

张美琪,陈波,赵敏.贵州省湿地碳储量与碳中和潜力分析[J].地质科技通报,2023,42(2):315-326.

Zhang Meiqi, Chen Bo, Zhao Min. Analysis of the carbon stock and carbon neutral potential of wetlands in Guizhou Province[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(2): 315-326.

贵州省湿地碳储量与碳中和潜力分析

张美琪¹, 陈波¹, 赵敏²

(1. 贵州财经大学, 贵阳 550025; 2. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081)

摘要: 湿地作为缓解气候变化的关键生态系统,在碳捕获与碳封存方面发挥着不可替代的作用。湿地碳储量和影响因素的分析以及固碳潜力的预测,对湿地生态保护与管理、国家“双碳”目标实现具有重要意义。应用 ArcGIS 10.8 对《贵州省湿地保护发展规划》(以下简称规划)的 3 个时期(分别是:1999—2009 年;2010—2018 年;2018 年至今)湿地分布图采用遥感目视解译的方式进行矢量化并根据贵州省岩溶发育强度进行分区。采用生命带研究法与生物量估算法等对贵州省湿地面积和碳储量变化进行估算分析,对重要湿地碳储量与单位面积碳储量进行估算并与全省湿地进行对比,采用固碳潜力计算模型对贵州省重要湿地固碳潜力进行估算,应用 Origin 软件对各相关影响因子进行数据分析。结果表明:①贵州省湿地规划前期的面积为 216 526.95 hm²,规划中期面积为 209 726.85 hm²、规划后期面积为 255 440.53 hm²,总体表现为先下降再升高,总体面积增加 38 913.58 hm²;②贵州省湿地碳储量变化为:规划前期为 5.97×10⁵ t,规划后期为 3.78×10⁶ t,是规划前期的 6 倍以上,碳储量增加明显。其中,贵州省重要湿地碳储量为 3.24×10⁶ t,占全省湿地碳储量 85.71%,固碳潜力十分显著;③贵州省重要湿地的固碳潜力为 1.14×10⁴ t C/a,预计到 2030 和 2060 年,湿地总固碳量分别达到 7.99×10⁶ t C 和 8.34×10⁶ t C;④温度、DIC 浓度、有机碳含量与面积对贵州省重要湿地的碳储量影响较大,重要湿地碳储量与 DIC 浓度、有机碳含量以及面积呈正相关,而与温度呈负相关关系。对贵州省的湿地碳储量估算与碳中和潜力分析不仅可以了解贵州省湿地碳封存现状,还可为区域湿地生态系统在“3060”双碳目标的贡献上提供理论参考。

关键词: 湿地;碳储量;碳中和;固碳潜力;贵州省;湿地规划

中图分类号: X141 文章编号: 2096-8523(2023)02-0315-12 收稿日期: 2022-07-14

doi: 10.19509/j.cnki.dzkg.tb20220358

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of the carbon stock and carbon neutral potential of wetlands in Guizhou Province

Zhang Meiqi¹, Chen Bo¹, Zhao Min²

(1. Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China;

2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China)

Abstract: As a key ecosystem for climate change mitigation, wetlands play an irreplaceable role in carbon capture and sequestration. The analysis of wetland carbon stocks and their influencing factors, as well as the prediction of carbon sequestration potential, are of great significance to the conservation and management of wetlands and the achievement of the national "double carbon" target. This study employed ArcGIS 10.8 to vectorize the wetland distribution map of the Wetland Protection and Development Plan of Guizhou

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2021]一般 456);贵州财经大学校级科研基金项目(2022KYQN05)

作者简介: 张美琪(1998—),女,现正攻读土地资源管理专业硕士学位,主要从事土地生态治理与碳中和研究工作。E-mail: 1489777839@qq.com

通信作者: 陈波(1990—),男,副教授,主要从事气候变化与岩溶作用碳循环、土地生态治理与碳中和研究工作。E-mail: bob-chen@mail.gufe.edu.cn

Province (hereinafter referred to as the Plan) for three periods (1999—2009, 2010—2018, and 2018—present, respectively) by means of remote sensing visual interpretation and zoned them according to the intensity of karst development in Guizhou Province. The changes in wetland area and carbon stock in Guizhou Province were estimated and analyzed using the life belt research method and biomass estimation method, and the total carbon stock and carbon stock per unit area of key wetlands were estimated and compared with those of all wetlands in Guizhou Province. A calculation model was used to estimate the carbon sequestration potential of the key wetlands in Guizhou Province. The Origin software was applied to analyze the data on all relevant impact factors. The results showed that: ① The area of wetlands in Guizhou Province was 216,526.95 hm², 209,726.85 hm², and 255,440.53 hm² in the pre-, mid-, and late-planning periods, respectively, with an overall decrease and then increase, and the total area increased by 38,913.58 hm²; ② The wetland carbon stock in Guizhou Province was 3.78×10⁶ t in the late stage of planning, increasing significantly to more than 6 times of that in the early stage of planning (5.97×10⁵ t), among which the carbon stock of the key wetlands was 3.24×10⁶ t, accounting for 85.71% of the province's wetland carbon stock; ③ The carbon sequestration potential of the key wetlands in Guizhou Province was 1.14×10⁴ t C/a, and the total carbon sequestration of wetlands is expected to reach 7.99×10⁶ t C and 8.34×10⁶ t C by 2030 and 2060, respectively; and ④ The carbon stock of the key wetlands was positively correlated with DIC concentration, organic carbon content and wetland area and negatively correlated with temperature, indicating that temperature, DIC concentration, organic carbon content and wetland area had a strong influence on the carbon stock of the key wetlands in Guizhou Province. The results of this study will not only facilitate the understanding of the current status of wetland carbon sequestration in Guizhou Province but also provide a theoretical reference for the contribution of regional wetland ecosystems to the "3060" dual carbon target.

Key words: wetlands; carbon stock; carbon neutral; carbon sequestration potential; Guizhou Province; wetlands planning

1 研究背景

人类正在面临全球气候变暖所带来的巨大挑战,2018年IPCC特别报告中模拟了全球气温升高1.5℃与2℃所带来的巨大影响,相比较2℃来说,1.5℃对自然与生态系统以及人类的影响较小^[1]。因此将温度升高范围控制在1.5℃范围内是人类应对气候变化的主要目标。减少碳排放、增强生态系统固碳能力、实现碳中和是缓解气候变化的重要手段。碳储量在调节生态系统碳平衡方面发挥着重要的作用,能够有效调节区域气候^[2-6]。除森林碳库外,湿地作为三大生态系统之一,在碳储存方面也发挥着重要的作用。湿地最初以泥炭湿地的经济价值走入人们的视野中,自2009年气候变化大会以来,湿地在全球碳循环中的作用被越来越多研究者关注,成为研究热点^[7-11]。一些研究者认为湿地碳储存能力是其他生态系统的10倍,在应对全球气候变化与平衡碳循环方面占主导地位^[12-13]。对湿地碳储量的时空变化进行探索分析,可以直观地看到碳储量的变化,并以此为基础对湿地碳储量进行未来的预测分析,估算湿地碳中和的潜力。贵州省湿地面积占全省国土面积的1.19%,包括河流、湖泊、沼泽

与人工湿地4大类型,主要分布在岩溶发育区。相比其他湿地类型,河流湿地快速的元素地球化学迁移—转化过程,导致其碳储量具有较高的不确定性,国内外相关研究较少,而河流湿地的高DIC岩溶特征可通过碳酸盐岩风化耦联生物碳泵形成稳定碳汇。因此,本研究除分析湖泊和沼泽湿地外,还讨论贵州河流湿地的碳储量。对贵州省的湿地碳储量估算与碳中和潜力分析不仅可以了解贵州省湿地碳封存现状,还可为贵州省重要湿地的碳中和潜力预测以及对“3060”双碳目标的贡献提供理论依据。

2 材料与研究方法

2.1 研究区概况

贵州省位于中国的西南部,介于东经103°36′~109°35′、北纬24°37′~29°13′之间,由于其地形和纬度的因素,导致贵州省区域内具有多种气候特征,全年降雨量多。区域内地形高低起伏,多以山地和丘陵为主,具有典型的岩溶地貌特征。在区域内有多条河流,长度在10 km以上的河流数达984条,区域内河流域总面积约为115 747 km²,占全省国土面积的65.7%。区域内全年平均气温为15.7℃,年

