

21 世纪以来典型喀斯特流域生态系统服务功能 对土地利用变化的响应

李月¹, 耿华彩¹, 白晓永²

1. 贵州财经大学 公共管理学院, 贵阳 550025; 2. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550081

摘要:为明晰喀斯特流域土地利用变化对生态系统服务功能的影响,本研究以贵州省典型喀斯特流域——南明河流域为例,基于 3S 技术,分析南明河流域 2000—2020 年土地利用的时空动态变化特征,采用 InVEST 模型并结合气象、土壤和地形等数据评估流域不同土地利用类型的水源涵养功能和碳储存功能,探讨流域 20 年时间序列下的生态系统服务功能的时空分异特征。结果表明,南明河流域平均水源涵养量和涵养能力分别为 $1.01 \times 10^6 \text{ m}^3$ 和 44 mm,整体呈下降—上升的变化趋势;空间布局上,水源涵养量与碳储量的高值区主要集中在林地、草地集中分布的东北部。21 世纪以来,南明河流域土地利用变化特征表现为“两增三减”,其中,建筑用地的年变化速率最大可达 13.07%。流域内林地水源涵养量占流域水源涵养总量的 57.83%,碳储量占流域总碳储存量的 60.09%,是流域最主要的碳库。上游地区大面积的林地和耕地向建设用地转移,生态系统服务功能下降明显。本研究可为制定喀斯特地区流域生态恢复策略、促进土地可持续利用及提升生态系统服务功能提供科学依据与参考。

关键词:喀斯特;土地利用;InVEST 模型;生态系统服务功能;贵州

中图分类号:X171.1, F301.2 文章编号:1007-2802(2022)05-1051-09 doi:10.19658/j.issn.1007-2802.2022.41.071

Response of Ecosystem Service Function to Land Use Change in A Typical Karst Watershed since the 21st Century

LI Yue¹, GENG Hua-cai¹, BAI Xiao-yong²

1. School of Public Administration, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China;

2. Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

Abstract: To clarify the impact of land use change on ecosystem service functions in karst watershed, this study took the typical karst watershed in Guizhou Province, Nanming River Watershed, as an example to analyze spatial and temporal dynamic changes of land use from 2000 to 2020 based on 3S technology. By combining meteorological, soil and terrain data, InVEST model was used to evaluate the water conservation function and carbon storage function of different land use types and to assess the temporal and spatial differentiation characteristics of ecosystem services over a 20-year time series. The results showed that the average annual water conservation of Nanming River Watershed was $1.01 \times 10^6 \text{ m}^3$ and the average water conservation capacity was 44 mm, showing a decreasing-rising trend, the high values of water content and carbon storage were mainly concentrated in the northeastern part where woodlands and grasslands were dense. Since the 21st century, the land use change in Nanming River Watershed could be characterized as "two increases and three decreases", among which the maximum annual change rate of construction land reached 13.07%. The carbon storage of forest land in the watershed was the most important carbon bank of the watershed, accounting for 60.09% of the total carbon storage in the watershed, and the water content of forest land in the watershed accounted for 57.83% of the total water content of the watershed. A large area of forest land and cultivated land in the upstream area had been shifted to construction land, and the ecosystem service function declined significantly. This study provided a scientific basis and data reference for formula-

收稿编号:2022-100,2022-5-30 收到,2022-6-29 改回

基金项目:中国科学院战略性先导专项(B类)子课题(XDB40020304);贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2022]202号);

2021年贵州省水利科技经费项目(KT202114);2022年贵州省水利科技经费项目(KT202223)

第一作者简介:李月(1991-),女,博士,副教授,研究方向:土地资源管理与生态治理. E-mail: 976438528@qq.com.

ting ecological restoration strategies, promoting sustainable land use and improving ecosystem service functions in karst watersheds.

Key words: karst; land use; InVEST model; ecosystem service function; Guizhou Province

0 引言

生态系统服务功能是生态系统所形成的用于维持人类赖以生存和发展的自然环境与效用,是人类直接或间接从生态系统得到的各种惠益(欧阳志云等,1999)。但是,人类活动带来的土地利用变化严重影响生态系统服务功能的结构与功能,从而对生态系统服务价值产生影响(张志强等,2017)。当前,生态系统服务功能相关研究已成为国际生态学和相关学科研究的前沿和热点(陈春帝,2022)。

喀斯特生态系统作为地球表层系统中的重要组成部分,在典型脆弱生态修复与保护研究方面具有典型性。已有研究表明,喀斯特地区土地利用空间布局差异显著,人口随流域分布且相对集中(胡先培和吴帮雄,2020),流域作为城市水文循环的基本单元和城市发展过程中人类活动的载体(李海忠,2018),具有突出的生态系统完整性和生态连通性(谭秋,2009;Styers et al.,2010),其生态系统为人类提供了必要的资源基础和生态环境条件,但在经济全球化与快速城市化进程中,却带来日益严重的环境问题。城市环境压力不断升级,使流域生态系统产生水质退化、景观空间破碎和生态退化等问题(周浩等,2017)。探究及提升流域生态系统服务功能,有利于保护和管理城市流域环境,确保长期可持续的生态系统健康(刘园等,2019)。而有关喀斯特地区城市流域生态系统服务功能的研究,仅有部分学者从水污染治理视角提出相应对策措施(李力等,2018;张夏广益,2021;周世会,2021),忽视了在快速城市化进程中,将原本适宜区域生态环境的自然、半自然景观改造为不透水面景观(谢高地等,2015),导致城市生态系统服务功能的退化(刘永强等,2018)等问题。

我国西南地区是全球最大的喀斯特区之一(夏雪敏和肖保华,2017),其中贵州有全国最大的喀斯特地貌地区,是我国主要类型的生态脆弱区(邸欣月等,2015),解决其生态环境问题是解决地球系统科学的关键,有助于推动全国甚至全球生态文明建设。南明河流域位于贵州省社会、经济、文化中心地带,不仅是具有代表性的城市流域(王秋红等,2022),同时也是典型的喀斯特流域(吴松等,2015)。本研究通过分析南明河流域20年长时间序

