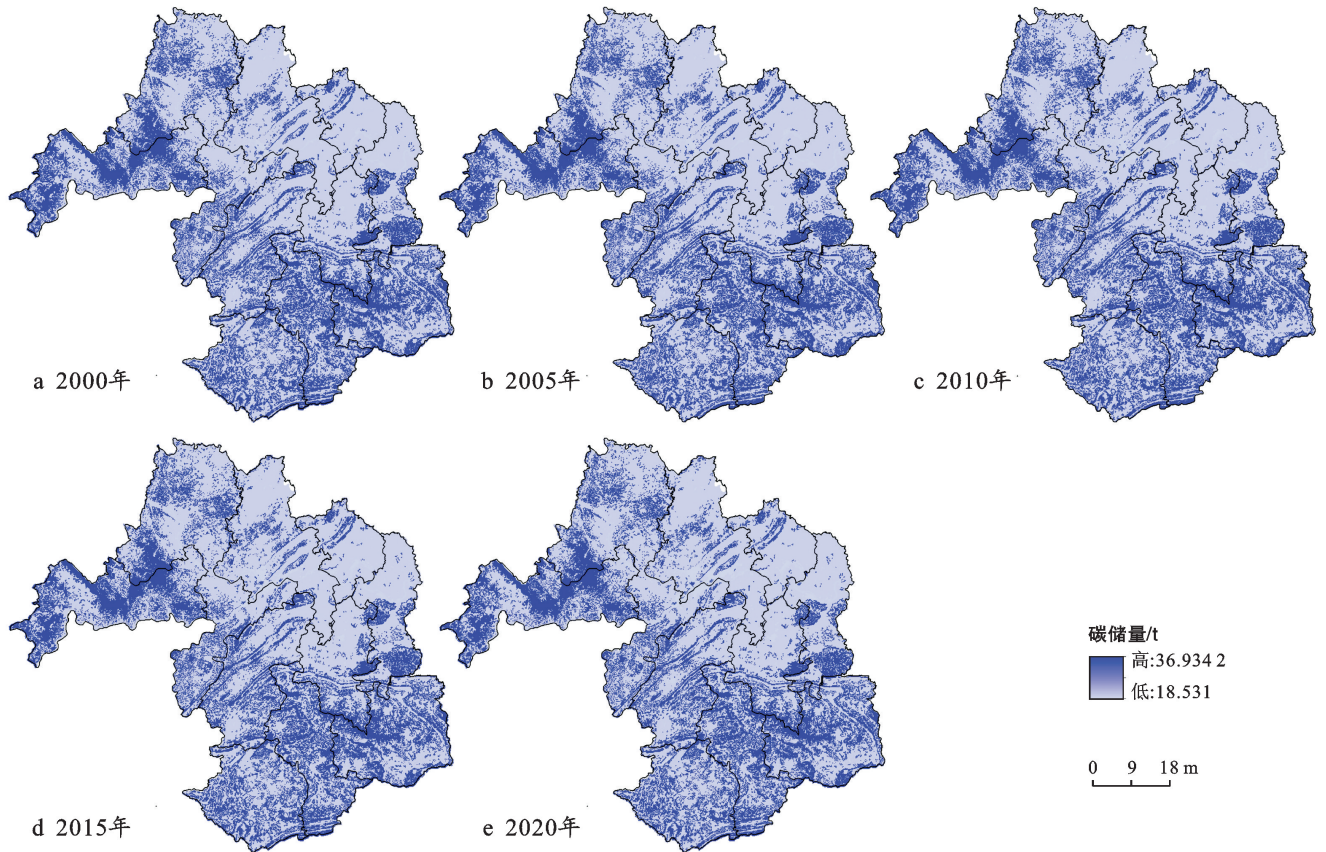


图 4 2000—2020 年宜宾市碳储存量分布特征

Fig.4 Distribution characteristics of carbon storage in Yibin City from 2000 to 2020