平均降水量 952.48 mm, 年平均日照时数为 1 175.75 h。目前全省湿地面积约为 25 万公顷, 主要类型为河流湿地、湖泊湿地、沼泽湿地与人工湿地, 分别占总湿地面积的 57.58%, 1.42%, 2.04%, 38.95%。

2.2 数据来源及预处理

对贵州省湿地碳储量估算以湿地政策为时间节点, 将其分为 3 个时期进行估算。贵州省于 2014 年发布《贵州省湿地保护发展规划》, 笔者以此将贵州省湿地碳储量变化分为规划前期与规划中期碳储量变化。规划前期以贵州省第一次湿地调查时间也就是第一次全国湿地调查时间为基准; 规划中期以全国第二次湿地调查时间为基准; 贵州省于 2018 年发布了第一批贵州省重要湿地名单, 规划后期碳储量计算以近四年的调查以及文献数据为基准。所有时期的时间以政策开始实施时间为主上下浮动, 即第一时期时间范围为 1999—2009 年、第二时期时间范围为 2010—2018 年, 第三时期的时间范围为 2018 年至今。第一、二时期与贵州省重要湿地的矢量化数据基准图、3 个时期内湿地土壤、植被、河流化学特性以及径流量、径流深、湿地面积等数据, 本研究湿地矢量数据分别来源于《中国湿地资源贵州篇》^[14], 土壤、植被与河流数据来源于《基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集》^[15]、中国科学数据的《2010s 中国陆地生态系统碳密度数据》^[16]、知网检索文献数据^[17-36], 湿地面积及降水、温度数据来源于《中国湿地资源贵州篇》^[14]、《贵州水资源公报》^[37]、《贵州省第一批重要湿地名录》^[38]及《贵州省第三次全国国土调查主要数据公报》^[39]。

运用 ArcGIS10.8 软件根据 3 个时期的湿地数据进行矢量化, 得到规划中、后期的湿地分布图。应用掩膜提取法将《基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集》中的贵州省数据进行提取, 得到贵州省湿地厚度、容重、有机碳含量、石砾占比等数据。按照经纬度范围提取出《2010s 中国陆地生态系统碳密度数据》中的贵州省碳密度数据, 此数据库中包括规划前期与规划中期的土壤碳密度, 规划后期数据通过计算得到。

2.3 研究方法

湿地生态系统的陆生—水生重叠特殊性使其类型多样且具有不同的碳储量分布模式。前人对湿地碳储量的研究覆盖了各种气候区域与湿地类型, 主要包括对湿地中陆地碳库与水生碳库 2 种碳储存形式估算^[40-43]。陆地碳库估算研究主要集中在对地上生物量、地下生物量、枯死木生物量、枯落物生物量以及土壤碳密度估算 5 个方面。水生碳库的碳储量估算研究对陆地碳储量估算研究来说相对较少, 对

水生碳库的碳储量估算研究应集中于水生植物生物量、水体碳储量和沉积物碳储量 3 个方面。根据研究区的实际情况与数据获取情况, 对贵州省湿地碳储量选用湿地土壤碳储量、湿地植被碳储量与水体碳储量进行计算。

2.3.1 湿地土壤碳储量

湿地土壤由于其长时间处于水淹的状态, 因此植物的分解速率较低、土壤储存的碳含量较高^[44]。基于《基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集》与《2010s 中国陆地生态系统碳密度数据》本研究采用生命带研究法^[45]对贵州省湿地碳储量进行估算, 即利用湿地土壤的碳密度与湿地类型面积 2 个指标进行估算, 因此土壤碳储量估算公式为:

$$GC_i = GD_i \times S_i \quad (1)$$

式中: GC_i 代表第 i 类贵州省湿地类型碳储量(t); GD_i 代表第 i 类贵州省湿地类型土壤碳密度(t/hm^2); S_i 代表第 i 类贵州省湿地面积(m^2)。

湿地土壤有机碳密度可以通过土壤容重(g/cm^3)、土层厚度(m)与土壤有机质含量(%)进行计算, 公式为:

$$GD_i = H_i \times C_i \times D \times (1 - Z_i) / 10 \quad (2)$$

式中: GD_i 为贵州省湿地土壤碳密度($t C/hm^2$); H_i 为贵州省土壤容重(g/cm^3); C_i 为土壤有机质含量(%); D 为土层厚度(m); Z_i 为直径大于 2 mm 的石砾所占的体积百分比。

2.3.2 湿地植被碳储量

对于湿地植被碳储量的估算, 一般通过其地上以及地下的生物量进行估算, 常用的方法有样地实测法、非破坏性估算法、基于遥感信息估测法以及生物量遥感估算模型等^[46]。根据知网已发表的湿地土壤数据以及碳密度数据集, 选取湿地植被地上与地下生物量与现有的植被碳密度数据对贵州省湿地植被碳储量进行估算, 植被碳密度通常采用植被生物量乘以其相关的碳转换系数进行估算。碳转换系数 ρ 一般为 0.5^[47-48]。贵州省湿地植被碳储量计算公式为:

$$D_i = \rho \times S_i \times Q_i \quad (3)$$

式中: D_i 为贵州省第 i 类湿地植被碳储量(t); ρ 为碳转换系数; S_i 为贵州省第 i 类湿地植被面积(m^2); Q_i 为第 i 类贵州省湿地植被生物量($t C/hm^2$)。

2.3.3 湿地水体碳储量

贵州省湿地以河流湿地为主, 约占全省湿地面积的 60%左右。目前对于水体碳储量的计算相对较少, 本研究根据 Buffam 等^[49]所提出的水体碳储量估算方式进行改进计算^[50], 计算公式为:

$$SC = (DOC + DIC) \times L \quad (4)$$

式中: SC 为贵州省湿地水体碳储量(t); DOC 为水

中有机碳的浓度(mg/L); DIC 为水中溶解无机碳(HCO_3^- 为主)浓度(mg/L); L 为径流量(m^3)。

3 分析与讨论

3.1 贵州省湿地碳储量时空动态变化

3.1.1 贵州省湿地面积变化

从1995—2003年《第一次全国湿地资源调查》为起始点,贵州省湿地资源的面积才有了大致范围。在第一次全国湿地调查中贵州省湿地面积为216 526.95 hm^2 ,将贵州省湿地资源分为自然湿地与人工湿地两类进行面积测定。自然湿地中包括河流湿地、湖泊湿地与沼泽湿地,总面积为166 351.16 hm^2 ,占湿地总面积的76.83%。人工湿地包括库塘等,总面积为50 175.79 hm^2 ,占总面积的23.17%(表1)。

表1 贵州省不同类型湿地面积变化

Table 1 Changes in the area of different types of wetlands in Guizhou Province

湿地类型	时期	面积/ hm^2	占比/%
河流湿地	规划前期	166 351.16	76.83
	规划中期	138 154.76	65.87
	规划后期	147 089.20	57.58
湖泊湿地	规划前期	—	—
	规划中期	2 517.70	1.21
	规划后期	3 637.40	1.42
沼泽湿地	规划前期	—	—
	规划中期	10 978.70	5.23
	规划后期	5 213.93	2.04
人工湿地	规划前期	50 175.79	23.17
	规划中期	58 075.69	27.69
	规划后期	99 500.00	38.95

对于第二个时期的湿地面积是参照全国第二次湿地调查数据《中国湿地资源贵州卷》,第二次湿地

调查结果显示贵州省湿地面积减少了6 800.00 hm^2 ,其中自然湿地面积减少了14 700.00 hm^2 ,人工湿地面积增加了7 900.00 hm^2 。湿地总面积为209 726.85 hm^2 (表1)。

根据第三次全国国土调查数据显示,贵州省湿地面积总体上升,各类湿地类型面积有所增加。由于三调数据中并未对贵州省湿地类型的面积进行详细划分,因此同时参考贵州省重要湿地数据与第三次全国国土调查数据进行分析。目前贵州省具有湿地面积255 440.53 hm^2 ,其中有河流湿地面积147 089.20 hm^2 、湖泊湿地面积3 637.40 hm^2 、沼泽湿地面积5 213.93 hm^2 以及人工湿地面积99 500.00 hm^2 (表1)。