列下的土地利用数据变化特征,结合 InVEST 模型及气象、土壤和地形等数据评估 2000—2020 年南明河流域不同土地利用类型的水源涵养功能和碳储存功能,以期为制定喀斯特地区流域生态恢复策略,提升流域生态系统服务功能,促进土地利用可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况

南明河流域位于贵州省中部,地理位置在东经 $106^{\circ}26'$ ~ $107^{\circ}15'$,北纬 $26^{\circ}15'$ ~ $26^{\circ}54'$ (图 1),是乌江右岸的一级支流,流域面积 2158 km^2 ,属亚热带湿润温和型气候,年均降雨量 1200 mm ,多年平均气温 18°C 左右,地势西高东低。流域内喀斯特地貌极为发育,占流域总面积的 93.17% ,植被包括阔叶林、针叶林及灌丛草被等(张夏广益,2021)。自 2012 年以来,虽然南明河流域生态治理卓有成效,已消除流域内多处黑臭水体,中心城区段水质为 IV 类,部分区域在 III 类(张燕,2021),但作为喀斯特地区城市流域,在快速推进的城市化、工业化进程中,化学需氧量(COD)和氨氮成为流域内主要污染物,外源污染对干流城区段中 COD、氨氮及总磷污染负荷的贡献分别达 68% 、 95% 和 77% ,是造成流域水质污染的关键因素(李力等,2018),水土流失、生态环境恶化及水源涵养等生态系统服务功能退化成为流域健康可持续发展的突出问题。

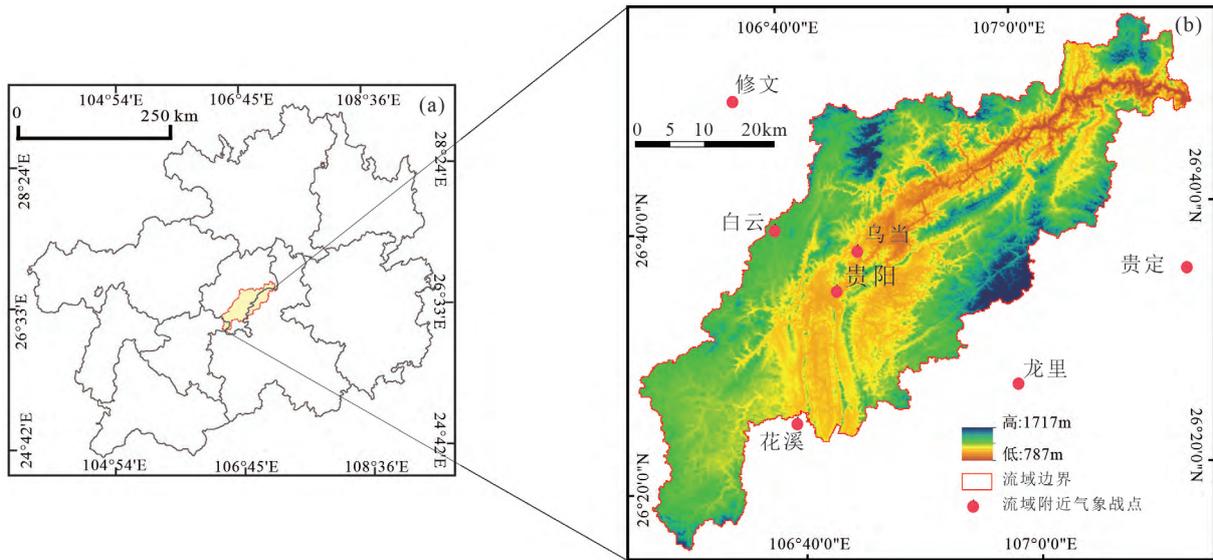
2 研究方法 with 数据来源

2.1 研究方法

InVEST 模型是由美国自然资本项目支持开发,免费开源并可用来量化多种生态系统服务功能的评估模型,包括年产水、碳储存、授粉、土壤保持等多个模块(张徐等,2022)。本研究使用 InVEST 模型 3.10.8 版本的年产水模块(annual water yield)和碳储存模块(carbon storage and sequestration)评估研究区生态系统服务功能。

2.1.1 年产水模块 InVEST 模型年产水模块是基于水量平衡原理的一种估算方法(李怡颖等,2020),即将每个栅格单元的降雨量减去实际蒸散量后的剩余量作为生态系统产水量(陈竹安等,2022)。

2.1.2 碳储存模块 InVEST 模型中碳储存模块是



(a) 底图据中科院资源环境科学数据中心 <https://www.resdc.cn/>;

(b) 通过使用贵州省 DEM 数据(中科院资源环境科学数据中心 <https://www.resdc.cn/>)提取流域水系

图 1 研究区域位置(a)及海拔高度(b)

Fig. 1 Location (a) and altitude (b) of the study area

基于不同时期土地利用数据及其对应的 4 种基本碳库来估算目前景观中存在的碳储量,即由各土地利用类型 4 个碳库的平均碳密度乘以相应的土地面积计算得到碳储量(张平平等,2022)。

2.1.3 水源涵养量计算 大量研究以产水量来反映生态系统的水源涵养量(陈骏宇等,2016;杨君等,2022),但并不是所有的产水量都能供人类利用(刘菊等,2019),因此需要在产水量的基础上,利用流速系数、土壤饱和导水率、地形指数来对产水量进行修正(包玉斌等,2016),从而得到研究区水源涵养量。本研究基于利用 InVEST 模型得出的产水量数据,使用 ArcGIS10.8 中栅格计算器工具对流域水源涵养量进行计算,从而对研究区水源涵养功能进行有效评估。