3.4 宜宾市城镇发展评价结果及分析

在时间上宜宾市 2000—2020 年城镇发展指数呈现“先下降,再上升”的特征,2000,2005,2010,2015,2020 年宜宾市区域城镇发展指数别为 0.414 9,0.348 9,0.209 4,0.150 5,0.231 1。从 2000—2020 年宜宾市城镇处于快速发展状态,城镇化率不断提高,人口密度稳步增长。但城镇发展得分先下降后上升趋势,结合上文所得生境质量数据及碳储存量数据可以发现其主要原因在于宜宾市在 2005 年以后城市处于快速发展状态,城市人居环境与经济发展不协调,导致城镇发展指数下降,2015 年以后重视经济社会环境协调发展,城镇发展指数开始上升。从整体来看宜宾市城镇发展指数处较稳定状态,在经历一段时间下降以后,现处于上升阶段。

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 宜宾市 2000—2020 年碳承载力呈现“先提升,后下降,再提升”的变化特征,碳承载力水平发展

较为稳定,在经过一段时间的下陷以后已步入正轨。

(2) 宜宾市 2000—2020 年生境质量指数呈现“先上升,后下降,再上升”的特征,生境质量分布不均,呈现“东北低,西南高”的状态,生境退化最高值持续增加。

(3) 宜宾市 2000—2020 年碳储存量指数呈现“持续上升”的变化特征,其碳储存速率呈现持续下降的趋势并在 2010 年达到负值,碳储存量在空间上呈现“南密北疏”的状态。城镇发展指数呈现“先下降,再上升”的特征,城镇处于快速发展状态。宜宾市碳承载力复合系统耦合协调度呈现“先上升后下降再上升”特征,2020 年已达到中级协调状态。

4.2 建议

(1) 深化宏观调控,强化微观管制。在制定宏观生态保护战略背景下,加强微观管控,包括在建成区局部优质生境质量斑块建立生态公园,湿地公园等,在局部高碳储量地区设置保护区,持续深化林地保护力度。加大森林抚育,国家储备林项目建设力度,持续推进森林碳汇,根据现状合理划定碳储量保护红

线,指导相关管控政策的制定。

(2) 严控土地利用方式转化,抑制北部建成区无序扩张。完善生态环境领域统筹协调机制,落实严格的生态环境保护制度,扭转碳汇速率,增强区域碳汇能力。

(3) 持续优化资源配置,推动产业结构绿色转型。利用科技创新引领产业绿色低碳发展,优化产业结构,增加核心技术产业比例,支持新能源汽车,人工智能等低碳高新科技产业发展,制定相应招商引资政策,提高高碳企业准入条件。根据近年碳汇速率,制定管控政策,倒逼相关企业优化减碳技术,支持绿色低碳企业发展,构建绿色低碳循环发展的产业体系。

[参 考 文 献]