贵州省于2018年发布第一批重要湿地名单,涵盖贵州省所有主要类型的湿地。其中河流湿地面积最大为27 710.12 hm^2 ;湖泊湿地为3 637.40 hm^2 ,其中威宁草海地为最典型的湖泊湿地,面积最大;沼泽湿地面积为5 213.93 hm^2 ,具有独特的岩溶森林沼泽;人工湿地面积为4 615.40 hm^2 (表2)。

表2 贵州省重要湿地面积

Table 2 Area of key wetlands in Guizhou Province

湿地	湿地类型	湿地面积/ hm^2	占比/%
自然	河流湿地	37 710.21	73.69
	湖泊湿地	3 637.40	7.11
	沼泽湿地	5 213.93	10.19
人工	人工湿地	4 615.40	9.02
总和		51 176.85	100.00

根据《中国湿地资源贵州篇》中的贵州省湿地分布图,绘制规划后期的湿地资源面积变化图,根据《贵州省第一批重要湿地名录》中的经纬度、面积以及湿地的规划图,使用ArcGIS10.8矢量化功能绘制贵州省重要湿地矢量图(图1)。

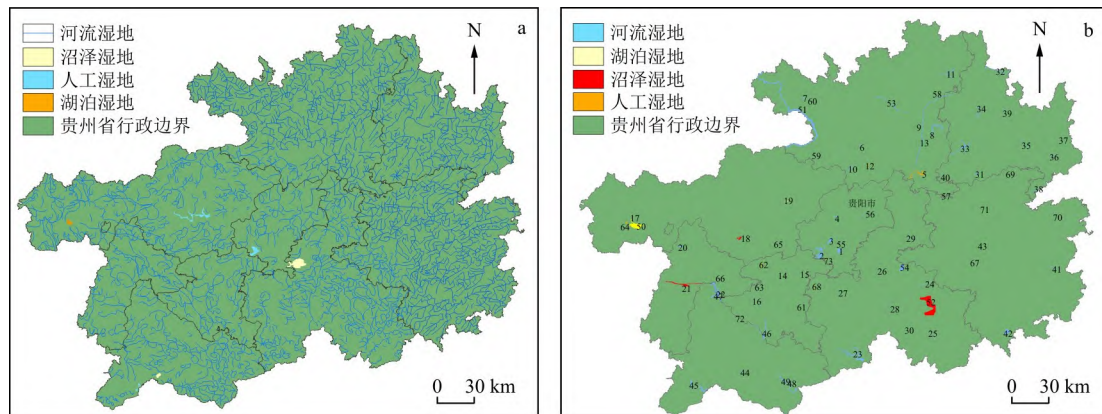


图1 规划后湿地(a)与重要湿地(b)

Fig. 1 Post-planning wetlands (a) and the key wetlands (b)

3.1.2 贵州省不同时期湿地碳储量

贵州省湿地资源包括河流湿地、湖泊湿地、沼泽湿地、人工湿地 4 种类型, 河流型湿地类型多样, 是我国河流湿地水质最好的分布区。通过整理文献

[16-32, 37-39]和《基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集》以及《2010s 中国陆地生态系统碳密度数据》数据库提取分析, 得到贵州省湿地碳储量变化的基准数据(表 3)。

表 3 计算数据及来源

Table 3 Data used for calculation and their sources

时期	数据名称	数值	数据来源
规划前	湿地面积/hm ²	216 526.95	文献[14]
	HCO ₃ ⁻ 质量浓度/(mg · L ⁻¹)	177.52	文献[17]
	湖泊植被碳储量/t C	818.40	文献[18]
	土壤碳密度(0~100 cm)/(kg C · m ⁻²)	11.44	文献[16]
	河流径流量/亿 m ³	993.35	文献[37]
规划中	湿地面积/hm ²	209 726.85	文献[14]
	HCO ₃ ⁻ 质量浓度/(mg · L ⁻¹)	168.89	文献[25-29]
	DOC 质量浓度/(mg · L ⁻¹)	6.62	文献[19]
	湖泊植被生物量/(g · L ⁻¹)	107.00	试验数据
	沼泽植被碳密度/(kg C · m ⁻³)	3.71	文献[16]
	河流径流量/亿 m ³	977.75	文献[37]
	土壤碳密度(0~100 cm)/(kg C · m ⁻²)	5.57	文献[16]
	土壤容重/(g · cm ⁻³)	1.42	文献[15]
	土壤 CO ₂ 质量分数/(g · kg ⁻¹)	3.08	文献[15]
	土壤厚度/cm	94.49	文献[15]
石砾体积分数/%	6.79	文献[15]	
规划后	湿地面积/hm ²	255 440.53	文献[38-39]
	HCO ₃ ⁻ 质量浓度/(mg · L ⁻¹)	228.49	文献[22-24]
	DOC 质量浓度/(mg · L ⁻¹)	6.62	文献[19]
	植被碳密度/(kg C · m ⁻²)	37.33	文献[31]
	河流径流量/亿 m ³	1 141.44	文献[37]
	土壤容重/(g · cm ⁻³)	1.19	文献[30]
	土壤 CO ₂ 质量分数/(g · kg ⁻¹)	19.42	文献[30]
	土壤厚度/cm	37.23	文献[30]
	石砾体积分数/%	37.79	文献[30]
植被碳密度/(kg C · m ⁻²)	39.31	文献[31]	

根据表 3 中的基准数据与式(1~4)对贵州省的湿地碳储量进行估算, 结果显示, 贵州省湿地保护发展规划前期湿地碳储量为 5.97×10^5 t, 水体中有机碳密度为 10.58 g C/m^2 。自然湿地碳储量为 1.76×10^4 t, 人工湿地单位面积碳储量为 $1 150 \text{ g C/m}^2$, 人工湿地碳储量为 5.48×10^5 t。贵州省湿地单位面积碳储量为 275.72 g C/m^2 (表 4, 5)。

贵州省湿地保护发展规划中期贵州省湿地碳储量为 1.91×10^6 t, 其中河流湿地单位面积碳储量为 11.95 g C/m^2 , 河流湿地碳储量为 1.65×10^4 t; 湖泊湿地单位面积碳储量为 $29 530 \text{ g C/m}^2$, 湖泊湿地碳储量为 7.44×10^5 t; 沼泽湿地单位面积碳储量为 $7 420 \text{ g C/m}^2$, 沼泽湿地碳储量为 8.15×10^5 t; 人工湿地单位面积碳储量为 569.85 g C/m^2 , 人工湿地

碳储量为 3.31×10^5 t。贵州省湿地单位面积碳储量为 910.71 g C/m^2 (表 4, 5)。

贵州省湿地保护发展规划后期, 全省湿地碳储量为 3.78×10^6 t, 其中河流湿地单位面积碳储量为 17.74 g C/m^2 , 河流湿地碳储量为 2.61×10^4 t; 湖泊湿地单位面积碳储量为 $24 080 \text{ g C/m}^2$, 湖泊湿地碳储量 8.76×10^5 t。其单位面积碳储量高于呼伦贝尔市湖泊湿地^[51], 低于宁夏旱区湖泊湿地^[7]; 沼泽湿地单位面积碳储量为 $44 640 \text{ g C/m}^2$, 沼泽湿地碳储量为 2.33×10^6 t。其单位面积碳储量与我国东北地区沼泽湿地单位面积碳储量均值相近^[52], 低于全球北方主要沼泽湿地^[53-54], 高于我国滨海沼泽湿地; 人工湿地单位面积碳储量为 550.75 g C/m^2 , 人工湿地碳储量为 5.48×10^5 t, 贵州省湿地单位面积