2.2 数据来源

2.2.1 土地利用类型数据 根据南明河流域生态系统服务功能动态评估对土地利用类型数据的要求,在地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)获取 2000 年、2010 年和 2020 年遥感影像,分辨率为 30 m×30 m。对获取的遥感影像使用 ENVI5.3 进行预处理,结合高分辨率遥感影像资源 3 号、谷歌影像与野外实地调查,完成土地利用数据修正。在充分考虑南明河流域实际情况的基础上,将其分为水域、耕地、草地、林地以及建筑用地,由于南明河流域的未利用地较少,因而在进行土地利用分类时未将其纳入考虑。

2.2.2 年产水模块数据 根据模型用户手册,InVEST 模型中的年产水模块是指基于 Budyko 曲线和年平均降水量,综合考虑气候、土壤等影响因素,以网格为基本单元评价研究区不同土地利用/覆被类型的产水量。本研究使用模型年产水模块需要的数据如表 1 所示。

2.2.3 碳储存模块数据 碳储存模块是指以不同的土地利用类型为评价单元,用四个碳库中的平均碳密度乘以各评价单元面积,以估计当前存储在区域生态系统中的碳量。其中,数据包括土地利用和碳密度数据。碳密度数据从前人研究文献中得到,不同土地利用类型的碳密度值见表 2。

2.3 技术路线

本研究以贵州省典型喀斯特流域——南明河流域为例,基于遥感影像、气象数据、DEM 数据、土壤数据和碳密度数据,利用 InVEST 模型中的年产水模块和碳储存模块对南明河流域产水功能和碳储存功能进行空间分析,使用 ArcGIS10.8 软件对土地利用时空变化特征和水源涵养功能进行研究,结合土地利用转移矩阵与土地利用变化动态度,进一步分析喀斯特土地利用时空演变特征对生态系统服务功能产生的影响(图 2)。

3 研究结果与分析

3.1 南明河流域生态系统服务功能变化

3.1.1 水源涵养功能时空变化特征 如图 3 所示,

表 1 InVEST 模型年产水模块数据需求及处理

Table 1 Data requirement and processing for the annual water production module in InVEST model

| 基础数据 | 数据来源 | 数据描述 | 数据处理工具 | 数据处理方法 |
|--------|---|--|--------------------|---|
| DEM 数据 | 地理空间数据云 (http://www.gscloud/) | SRTMDEMUTM 30m 分辨率数据产品 | ArcGIS10.8 水文分析工具 | 填洼、流向、流量构建河网 |
| 气象数据 | 中国气象网 (http://data.cam.cn) 中国地面气候资料数据集 | 日最高气温、最低气温、平均气温、降水量 | ArcGIS10.8 插值分析工具 | 13 个气象站点降水量数据,反距离插值得到降水量和潜在蒸散量栅格数据 |
| 数据 | 世界土壤数据库 (HWSD) 的中国土壤数据集 (https://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/) | REF_DEPTH T_SILT T_SAND T_CLAY T_OC | ArcGIS10.8 栅格计算器工具 | 利用经验公式 (Gupta and Larson, 1979) 计算植物可利用含水量,土壤根系最大埋藏深度 |
| 遥感影像 | 地理空间数据云 (http://www.gscloud/) | 2000、2010 年两期 Landsat TM 影像及 2020 年 Landsat8 影像,影像分辨率为 30m | ENVI5.3 工具 | 辐射定标、大气校正、几何校正、裁剪、拼接等预处理 |

表 2 南明河流域不同土地利用类型碳密度

Table 2 Carbon density of different land use types in Nanming River Watershed

(t/km²)

| 土地利用类型 | 地上碳密度 | 地下碳密度 | 土壤碳密度 | 死亡有机物碳密度 | 数据来源 |
|--------|-------|-------|--------|----------|--------------|
| 草地 | 80 | 87 | 8920 | 100 | 杨静怡和吴峰(2020) |
| 林地 | 2036 | 6750 | 17 000 | 780 | 杨静怡和吴峰(2020) |
| 耕地 | 3890 | 730 | 8918 | 0 | 李义平等(2020) |
| 建筑用地 | 0 | 0 | 11 069 | 0 | 李义平等(2020) |
| 水域 | 0 | 0 | 0 | 0 | 黄国金(2020) |