- [1] 林秀群,杨红娟.陆地生态系统碳承载力及其测算模型研究[J].昆明理工大学学报(社会科学版),2015,15(5):71-76.
- [2] 顾晓薇,胥孝川,王青,等.区域经济发展的碳足迹与碳承载力研究[J].东北大学学报(自然科学版),2012,33(8):1194-1197.
- [3] 叶祖达.建立低碳城市规划工具:城乡生态绿地空间碳汇功能评估模型[J].城市规划,2011,35(2):32-38.
- [4] 匡耀求,欧阳婷萍,邹毅,等.广东省碳源碳汇现状评估及增加碳汇潜力分析[J].中国人口·资源与环境,2010,20(12):56-61.
- [5] 刘帅康.贵阳市碳足迹与碳承载力分析研究[J].市场研究,2020(2):20-21.
- [6] 邱高会,广佳.区域生态安全动态评价及趋势预测:以四川省为例[J].生态经济,2015,31(4):129-132.
- [7] 赵先贵,马彩虹,兰叶霞,等.陕西省 2002 年生态足迹分析[J].中国生态农业学报,2006,14(4):217-220.
- [8] 赵先贵,马彩虹,肖玲,等.北京市碳足迹与碳承载力的动态研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(10):8-12.
- [9] Zhao Kaiguang, Suarez J C, Garcia M, et al. Utility of multitemporal lidar for forest and carbon monitoring: Tree growth, biomass dynamics, and carbon flux [J]. Remote Sensing of Environment, 2018,204:883-897.
- [10] Du Y, Zhou Geng, Guo X W, et al. Spatial distribution of grassland soil organic carbon and potential carbon storage on the Qinghai Plateau [J]. Grassland Science, 2019,65(3):141-146.
- [11] Zhang Wenting, Huang Bo, Luo Dong. Effects of land use and transportation on carbon sources and carbon sinks: A case study in Shenzhen, China [J]. Landscape and Urban Planning, 2014,122:175-185.
- [12] 叶金盛,余光辉.广东省森林植被碳储量动态研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2010,34(4):7-12.
- [13] 高红丽.成渝城市群城市综合承载力评价研究[D].重庆:西南大学,2011.
- [14] 关丽娟,丁德文,刘大海,等.沿海城市碳承载力研究:以青岛市为例[J].海洋环境科学,2013,32(1):111-114.
- [15] 谢芳.重庆市碳承载力评价研究[D].重庆:重庆大学,2016.
- [16] Xu Qian, Yang Ren, Dong Yuxiang, et al. The influence of rapid urbanization and land use changes on terrestrial carbon sources/sinks in Guangzhou, China [J]. Ecological Indicators, 2016,70:304-316.
- [17] Davidson E A, Ackerman I L. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils [J]. Biogeochemistry, 1993,20(3):161-193.
- [18] Paustian K, Six J, Elliott E T, et al. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils [J]. Biogeochemistry, 2000,48(1):147-163.
- [19] Pacala S W, Hurtt G C, Baker D, et al. Consistent land-and atmosphere-based US carbon sink estimates [J]. Science, 2001,292(5525):2316-2320.
- [20] Armatas C A, Campbell R M, Watson A E, et al. An integrated approach to valuation and tradeoff analysis of ecosystem services for national forest decision-making [J]. Ecosystem Services, 2018,33:1-18.
- [21] 明翠琴,陈雷,钟书华.中国绿色增长综合评价指标体系的构建及实证[J].科技管理研究,2021,41(10):76-86.
- [22] 谈琦.低碳城市评价指标体系构建及实证研究:以南京、上海动态对比为例[J].生态经济,2011,27(12):81-84.
- [23] 林彤,杨木壮,吴大放,等.基于 InVEST-PLUS 模型的广东省碳储量空间关联性及预测[J].中国环境科学,2022,42(10):4827-4839.
- [24] 伍丹,朱康文,张晟,等.基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的成渝经济区碳储量演化分析[J].三峡生态环境监测,2022,7(2):85-96.
- [25] 雷金睿,陈毅青,陈宗铸,等.基于 InVEST 模型的海南岛三大流域生境质量时空演变[J].应用生态学报,2022,33(9):2511-2520.
- [26] 张秦瑞,赵良军,林国军,等.改进遥感生态指数的宜宾市三江汇合区生态环境评价[J].自然资源遥感,2022,34(1):230-237.
- [27] 褚琳,张欣然,王天巍,等.基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测[J].应用生态学报,2018,29(12):4106-4118.
- [28] 姚云长.基于 InVEST 模型的三江平原生境质量评价与动态分析[D].黑龙江 哈尔滨: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.
- [29] 陈科屹,何友均,谢和生,等.黑龙江省大兴安岭重点国有林区复合系统耦合协调发展评价与预测[J].生态与农村环境学报,2022,38(5):578-586.
- [30] 张莽,王萍,陈慧,等.长江上游地区土地利用格局时空演变:以四川省宜宾市为例[J].水土保持通报,2018,38(2):210-216.