碳储量为 $1\ 480\ \text{kg C/m}^2$ (表 4,5)。

表 4 贵州省湿地碳储量变化

Table 4 Changes in wetland carbon stock in Guizhou Province

湿地类型	时期	单位面积碳储量/ ($\text{g C} \cdot \text{m}^{-1}$)	总碳储量/t
河流湿地	规划前期	10.58	1.76×10^4
	规划中期	11.95	1.65×10^4
	规划后期	17.74	2.61×10^4
湖泊湿地	规划前期	—	—
	规划中期	29 530	7.44×10^5
	规划后期	24 080	8.76×10^5
沼泽湿地	规划前期	—	—
	规划中期	7 420.00	8.15×10^5
	规划后期	44 640.00	2.33×10^6
人工湿地	规划前期	1 150.00	5.79×10^5
	规划中期	569.85	3.31×10^5
	规划后期	550.75	5.48×10^5

表 5 贵州省湿地总碳储量变化

Table 5 Changes in total carbon stock of wetlands in Guizhou Province

时期	单位面积碳储量/ ($\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$)	总碳储量/t
规划前期	275.72	5.97×10^5
规划中期	910.71	1.91×10^6
规划后期	1 480.00	3.78×10^6

从总体上来看,贵州省湿地面积从规划前期到规划后期有所降低,碳储量有所升高。从图 2 中可以看出,贵州省湿地碳储量以 6 倍速度增长,贵州省湿地保护发展规划的实施对区域湿地碳增汇具有重要作用。从规划后期的估算结果来看,贵州省 4 种湿地类型单位面积碳储量的排序为:沼泽湿地 > 湖泊湿地 > 人工湿地 > 河流湿地,总碳储量排序与单位面积碳储量排序一致。由于河流湿地为流动性湿地,植被与土壤所占比重较小,因此只考虑了水体的有机碳储量,所以河流湿地的碳储量相对较少。

受人类剧烈活动和气候变化影响,沼泽湿地和

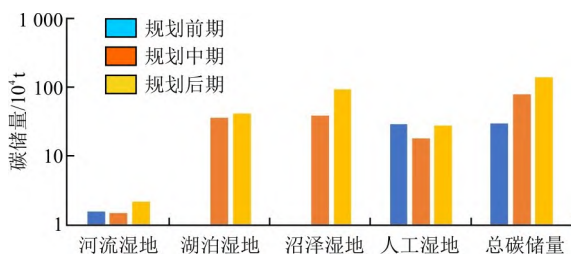


图 2 贵州省不同类型湿地碳储量变化图

Fig. 2 Changes in carbon stocks in different types of wetlands in Guizhou Province

湖泊湿地面积减少,全球变暖导致部分湖泊和沼泽湿地从碳汇转变为碳源,碳中和潜力具有很大不确定性。而贵州河流湿地占全省湿地面积的 60% 以上,单位面积碳储量达到 $17.74\ \text{g C/m}^2$,且河流湿地碳储量逐期升高;在碳酸盐风化耦联生物泵效应驱动下形成稳定碳汇并转运到海洋,而这部分碳汇未被纳入河流湿地固碳量中来,碳中和潜力被严重低估。

3.2 贵州省重要湿地碳储量与碳中和潜力

3.2.1 贵州省重要湿地碳储量

贵州省重要湿地碳储量为 $3.24 \times 10^6\ \text{t}$,单位面积碳储量为 $6.33\ \text{kg C/m}^2$ 。贵州省重要湿地中河流湿地碳储量为 $6.69 \times 10^3\ \text{t}$ 、湖泊湿地碳储量为 $8.76 \times 10^5\ \text{t}$ 、沼泽湿地碳储量为 $2.33 \times 10^6\ \text{t}$ 、人工湿地碳储量为 $2.54 \times 10^4\ \text{t}$,重要湿地碳储量占全省湿地碳储量 85.71%。根据各类湿地碳储量数据生成湿地碳储量位点图(图 3),碳储量最高的湿地位于贵州省南部,而西部重要湿地碳储量占全省最高,主要为湖泊和沼泽湿地。

3.2.2 贵州省重要湿地碳中和潜力

根据固碳潜力模型对贵州省重要湿地进行碳储量时空模拟,明确重要湿地的碳中和潜力,为湿地固碳发展保护研究提供科学依据。通过收集已发表的文献数据,根据湿地沉积物中的碳含量与沉积速率对湿地的固碳速率进行计算,以此对碳中和潜力进行预测分析,公式为:

$$CGS = H \times C \times R \quad (5)$$

式中:CGS 为固碳速率($\text{g C/m}^2\ \text{a}$);H 为土壤容重(g/cm^3);C 为土壤的碳含量(g C/kg);R 为湿地土壤的沉积速率。

由于贵州省重要湿地中河流湿地的面积较大,又因为贵州省独特的岩溶地貌特征,因此用岩石风化碳汇计算作为贵州省重要河流、人工湿地的固碳速率计算^[55],公式为:

$$CSF = n \times Q \times [DIC] \times 12/A \quad (6)$$

式中:CSF 为岩石风化碳汇强度;n 为岩石风化系数,贵州省碳酸盐岩风化占主要部分, $n=0.5$,表示碳酸盐岩溶解形成的 HCO_3^- 只有一半是来自大气中;Q 为流域径流排泄量;[DIC] 为水中溶解无机碳的浓度;12 为碳的原子量;A 为流域面积。

湿地土壤和容重存在负相关关系^[51],容重可以通过下式进行推算,公式为:

$$H = 1.665 \times C/10^{-0.887} \quad (7)$$

固碳潜力(CPS)由固碳速率(CG)与面积潜力(S)进行计算,公式为:

$$CPS = CGS \times S \quad (8)$$

根据上文中规划后期数据进行计算,得到贵州

省河流湿地固碳速率为 22.49 g C/m²a, 湖泊与沼泽数据参照段晓男等^[54]对近百年尺度上的湖泊湿地与沼泽湿地的固碳速率收集整理中的云贵高原地区湖泊湿地的固碳速率与泥炭、苔藓泥炭沼泽的固

碳速率进行计算, 湖泊湿地固碳速率为 20.08 g C/m²a、沼泽湿地固碳速率为 24.80 g C/m²a。由于贵州省重要湿地的人工湿地多为库塘, 水面占比较大, 因此其固碳速率采用河流湿地固碳速率(表 6)。

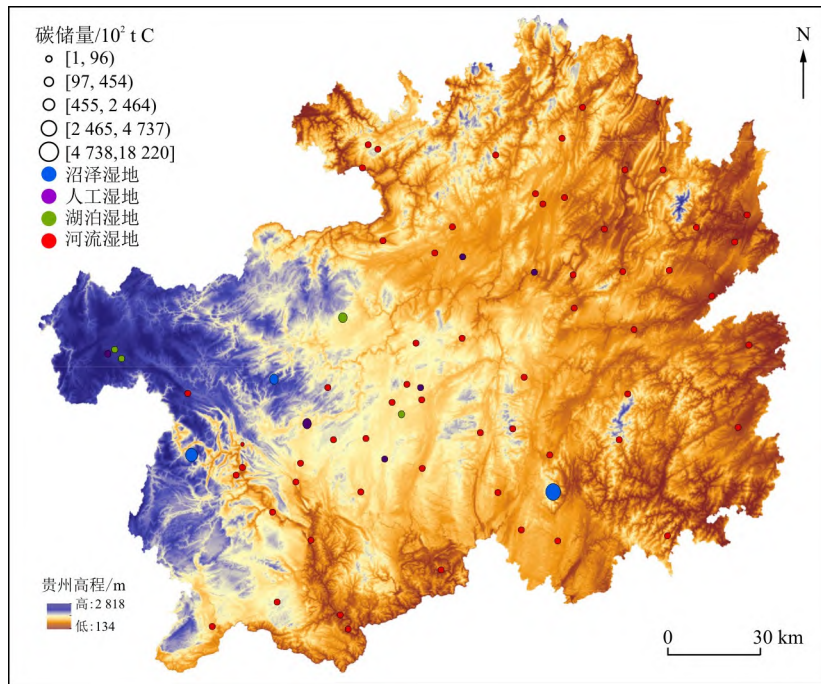


图 3 贵州省重要湿地碳储量位点图

Fig. 3 Site map showing carbon stock in the key wetlands in Guizhou Province

表 6 贵州省重要湿地固碳潜力

Table 6 Carbon sequestration potential of the key wetlands in Guizhou Province

湿地类型	面积/hm ²	固碳速率/ (g C · m ⁻² · a ⁻¹)	固碳潜力/ (t C · a ⁻¹)
河流湿地	37 710.12	22.49	8 480
湖泊湿地	3 637.40	20.08	730
沼泽湿地	5 213.93	24.80	1 293
人工湿地	4 615.40	22.49	1 038
总和	51 176.85		11 541