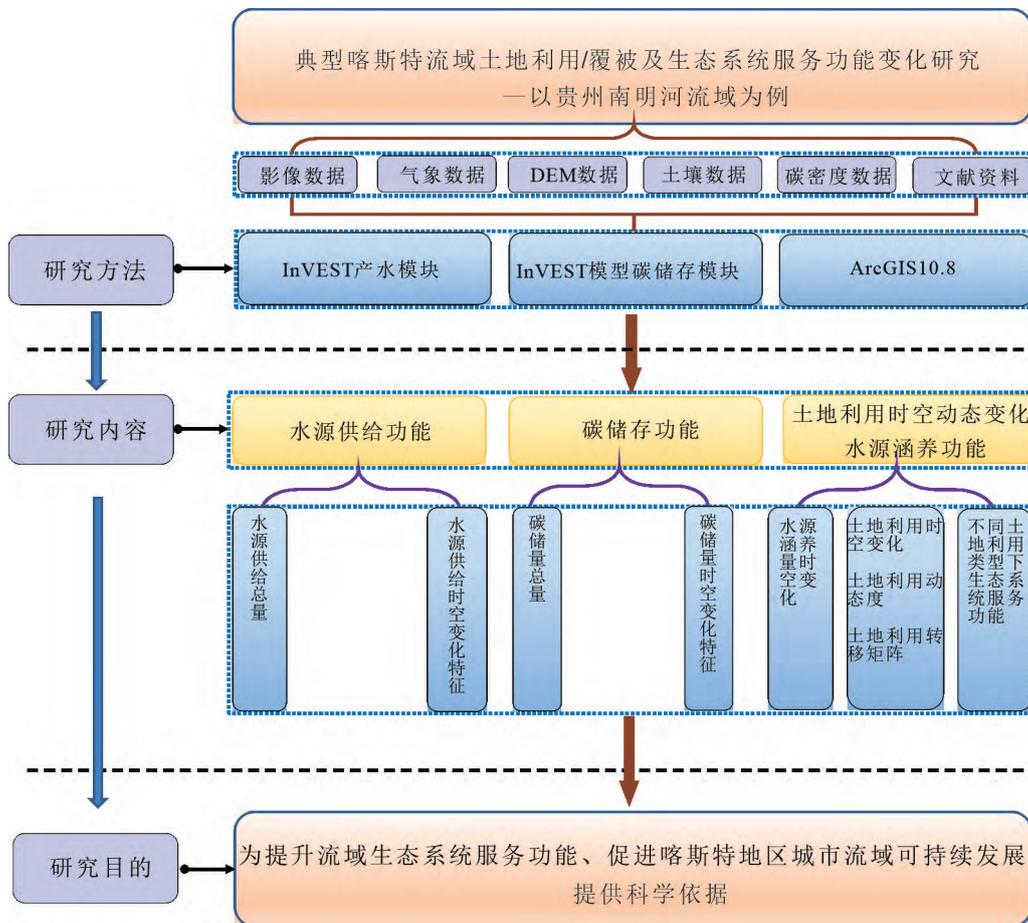


图 2 技术路线图

Fig. 2 Technology roadmap

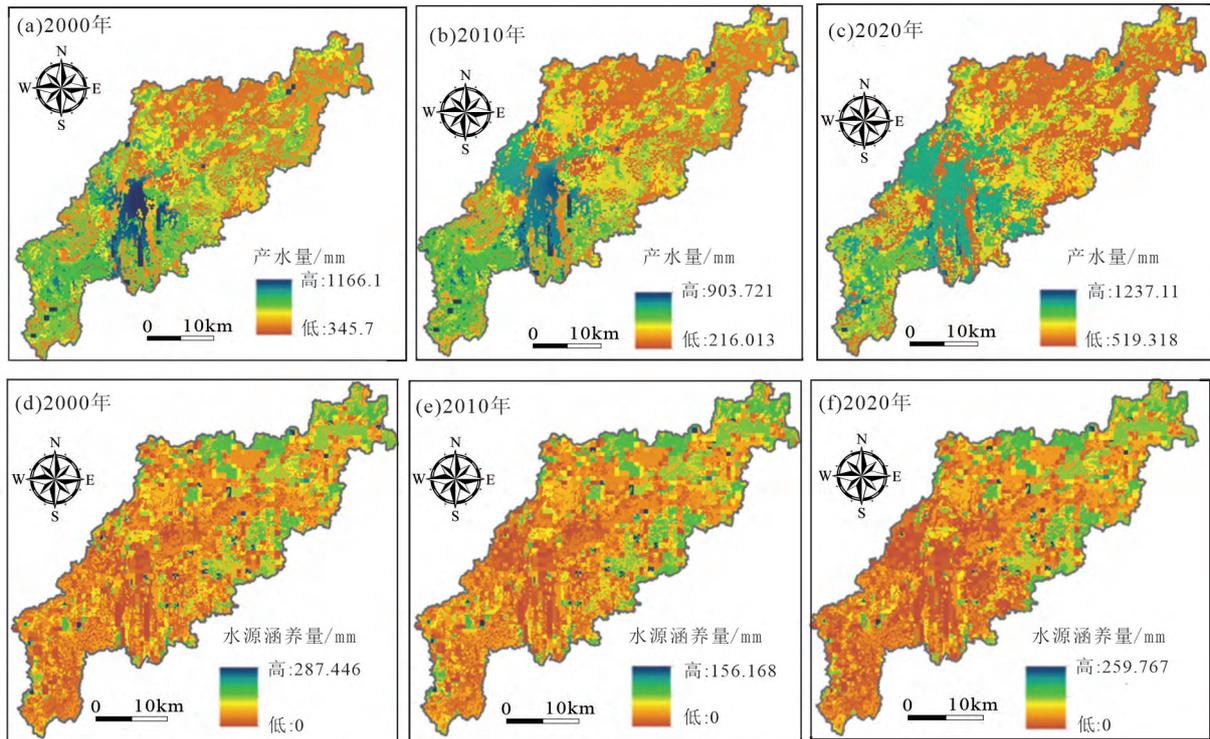


图3 2000年、2010年、2020年南明河流域产水量与水源涵养量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of water yield and water conservation in Nanming River Watershed in 2000, 2010 and 2020

2000—2020年流域平均水源涵养能力为44 mm,呈现“下降—上升”的变化趋势。2010年水源涵养量最低,仅为 $0.72 \times 10^6 \text{ m}^3$,根据南明河流域附近气象站点实测记载,2010年流域平均最高气温高达 $19.08 \text{ }^\circ\text{C}$,年均降雨量为1092 mm,远低于2000年的数据记录,降雨量少,气温高可能导致2010年南明河流域水源涵养量处于最低值的主要因素之一。

从空间分布上看,流域水源涵养量空间异质性不明显,与产水量空间分布情况相反,呈现出东北高、西南低的空间分布规律。高值区主要分布在流域下游的龙里、乌当一带以及开阳县的东南部,这些区域主要以林地和耕地为主,植被茂盛,有助于提升水源涵养能力;而低值区集中分布在上游的观山湖、云岩区和南明区,这些区域的土地利用类型以建筑用地和水域为主,地表较多为不透水面,加之人类活动的较大干扰是可能导致水源涵养功能较差的原因。

3.1.2 碳储存功能时空变化特征 基于碳密度与土地利用数据,利用InVEST模型计算流域不同时期碳的储量数据,结果如图4所示。21世纪以来,南明河流域的总碳储量表现为先增加后减少的趋势,减少率达1.41%,说明南明河流域生态系统服务的碳储存功能减弱,可能是由于人类活动加剧引

起的生产建设用地扩张,植被覆盖率下降,导致生态系统服务碳储存功能下降。20年间,南明河流域碳储量空间变化差异不明显,碳储量高值区集中分布在流域下游乌当、开阳一带,该区域以林地、耕地为主,固碳能力相对较高。而流域上游的观山湖、云岩区和南明区一带是碳储量低值集中分布区域,该区域海拔较低,城市化水平较高,受人类活动影响较大,致使生态系统碳储存功能始终保持在较低水平。同时,由于上游水库、水塘等水利设施的建筑,中心城市区建筑用地不断向外扩张,挤占了耕地、草地,20年来流域上游碳储量持续减少。整体来看,2000—2020年流域下游碳储量基本稳定,减少区域主要分布在流域上游的龙里县西部、平坝县东部、南明区、云岩区以及贵阳市辖区内。

3.2 南明河流域土地利用变化分析

3.2.1 土地利用时空动态 由图5可知,流域土地利用类型以林地、耕地与草地为主,研究期内各地类的变化特征具体表现为“两增三减”,建筑用地和水域的面积增加,耕地、草地和林地的面积减少。其中,林地作为南明河流域面积最大的地类,2000—2020年面积占研究区总面积的比例均高于44%,集中分布于流域东北向的乌当、龙里地区一带;就面积变化幅度而言,建筑用地面积增长幅度最大,研究期内高达13.07%,集中分布于贵阳市辖区;耕地

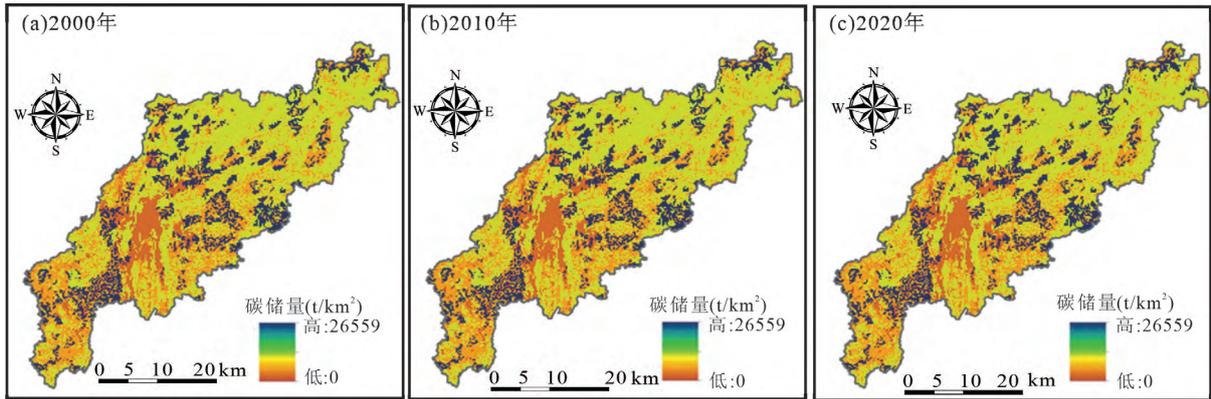


图4 2000年、2010年和2020年南明河流域碳储量分布

Fig. 4 Carbon storage distribution in Nanming River Watershed in 2000, 2010 and 2020

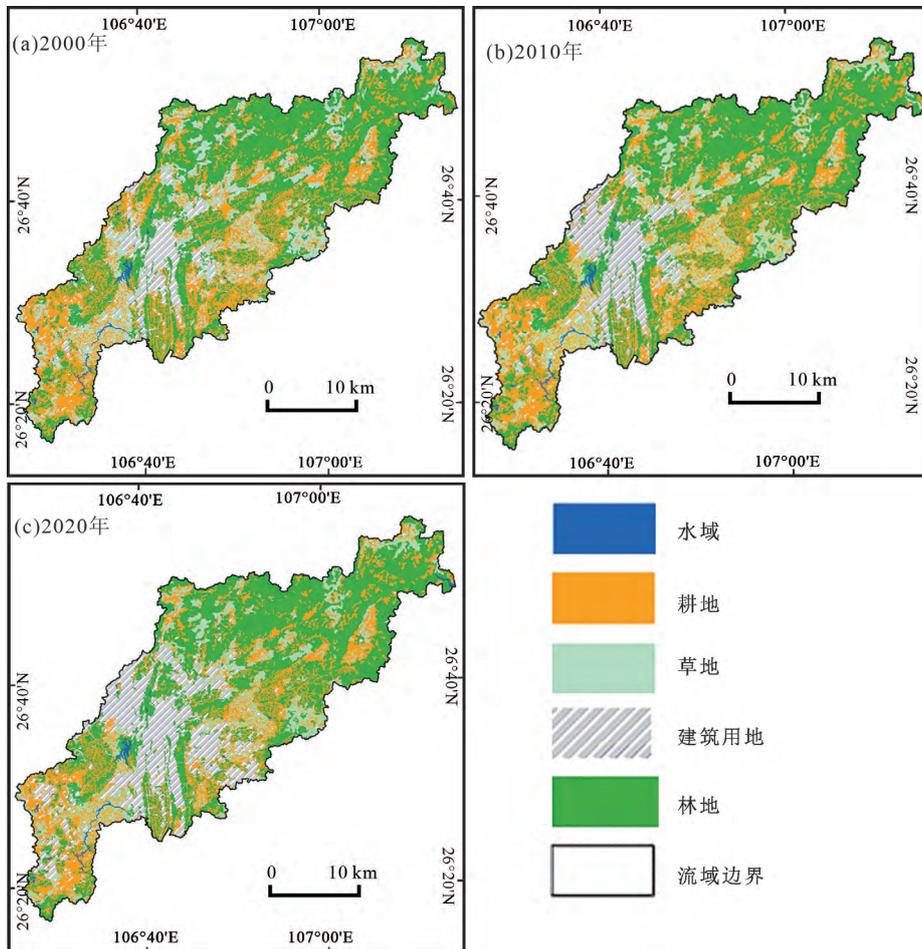


图5 2000年(a)、2010年(b)和2020年(c)贵州南明河流域土地图

Fig. 5 Soil maps of Nanming River Watershed in 2000 (a), 2010 (b) and 2020 (c)