贵州省重要湿地固碳潜力为 1.15 × 10⁴ t C/a, 其中河流湿地的固碳潜力为 8.48 × 10³ t C/a, 占全省重要湿地固碳潜力的 74.13%, 远大于湖泊湿地、沼泽湿地与人工湿地的固碳潜力, 表明贵州省重要湿地的河流湿地具有巨大的碳中和潜力。河流湿地巨大的碳中和潜力表现在 2 个方面: 贵州省河流流域面积覆盖全省国土面积超过 60%; 另一方面, 河流单位面积碳储量 3 个时期稳定增长。根据固碳潜力数据绘制贵州省重要湿地固碳潜力位点图, 具有较大的固碳潜力的湿地位于贵州省西南地区, 其中固碳潜力最大的为河流型湿地(图 4)。

占用湿地进行农耕开垦是导致自然湿地资源减少的主要原因, 开垦湿地不仅使自然湿地的面积急剧减少, 还破坏自然湿地的理化性质与自然属性, 导致自然湿地碳储量的下降。按照贵州省发布的《2014—2030 年贵州省湿地保护发展规划》, 从 2020 年至 2025 年间, 退耕还湖还泽面积为 400 hm²。通过面积增加的面积潜力与其固碳速率得到退耕还湖还泽的固碳潜力为 6.82, 11.69 t C/a(表 7)。

表 7 贵州省湿地退耕还湖还泽固碳潜力

Table 7 Carbon sequestration potential of wetlands in Guizhou Province after returning farmland to lake and swamp

恢复措施	面积潜力/(hm ² · a ⁻¹)	固碳潜力/(t C · a ⁻¹)
退耕还湖	33.64	6.82
退耕还泽	47.12	11.69

按照贵州省发布的《2014—2030 年贵州省湿地保护发展规划》, 2014 年至 2030 年间湿地恢复与保护面积达到 16 000 hm², 2014 年至 2020 年间湿地恢复与保护面积为 7 500 hm², 即 2020 年至 2030 年间湿地恢复与保护 8 500 hm²。根据保护发展规划的政策实施, 湿地恢复与保护工程的固碳潜力为

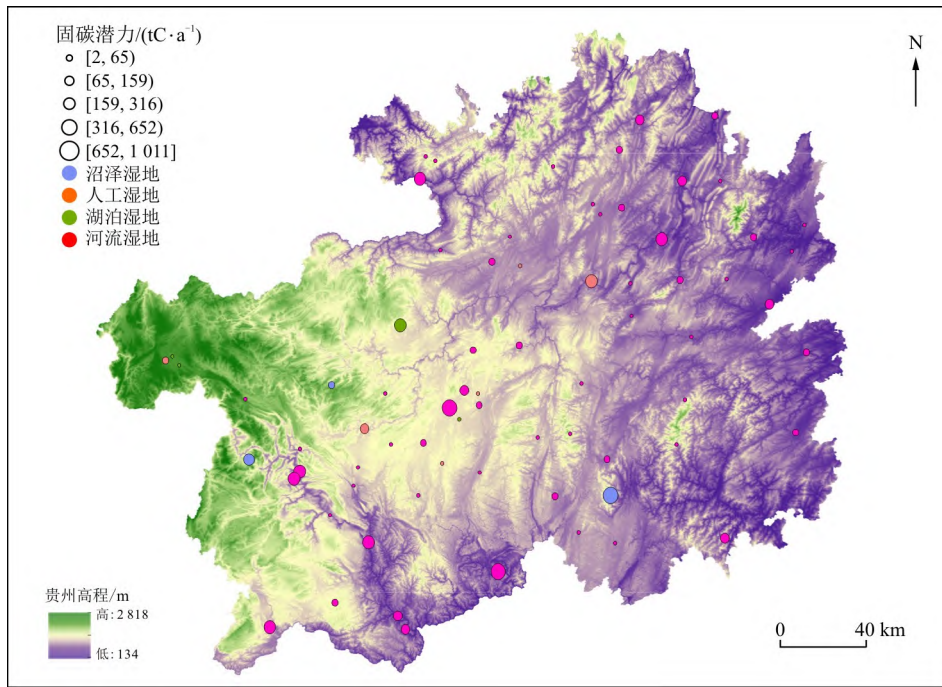


图4 贵州省重要湿地固碳潜力位点图

Fig. 4 Carbon sequestration potential site map of key wetlands in Guizhou Province

176.45 t C/a, 其中河流湿地固碳潜力最高为 127.27 t C/a, 占总固碳潜力的 72.13%, 湖泊湿地固碳潜力最小为 12.13 t C/a(表 8)。

表 8 贵州省湿地保护工程固碳潜力

Table 8 Carbon sequestration potential of wetland protection projects in Guizhou Province

湿地类型	面积潜力/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)	固碳潜力/($\text{t C} \cdot \text{a}^{-1}$)
河流湿地	626.330 1	140.86
湖泊湿地	60.413 8	12.13
沼泽湿地	86.598 5	21.48
人工湿地	76.657 5	15.58
总和	850.000 0	190.05

贵州省重要湿地固碳潜力为 1.14×10^4 t C/a, 预计到 2030 年, 贵州省重要湿地碳存量为 7.99×10^6 t C, 预计到 2060 年贵州省重要湿地碳储量为 8.34×10^6 t C。由于在计算过程中植被的生物量采用多年多种植被的均值进行计算, 估算数值会小于实际数值。因此, 贵州省重要湿地实际固碳潜力大于 1.14×10^4 t C/a。

3.3 湿地碳储量影响因素

3.3.1 湿地碳储量与岩溶发育程度相关性分析

贵州省碳储量时空变化受到多种因素的影响, 主要包括温度、降水、土壤性质、区域等方面。根据贵州省岩溶地质的特征按照岩溶程度进行分区, 并选取温度、降水、土壤容重等 8 个指标, 根据贵州省

重要湿地数据进行分析。

贵州省岩溶地貌分布超过全省国土面积 70%, 根据贵州省岩溶地貌特征并按照岩溶程度进行分区, 得到 5 个等级区: 强烈岩溶区(I)、较强岩溶区(II)、中等岩溶区(III)、较弱岩溶区(IV)与非岩溶区(V)(图 5)。根据上述公式与其他研究者数据对 5 个区域的重要湿地碳储量进行计算^[56-60], 计算结果如下: 强烈岩溶区碳储量为 2.05×10^5 t, 单位面积碳储量为 2.41 kg C/m^2 ; 较强岩溶区碳储量为 1.29×10^6 t, 单位面积碳储量为 7.90 kg C/m^2 ; 中等岩溶区碳储量为 2.54×10^5 t, 单位面积碳储量为 1.14 kg C/m^2 ; 较弱岩溶区碳储量为 2.99 t, 单位面积碳储量为 110.50 g C/m^2 ; 非岩溶区碳储量为 1.17 t, 单位面积碳储量为 158.79 g C/m^2 。较强岩溶发育区碳储量最高, 由于强烈岩溶发育区水土流失严重, 单位面积碳储量只有较强岩溶发育区的 1/3。

3.3.2 湿地碳储量空间分布的影响因素

根据上文中对 5 个区域的碳储量与碳密度计算结果, 并选取降水、温度、厚度、容重等 8 个指标, 运用 Origin 数据分析软件对上述指标进行相关性分析(图 6)。结果表明, 温度、DIC 值、有机碳含量与湿地面积与碳储量和碳密度相关性较大。其中, 贵州省重要湿地碳储量与温度呈现负相关、与湿地面积呈现正相关, 有机碳含量、DIC 浓度与碳密度的关系呈现显著正相关($p < 0.01$)。