面积缩减速率最快,达-2.15%,主要分布于流域的上游地区花溪区、龙里县西北地区以及平坝东部地区。整体来看,流域2000—2020年综合土地利用动态度呈现上升趋势,平均增幅达到5.52%。

3.2.2 土地利用转移特征 由表3可知,进入21世纪以来,流域内各地类之间转换频繁。其中,耕

地是林地转入面积最多的地类,说明流域近年来实施的退耕还林还草工程发挥了重要作用。建筑用地转入面积远大于转出面积,主要是为满足人口增长过快、住房需求增加,大面积的耕地、林地与草地被挤占与开垦,3者分别向建筑用地转入了242.06 km²。耕地是流域近20年来转出面积最多的地类,

表3 2000—2010、2010—2020 和 2000—2020 年南明河流域土地利用转移矩阵

Table 3 Land use change matrix of Nanming River Watershed in 2000—2010, 2010—2020 and 2000—2020 (km²)

| | | 2000 年 | | | | |
|--------|------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | | 草地 | 耕地 | 建筑用地 | 林地 | 水域 |
| 2010 年 | 草地 | 280.84 | 13.51 | 0.86 | 2.87 | 0.22 |
| | 耕地 | 19.52 | 555.97 | 1.15 | 18.50 | 0.21 |
| | 建筑用地 | 18.86 | 46.58 | 179.49 | 22.80 | 0.45 |
| | 林地 | 21.78 | 27.74 | 1.62 | 933.74 | 0.30 |
| | 水域 | 0.21 | 0.24 | 0.00 | 0.27 | 10.74 |
| | | 2010 年 | | | | |
| | | 草地 | 耕地 | 建筑用地 | 林地 | 水域 |
| 2020 年 | 草地 | 256.36 | 6.00 | 0.43 | 1.97 | 0.18 |
| | 耕地 | 5.69 | 486.29 | 0.67 | 12.32 | 0.32 |
| | 建筑用地 | 33.64 | 87.24 | 264.22 | 37.32 | 0.07 |
| | 林地 | 2.26 | 15.38 | 1.40 | 933.32 | 0.19 |
| | 水域 | 0.34 | 0.44 | 1.45 | 0.24 | 10.70 |
| | | 2000 年 | | | | |
| | | 草地 | 耕地 | 建筑用地 | 林地 | 水域 |
| 2020 年 | 草地 | 248.31 | 12.93 | 0.67 | 2.79 | 0.25 |
| | 耕地 | 18.44 | 468.04 | 0.95 | 17.49 | 0.38 |
| | 建筑用地 | 52.48 | 132.56 | 179.92 | 57.02 | 0.50 |
| | 林地 | 21.59 | 29.98 | 1.54 | 899.15 | 0.30 |
| | 水域 | 0.39 | 0.51 | 0.04 | 1.73 | 10.50 |

注:行标题代表研究初期土地利用类型,列标题代表研究末期土地利用类型,数字代表研究初期土地利用类型转向研究末期土地利用类型的面积。

转出类型以建筑用地与林地为主;水域的转入面积约为转出面积的 2 倍,可能是水库、水塘与水电站等水利设施的建筑,侵占了周围的林地、草地与耕地面积,而使水域面积增加明显。

3.3 生态系统服务功能对土地利用变化响应研究

3.3.1 不同土地利用类型水源涵养量变化 通过对 2000—2020 年流域水源涵养量进行分区统计(图 6)可知,不同土地利用类型下水源涵养量从大到小依次为林地>耕地>草地>建筑用地>水域。林地水源涵养量占流域水源涵养总量百分比超过 50%,说

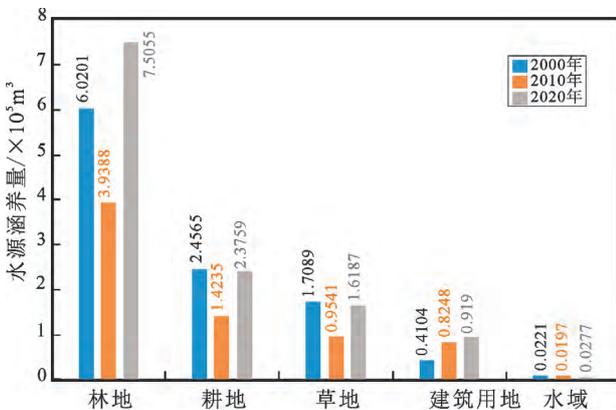


图 6 2000—2020 年南明河流域不同土地利用类型下水源涵养量变化情况

Fig. 6 Water conservation changes under different land use types in Nanming River Watershed from 2000 to 2020

明林地是研究区涵养水源最有效且重要的土地利用方式,对控制和减少水土流失起着积极作用。2000—2010 年,除建筑用地外,其余地类的水源涵养量均有所下降,平均降幅为 33.66%,其中以耕地降幅最为明显,达到 44.05%。2012 年开始,南明河流域因退耕还林、两岸景观综合整治建筑等工程取得了显著成效,水源涵养量整体呈现上升趋势,增长率为 16.98%。

3.3.2 不同土地利用类型碳储量变化分析 由图 7 可知,2000—2020 年,流域内林地的平均碳储量为 258.54 t,占流域平均总碳储量的 65.09%,是耕地、

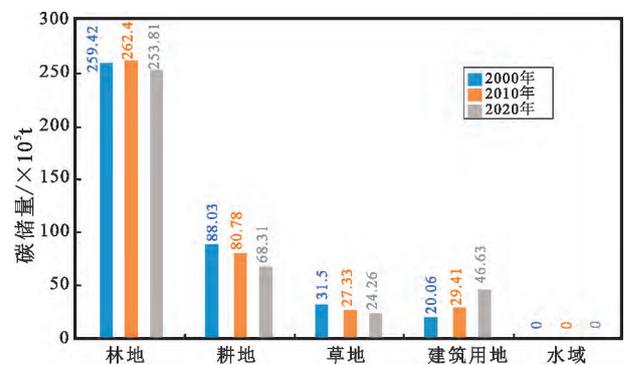


图 7 2000—2020 年南明河流域不同土地利用类型下碳储量变化情况

Fig. 7 Carbon storage changes under different land use types in Nanming River Watershed from 2000 to 2020

草地和建筑用地平均碳储量的 3.27 倍、9.34 倍和 8.08 倍,而成为流域最主要的碳库。耕地的碳储量虽然在研究期内持续减少,但平均碳储量占流域总碳储量的 19.80%,仅次于林地。此外,建筑用地碳储量持续增加,2020 年为 46.63×10^5 t,是 2000 年的 2.32 倍,草地、耕地面积的减少伴随碳储量下降,研究期内两者的碳储量减少率分别为 22.40%、22.98%。因此在城市流域的生态修复方面要加大对草地、耕地的保护力度。

4 讨论

如前文所述,2000—2020 年南明河流域平均水源涵养能力为 44 mm,单位面积平均碳储量为 1.77×10^4 t,将本研究所得数据与相近区域通过相同方法得到数据进行对比,夏林(2019)的研究发现贵州省内乌江流域水源涵养量约为 55.12 mm,与本研究得到的流域水源涵养量较为接近;但却明显低于我国非喀斯特地区(张福平等,2018;陈泽怡,2022),因此,如何提升喀斯特地区流域生态系统服务功能仍是需要重点关注的科学问题。随着城市化快速推进带来的人类活动加剧,为满足不断增加的建筑用地需求,流域上游大量建筑用地不断向外扩张,挤占周围林地、耕地,致使下垫面硬化,造成蓄渗降雨的能力减弱,上游地区水源涵养功能明显下降,这与土地利用变化的空间分布相一致。除了发挥重要的水源涵养功能以外,林地和耕地也是重要的固碳地类,而建筑用地作为人工生态系统的主体,碳储存功能较弱。通过碳储量转移矩阵进行统计,发现研究期内林地转建筑用地是碳储量减少的主要原因,耕地次之,两者转建筑用地分别导致碳储量减少 8.55×10^5 t、 2.18×10^5 t,而草地转林地、耕地在一定程度上弥补了这一损失,20 年间,草地转林地、耕地共使流域碳储量增加 4.47×10^5 ,因此,未来流域发展应综合统筹城市发展与林地、耕地保护措施,实现区域绿色可持续发展。

本研究以南明河流域为研究对象,在典型喀斯特流域生态系统服务功能对土地利用变化的研究中取得了一定研究成果,结果可为流域土地可持续利用、制定生态恢复策略提供科学借鉴。但是本研究是在 30 m 分辨率遥感影像资料的基础上,通过人机交互解译获取的流域 2000、2010 和 2020 年土地利用数据,研究过程存在一定的主观判断,不利于对生态系统服务功能开展精准评估,因此,今后的研究应加强跨尺度综合性研究,提升解译精度,为强化结果准确性提供坚实的数据基础。

在 InVEST 模型的运行和使用中,碳模块一定程度上简化了碳循环过程,以各个地类静态的碳密度作为估算碳储量的基础数据,忽视了相同土地利用类型内部碳密度的空间异质性,导致估算精度容易受到影响。因此,未来的研究中应考虑结合大量野外实测数据的调查与获取,充实动态碳密度数据库,与此同时,加强样地碳密度数据的监测,确保碳密度数据的合理性,从而提高碳储量估算精度。

5 结论

本研究采用 ArcGIS 软件分析南明河流域 20 年长时间序列下的土地利用数据变化特征,结合 InVEST 模型,以及相关气象、土壤和地形等数据分析了 2000—2020 年南明河流域不同土地利用类型的水源涵养功能和碳储存功能,得出以下结论:

(1) 2000—2020 年,南明河流域水源涵养量整体呈现下降—上升的变化趋势;水源涵养量与碳储量的高值区主要集中在林地、以及草地集中分布的东北部;

(2) 21 世纪以来,南明河流域土地利用变化特征表现为“两增三减”,其中,建筑用地的年变化速度最大,达到 13.07%;

(3) 流域内林地水源涵养量占流域水源涵养总量的 57.83%,碳储量占流域总碳储存量的 60.09%,是流域最主要的碳库。上游地区大面积的林地和耕地向建筑用地发生转移,生态系统服务功能下降明显。研究识别了 21 世纪以来在土地利用变化的影响下,流域生态系统服务功能下降的主要区域及原因,可为流域实行生态环境分区管控、制定生态系统服务功能恢复策略、促进流域健康和稳定提高科学依据。

参考文献 (References):

- Gupta S C, Larson W E. 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. *Water Resources Research*, 15(6): 1633-1635
- Styers D M, Chappelka A H, Marzen L J, Somers G L. 2010. Developing a land-cover classification to select indicators of forest ecosystem health in a rapidly urbanizing landscape. *Landscape and Urban Planning*, 94(3-4): 158-165
- 包玉斌,李婷,柳辉,马涛,王怀香,刘康,沈茜,刘心浩. 2016. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化. *地理研究*, 35(4): 664-676
- 陈春谔. (2022-03-23). 生态系统服务研究:从理论研究走向实践应用. *生态学报*, 2022, (14): 1-11 <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20220321.1807.049.html>
- 陈谋会,林泽北,周学霞,伍斌,王志杰. 2022. 基于 InVEST 的黔