贵州省重要湿地碳储量占全省碳储量的

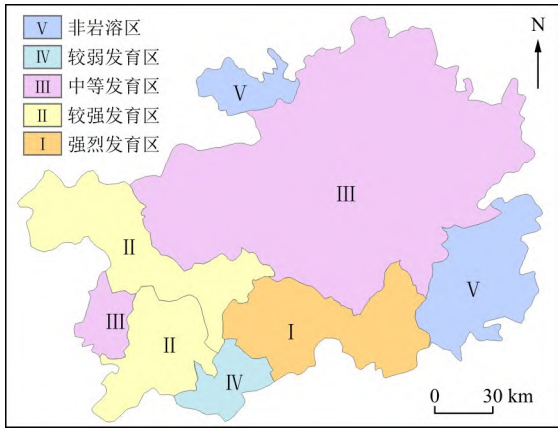


图 5 贵州省岩溶地貌发育等级

Fig. 5 Grade of karst landform development in Guizhou Province

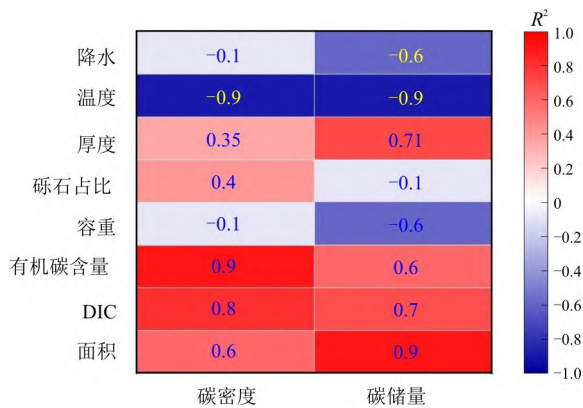


图 6 贵州省重要湿地碳密度和碳储量影响因子相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of carbon density and carbon stock influence factors in the key wetlands in Guizhou Province

85.71%，而贵州省岩溶地貌面积约占全省国土面积的 73.8%，岩溶地貌发育对贵州省湿地碳储量的影响显著，碳储量与碳密度随岩溶发育程度升高而增加，区域单位面积碳密度为：II > I > III > IV > V。原因有 2 方面：岩溶地质碳捕获主要通过碳酸盐风化形成碳汇来实现，岩溶地貌发育较强的地区，在相同的风化速率下，碳酸盐岩碳汇能力较强，因此碳储量较大；另一方面，岩溶地质发育强烈的地区，生境遭到破坏，土壤保水能力较弱，碳酸盐风化碳汇的能力降低。同时，升温会使得水面快速蒸发并导致河流径流量减少，而贵州省湿地中河流湿地面积最大，径流量的减少直接影响河流湿地的固碳潜力；此外，湿地植被的适宜生境面积受温度控制，影响湿地植被的碳储量。湿地土壤有机质碳含量对土壤碳密度具有重要的影响，是衡量碳密度的主要标准，并与土壤厚度共同影响碳储量的变化。土壤容重与碳储量呈现负相关，一般情况下，土壤容重越低，有机质碳

含量越高；反之，土壤容重越高，有机质碳含量越低。为响应国家“3060”“双碳”目标，贵州省出台湿地保护与发展、退耕还泽还湖、建立自然保护区和湿地公园等政策使湿地面积快速增长，贵州省湿地碳储量逐期增加。

4 结 论

(1)贵州省湿地主要以河流湿地为主，占湿地总面积的 57.58%。在规划前、中、后期的 20 余年来，湿地面积先减小后增加、碳储量逐期增长，规划后期的碳储量是规划前期碳储量的 6 倍，其中重要湿地单位面积碳储量是全省湿地平均单位面积碳储量的 4 倍，建设和划分重要湿地对贵州省湿地碳储量提升具有重要意义。

(2)贵州省湿地具有较高的固碳潜力，碳中和潜力不可忽视，湿地的科学管理和规划可为区域和国家“双碳”战略目标实现赢得时间窗口期并延长湿地生态碳汇服务周期。影响贵州省湿地碳储量主要因素包括温度、DIC 浓度、有机碳含量和面积，其中受温度的影响程度最大；同时还受 DIC 浓度的控制，且岩溶发育程度越高，湿地碳中和潜力更显著。

(3)根据估算结果来看，贵州省河流湿地的单位面积碳储量较少，在今后的湿地保护中，应该加强对河流湿地的保护与修护。充分掌握与利用贵州省独特的岩溶地貌特征，实现湿地固碳能力提升和岩溶生态治理双赢。因此，系统估算贵州省湿地碳储量不仅对贵州省湿地保护与规划提供可靠的数据支撑，并且对“双碳”目标实现具有重要指导意义。

参考文献：

[1] 申霞,王鹏,王为攀,等. 滨海盐沼净碳汇能力研究方法综述[J]. 生态学杂志,2022,41(4):792-803.
Shen X, Wang P, Wang W P, et al. A review of methods for studying the net carbon sink capacity of coastal salt marshes [J]. Journal of Ecology, 2022, 41(4): 792-803 (in Chinese with English abstract).

[2] 方精云,于贵瑞,任小波,等. 中国陆地生态系统固碳效应:中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”之生态系统固碳任务群研究进展[J]. 中国科学院院刊,2015,30(6):848-857,875.
Fang J Y, Yu G R, Ren X B, et al. Carbon sequestration in Chinese terrestrial ecosystems: Progress of the ecosystem carbon sequestration task force of the strategic pioneer science and technology project of the Chinese Academy of Sciences [J]. Proceedings of the Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(6): 848-857, 875 (in Chinese with English abstract).

[3] Ito A, Nishina K, Noda H M. Impacts of future climate change on the carbon budget of northern high-latitude terrestrial ecosystems: An analysis using ISI-MIP data [J]. Polar Science,