- 中喀斯特山地城市贵阳市生态系统服务评估. 贵州林业科技, 50(3): 56-61
- 陈泽怡, 余珮珩, 陈奕云, 江颂, 顾世祥, 白少云, 刘斌. 2022. 汉江流域水源涵养和水质净化服务时空分析. 生态经济, 38(4): 193-200
- 陈竹安, 刘子强, 危小建, 刘明钊. 2022. 2000—2019年鄱阳湖生态经济区水源涵养时空变化. 测绘通报, (8): 1-6
- 邸欣月, 安显金, 董慧, 汤海明, 肖保华. 2015. 贵州喀斯特区土壤有机质的分布与演化特征. 地球与环境, 43(6): 697-708
- 黄国金. 2020. 基于 InVEST 模型喀斯特流域生态系统服务功能评估——以贵州乌江流域中游遵义段为例. 硕士学位论文. 贵州: 贵州师范大学
- 胡先培, 吴帮雄. 2020. 喀斯特小流域土地利用转型对生态系统服务价值的影响. 贵州科学, 38(6): 49-57
- 李海忠. 2018. 城市化建筑对流域的影响. 吉林农业, (24): 126
- 李力, 赵健, 薛晓飞, 白瑶, 朱楦, 左剑恶. 2018. 贵州南明河水环境综合整治与水质模拟. 环境科学学报, 38(5): 1920-1928
- 李义平, 蔡宏, 田鹏举, 张蓓蓓, 廖书冰. 2020. 贵州省黎平县地表覆被变化引起的生态系统碳储量变化. 水土保持通报, 40(2): 92-99
- 李怡颖, 范继辉, 廖莹. 2020. 基于 InVEST 模型的张家口市水源涵养功能时空差异分析. 草业科学, 37(7): 1313-1324
- 刘树锋, 陈记臣, 关帅, 崔静思. 2022. 基于 InVEST 模型的杨溪河流域土地利用变化对水源涵养功能的影响. 科学技术与工程, 22(12): 4746-4751
- 刘菊, 傅斌, 张成虎, 胡治鹏, 王玉宽. 2019. 基于 InVEST 模型的岷江上游生态系统水源涵养量与价值评估. 长江流域资源与环境, 28(3): 577-585
- 刘园, 周勇, 杜越天. 2019. 基于 InVEST 模型的长江中游经济带生境质量的时空分异特征及其地形梯度效应. 长江流域资源与环境, 28(10): 2429-2440
- 刘永强, 龙花楼, 李加林. 2018. 长江中游经济带土地利用转型及其生态服务功能交叉敏感性研究. 地理研究, 37(5): 1009-1022
- 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 1999. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. 应用生态学报, (5): 635-640
- 谭秋. 2009. 贵州连续性石灰岩小流域石漠化景观格局研究. 矿物岩石地球化学通报, 28(3): 217-222
- 王秋红, 王勇, 李维杰, 高敏, 傅俐. 2022. 喀斯特山地城市生态系统服务变化及关系研究——以贵阳市为例. 西南大学学报(自然科学版), 44(5): 158-168
- 魏玺, 邵亚, 蔡湘文, 林珍铭, 肖连刚, 刘泽昊. 2022. 漓江流域陆地生态系统碳储量时空特征与预测. 环境工程技术学报: 1-13
- 吴松, 安裕伦, 马良瑞. 2015. 城市化背景下喀斯特流域生态服务价值时空分异特征——以贵阳市南明河流域为例. 长江流域资源与环境, 24(9): 1591-1598
- 夏雪敏, 肖保华. 2017. 贵州喀斯特地区黄壤有机质及其中胡敏酸的碳同位素组成特征. 矿物岩石地球化学通报, 36(1): 166-170
- 夏林, 安裕伦, 姜海峰, 伍显, 郝新朝. 2019. 基于 InVEST 模型的喀斯特流域水源涵养量——以贵州省内乌江流域为例. 贵州科学, 37(1): 27-32
- 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 2015. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 30(8): 1243-1254
- 杨君, 周鹏全, 袁淑君, 谭鑫, 娄知斐. 2022. 基于 InVEST 模型的洞庭湖生态经济区生态系统服务功能研究. 水土保持通报, 42(1): 267-272, 282
- 杨静怡, 吴峰. 2020. 贵阳市 1980-2018 年土地覆盖类型及碳储量变化研究. 西南林业大学学报, 40(4): 115-121
- 张徐, 李云霞, 吕春娟, 毕如田, 夏露, 郭岩松, 王煜, 许彩彩, 孙波. 2022. 基于 InVEST 模型的生态系统服务功能应用研究进展. 生态科学, 41(1): 237-242
- 张夏广益. 2021. 贵阳市南明河流域水环境治理成效及展望. 黑龙江水利科技, 49(7): 223-225
- 张燕. 2021. 贵阳南明河打赢 8 年治理保卫战. 中国经济周刊, (14): 94-95
- 张福平, 李肖娟, 冯起, 王虎威, 魏永芬, 白皓. 2018. 基于 InVEST 模型的黑河流域上游水源涵养量. 中国沙漠, 38(6): 1321-1329
- 张志强, 陈鹏飞, 申维. 2017. 长武县土地利用/覆被演变规律及其影响下生态服务价值变化研究. 水土保持研究, 24(4): 219-226
- 张平平, 李艳红, 殷浩然, 陈全通, 董庆栋, 朱连奇. 2022. 中国南北过渡带生态系统碳储量时空变化及动态模拟. 自然资源学报, 37(5): 1183-1197
- 周浩, 于晓英, 李晶. 2017. 流域生态系统研究进展. 现代农业科技, (2): 164, 171
- 周世会. 2021. 贵州高原河流水生态健康评价体系的建立及其在南明河中应用. 硕士学位论文. 贵州: 贵州师范大学
- 朱殿珍, 初磊, 马帅, 王良杰, 张金池. 2021. 青藏高原生态屏障区生态系统服务权衡与协同关系. 水土保持研究, 28(4): 308-315

(本文责任编辑:刘莹,胡宇思;英文审校:肖保华)