- 2016,10(3):346-355.
- [4] 陈波,陈文瑾,陆莘茹,等.基于CCM机制的水生碳泵效应协同富营养化缓解研究进展[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2022,40(2):19-26.
Chen B,Chen W J,Lu P R,et al. Research progress on synergistic eutrophication mitigation based on CCM mechanism of aquatic carbon pumping effect[J]. Journal of Guizhou Normal University: Natural Science Edition,2022,40(2):19-26(in Chinese with English abstract).
- [5] 殷婕,盛茂银,王霖娇.中国陆地生态系统植硅体碳汇潜力估算研究进展[J].贵州师范大学学报:自然科学版,2022,40(2):27-33,80.
Yin J,Sheng M Y,Wang L J. Progress in estimating the carbon sink potential of terrestrial ecosystem phytosilica in China[J]. Journal of Guizhou Normal University: Natural Science Edition,2022,40(2):27-33,80(in Chinese with English abstract).
- [6] 陈静,罗明明,廖春来,等.中国岩溶湿地生态水文过程研究进展[J].地质科技情报,2019,38(6):221-230.
Chen J,Luo M M,Liao C L,et al. Research progress on ecohydrological processes in karst wetlands in China[J]. Geological Science and Technology Information,2019,38(6):221-230(in Chinese with English abstract).
- [7] 米楠,卜晓燕,米文宝.宁夏旱区湿地生态系统碳汇功能研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(7):52-55.
Mi N,Bu X Y,Mi W B. Study on the carbon sink function of wetland ecosystems in dry areas of Ningxia[J]. Arid Zone Resources and Environment,2013,27(7):52-55(in Chinese with English abstract).
- [8] Kodaira H. Responding to climate change and expectations for research[J]. Paddy and Water Environment,2014,12(2):211-212.
- [9] Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J. IPCC climate change: The IPCC scientific assessment[M]. Cambridge: Cambridge University Press,1990.
- [10] Bernal B, Mitsch W J. A comparison of soil carbon pools and profiles in wetlands in Costa Rica and Ohio[J]. Ecological Engineering,2008,34(4):311-323.
- [11] McLeod E, Chmura G L, Bouillon S, et al. A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂[J]. Frontiers in Ecology and the Environment,2011,9(10):552-560.
- [12] 李博,刘伟歧,王军霞,等.白洋淀湿地典型植被芦苇储碳固碳功能研究[J].农业环境科学学报,2009,28(12):2603-2607.
Li B,Liu W Q,Wang J X,et al. Study on the carbon storage and sequestration function of typical vegetation reeds in Baiyangdian wetland[J]. Journal of Agricultural and Environmental Sciences,2009,28(12):2603-2607(in Chinese with English abstract).
- [13] 梅雪英,张修峰.长江口湿地海三棱蔗草的储碳、固碳功能研究:以崇明东滩为例[J].农业环境科学学报,2007,26(1):360-366.
Mei X Y,Zhang X F. Study on the carbon storage and sequestration functions of marine trillium cane grass in the wetlands of the Yangtze River estuary: The example of Chongming Dongtan[J]. Journal of Agricultural and Environmental Sciences,2007,26(1):360-366(in Chinese with English abstract).
- [14] 国家林业局.中国湿地资源贵州篇[M].北京:中国林业出版社,2015.
State Forestry Administration. China's wetland resources Guizhou chapter[M]. Beijing: China Forestry Press,2015(in Chinese).
- [15] 卢玲,刘超.基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(V1.1)[BD].国家冰川冻土沙漠科学数据中心,2019.
Lu L,Liu C. Chinese soil dataset based on World Soil Database (HWSD) (v1.1)[BD]. National Glaciology and Geocryology and Desert Science and Data Center,2019(in Chinese with English abstract).
- [16] 徐丽,何念鹏,于贵瑞.2010s中国陆地生态系统碳密度数据集[J].中国科学数据:中英文网络版,2019,4(1):90-96.
Xu L,He N P,Yu G R. 2010s dataset on carbon density of terrestrial ecosystems in China[J]. China Scientific Data: Chinese and English online version,2019,4(1):90-96(in Chinese with English abstract).
- [17] 韩贵琳,刘丛强.贵州喀斯特地区河流的研究:碳酸盐岩溶解控制的水文地球化学特征[J].地球科学进展,2005,20(4):394-406.
Han G L,Liu C Q. Hydrogeochemical characteristics of dissolution-controlled carbonate rocks in a study of rivers in karst areas of Guizhou[J]. Advances in Earth Sciences,2005,20(4):394-406(in Chinese with English abstract).
- [18] 陈毅凤,张军,万国江.贵州草海湖泊系统碳循环简单模式[J].湖泊科学,2001,13(1):15-20.
Chen Y F,Zhang J,Wan G J. A simple model of carbon cycle in the Caohai Lake system in Guizhou[J]. Lake Science,2001,13(1):15-20(in Chinese with English abstract).
- [19] 倪茂飞,周慧,马永梅,等.典型喀斯特城市湖库溶解性有机质成分特征及来源解析[J].环境科学,2022,43(7):3552-3561.
Ni M F,Zhou H,Ma Y M,et al. Characterization and source analysis of dissolved organic matter components in a typical karst city lake reservoir[J]. Environmental Science,2022,43(7):3552-3561(in Chinese with English abstract).
- [20] 蒋翼,周忠发,薛冰清,等.贵州三岔河流域平寨水库水化学特征及控制因素[J].环境工程,2020,38(2):41-47.
Jiang Y,Zhou Z F,Xue B Q,et al. Water chemistry characteristics and control factors of Pingzhai Reservoir in Sanji River basin,Guizhou[J]. Environmental Engineering,2020,38(2):41-47(in Chinese with English abstract).
- [21] 左禹政,安艳玲,吴起鑫,等.贵州省都柳江流域水化学特征研究[J].中国环境科学,2017,37(7):2684-2690.
Zuo Y Z,An Y L,Wu Q X,et al. Characterization of water chemistry in the Dulu River basin,Guizhou Province[J]. China Environmental Science,2017,37(7):2684-2690(in Chinese with English abstract).
- [22] 曹星星,吴攀,杨诗笛,等.贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算[J].环境科学,2021,42(4):1761-1771.
Cao X X,Wu P,Yang S D,et al. Characterization of groundwater chemistry and estimation of inorganic carbon fluxes in the Caohai watershed, Weining, Guizhou[J]. Environmental Science,2021,42(4):1761-1771(in Chinese with English abstract).
- [23] 武阳,刘再华,于青春,等.土地利用变化对喀斯特水体溶解无机碳、总氮和总磷输出的影响:以贵州普定沙湾模拟试验场为例[J].地球与环境,2022,50(4):547-557.
Wu Y,Liu Z H,Yu Q C,et al. Effects of land use change on

- dissolved inorganic carbon, total nitrogen and total phosphorus output in karst water bodies: An example from the Shawan simulation test site in Puding, Guizhou[J]. *Earth and Environment*, 2022, 50(4): 547-557.
- [24] 周忠发, 张结, 殷超, 等. 岩溶洞穴地下水水化学特征及其地球化学敏感性比较: 以贵州双河洞和织金洞为例[J]. *水利水电技术*, 2017, 48(6): 98-105.
Zhou Z F, Zhang J, Yin C, et al. Comparison of groundwater chemical characteristics and geochemical sensitivity in karst caves: The case of Shuanghe Cave and Weaving Cave in Guizhou[J]. *Water Resources and Hydropower Technology*, 2017, 48(6): 98-105 (in Chinese with English abstract).
- [25] 肖时珍, 蓝家程, 袁道先, 等. 贵州施秉白云岩喀斯特区水化学和溶解无机碳稳定同位素特征[J]. *环境科学*, 2015, 36(6): 2085-2093.
Xiao S Z, Lan J C, Yuan D X, et al. Water chemistry and dissolved inorganic carbon stable isotope characteristics in the dolomite karst region of Shiping, Guizhou[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(6): 2085-2093 (in Chinese with English abstract).
- [26] 安艳玲, 吕婕梅, 吴起鑫, 等. 赤水河流域上游枯水期水化学特征及其影响因素分析[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(8): 117-122.
An Y L, Lü J M, Wu Q X, et al. Analysis of water chemistry characteristics and its influencing factors during the dry period in the upper reaches of the Chishui River basin[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 38(8): 117-122 (in Chinese with English abstract).
- [27] 王海鹤, 董泽琴, 张帅, 等. 赤水河中段水环境化学特征研究[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(19): 10203-10205, 10254.
Wang H H, Dong Z Q, Zhang S, et al. Chemical characterization of the water environment in the middle section of the Chishui River[J]. *Anhui Agricultural Science*, 2010, 38(19): 10203-10205, 10254 (in Chinese with English abstract).
- [28] 陈生华, 王世杰, 肖德安, 等. 典型喀斯特表层岩溶带地下水化学特征: 以贵州清镇王家寨喀斯特小流域为例[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(9): 2130-2135.
Chen S H, Wang S J, Xiao D A, et al. Characterization of groundwater chemistry in a typical karst surface karst zone: An example from the Wangjiazhai karst sub-basin in Qingzhen, Guizhou[J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2010, 19(9): 2130-2135 (in Chinese with English abstract).
- [29] 张强. 岩溶地质碳汇的稳定性: 以贵州草海地质碳汇为例[J]. *地球学报*, 2012, 33(6): 947-952.
Zhang Q. Stability of karst geological carbon sinks: The case of Caohai geological carbon sink in Guizhou[J]. *Journal of Earth Sciences*, 2012, 33(6): 947-952 (in Chinese with English abstract).
- [30] 李颖, 周德全. 基于土壤理化性质的贵州省土壤容重传递函数研究[J]. *贵州科学*, 2017, 35(5): 64-71.
Li Y, Zhou D Q. Research on soil capacity transfer function of Guizhou Province based on soil physical and chemical properties[J]. *Guizhou Science*, 2017, 35(5): 64-71 (in Chinese with English abstract).
- [31] 吴云杰. 草海湿地生态系统植被和土壤的有机碳分布特征和储量研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
Wu Y J. Study on the distribution characteristics and storage of organic carbon in vegetation and soil of Caohai wetland ecosystem[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [32] Shoch D T, Kaster G, Hohl A, et al. Carbon storage of bottomland hardwood afforestation in the Lower Mississippi Valley, USA[J]. *Wetlands*, 2009, 29: 535-542.
- [33] 尚梦佳, 周忠发, 蒋翼, 等. 贵州威远河流域水化学空间特征及影响因素分析[C]//佚名. 中国南方喀斯特间歇泉—长顺“潮井”生态文化高层论坛论文集. 贵州黔南: 中国学术期刊电子出版社, 2018: 52-59.
Shang M J, Zhou Z F, Jiang Y, et al. Spatial characteristics of water chemistry in the Weiyuan River basin, Guizhou and analysis of influencing factors[C]//Anon. Proceedings of the high-level forum on karst geyser-Changshun "Chaojing" ecological culture in southern China. Qiannan Guizhou: China Academic Journal Electronic Publishing House, 2018: 52-59 (in Chinese with English abstract).
- [34] 何春, 曾成, 肖时珍, 等. 湿润亚热带典型白云岩流域的水文水化学动态特征初步研究: 以贵州施秉黄洲河流域为例[J]. *地球与环境*, 2020, 48(3): 279-293.
He C, Zeng C, Xiao S Z, et al. Preliminary study on the hydrological and hydrochemical dynamic characteristics of a typical dolomite watershed in the humid subtropics: An example from the Huangzhou River basin in Shiping, Guizhou[J]. *Earth and Environment*, 2020, 48(3): 279-293 (in Chinese with English abstract).
- [35] 叶慧君, 张瑞雪, 吴攀, 等. 基于主成分分析的岩溶水水化学组成及影响因素研究: 以贵州水城盆地为例[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(2): 215-225.
Ye H J, Zhang R X, Wu P, et al. A study on the chemical composition and influencing factors of karst water based on principal component analysis: A case study of Shuicheng Basin, Guizhou[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(2): 215-225 (in Chinese with English abstract).
- [36] 韩翠红, 孙海龙, 魏榆, 等. 喀斯特筑坝河流中生物碳泵效应的碳施肥及对水化学时空变化的影响: 以贵州平寨水库及红枫湖为例[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(6): 1683-1694.
Han C H, Sun H L, Wei Y, et al. Carbon fertilization and effects on spatial and temporal changes in water chemistry by biocarbon pumping effect in karst dammed rivers: The case of Pingzhai Reservoir and Hongfeng Lake in Guizhou[J]. *Lake Science*, 2020, 32(6): 1683-1694 (in Chinese with English abstract).
- [37] 贵州省水利厅. 贵州水资源公报(1999—2022)[R]. 贵阳: 贵州省水利厅, 2022.
Guizhou Provincial Water Resources Department. Guizhou water resources bulletin (1999—2022) [R]. Guiyang: Guizhou Provincial Water Resources Department, 2022 (in Chinese).
- [38] 贵州省人民政府办公厅. 关于公布第一批省重要湿地名录的通知(黔府办函(2018)57号)[Z]. 贵阳: 贵州省人民政府办公厅, 2018.
General Office of the People's Government of Guizhou Province. Notice on the publication of the first list of provincial important wetlands (Qianfu Ban Han [2018] No. 57) [Z]. Guiyang: General Office of the People's Government of Guizhou Province, 2018 (in Chinese).
- [39] 贵州省人民政府. 贵州省第三次全国国土调查主要数据公报

- [R]. 贵阳:贵州省人民政府,2021.
People's Government of Guizhou Province. Bulletin of the main data of the third national land survey of Guizhou Province[R]. Guiyang, People's Government of Guizhou Province, 2021 (in Chinese).
- [40] 马阔,吴起鑫,韩贵琳,等.南、北盘江流域枯水期水化学特征及离子来源分析[J].中国岩溶,2018,37(2):192-202.
Ma G, Wu Q X, Han G L, et al. Analysis of water chemistry characteristics and ion sources during the dry period in the South and North Pan River basins [J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(2):192-202 (in Chinese with English abstract).
- [41] Mitsch W J, Nahlik A, Wolski P, et al. Tropical wet-lands: Seasonal hydrologic pulsing, carbon sequestration, and methane emissions[J]. Wetlands Ecology and Management, 2010, 18:573-586.
- [42] Bai J, Ouyang H, Xiao R, et al. Spatial variability of soil carbon, nitrogen, and phosphorus content and storage in an alpine wetland in the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Soil Research, 2010, 48:730-736.
- [43] DeLaune R, White J. Will coastal wetlands continue to sequester carbon in response to an increase in global sea level: A case study of the rapidly subsiding Mississippi River deltaic plain [J]. Climatic Change, 2011, 110:297-314.
- [44] 刘苗,刘国华.土壤有机碳储量估算的影响因素和不确定性[J].生态环境学报,2014,23(7):1222-1232.
Liu M, Liu G H. Influencing factors and uncertainties of soil organic carbon stock estimation[J]. Journal of Ecology and Environment, 2014, 23(7):1222-1232 (in Chinese with English abstract).
- [45] 李静泰,闫丹丹,么秀颖,等.中国滨海湿地碳储量估算[J/OL].土壤学报:1-18 [2022-06-28]. DOI: 10.11766/trxb202106290335.
Li J T, Yan D D, Yao X Y, et al. Estimation of carbon stocks in coastal wetlands in China[J/OL]. Journal of Soil Science:1-18 [2022-06-28]. DOI: 10.11766/trxb202106290335 (in Chinese with English abstract).
- [46] 崔丽娟,马琼芳,宋洪涛,等.湿地生态系统碳储量估算方法综述[J].生态学杂志,2012,31(10):2673-2680.
Cui L J, Ma Q F, Song H T, et al. A review of methods for estimating carbon stocks in wetland ecosystems[J]. Journal of Ecology, 2012, 31(10):2673-2680 (in Chinese with English abstract).
- [47] Lamblom S H, Savidge R A. A reassessment of carbon content in wood: Variation within and between 41 North American species[J]. Biomass and Bioenergy, 2003, 25(4):381-388.
- [48] 王绍强,许璐,周成虎.土地覆被变化对陆地碳循环的影响:以黄河三角洲河口地区为例[J].遥感学报,2001,5(2):142-148,162.
Wang S Q, Xu J, Zhou C H. Impact of land cover change on terrestrial carbon cycle in the Yellow River Delta estuary[J]. Journal of Remote Sensing, 2001, 5(2):142-148,162 (in Chinese with English abstract).
- [49] Buffam I, Turner M G, Desai A, et al. Integrating aquatic and terrestrial components to construct a complete carbon budget for a north temperate lake district[J]. Global Change Biology, 2011, 17:1193-1211.
- [50] 罗维均,杨开萍,王彦伟,等.喀斯特地区不同岩土组构对岩溶碳通量的影响[J].地质科技通报,2022,41(3):208-214.
Luo W J, Yang K P, Wang Y W, et al. Influence of different geotechnical configurations on karst carbon fluxes in karst areas[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(3):208-214 (in Chinese with English abstract).
- [51] 史小红,赵胜男,李畅游,等.呼伦贝尔市湿地碳储量及分配格局研究[J].生态科学,2015,34(1):110-118.
Shi S H, Zhao S N, Li C Y, et al. Study on the carbon storage and allocation pattern of wetlands in Hulunbuir City[J]. Ecological Science, 2015, 34(1):110-118 (in Chinese with English abstract).
- [52] 邢伟,李裴培,刘明华,等.我国东北地区沼泽湿地碳储量估算[J].信阳师范学院学报:自然科学版,2019,32(4):557-562.
Xing W, Li P P, Liu M H, et al. Estimation of carbon stocks in swampy wetlands in Northeast China[J]. Journal of Xinyang Normal College: Natural Science Edition, 2019, 32(4):557-562 (in Chinese with English abstract).
- [53] Gorham E, Lehman E, Dyek A, et al. Long-term carbon sequestration in North American peatlands[J]. Quaternary Science Reviews, 2012, 58:77-82.
- [54] Borren W, Bleuten W, Lapshina E D. Holocene peat and carbon accumulation rates in the southern Taiga of western Siberia[J]. Quaternary Research, 2004, 61(1):42-51.
- [55] 刘再华,曾庆睿,陈波,等.碳酸盐风化碳汇研究[M].北京:科学出版社,2021.
Liu Z H, Zeng Q R, Chen B, et al. Research on carbonate weathering carbon sink[M]. Beijing: Science Press, 2021 (in Chinese).
- [56] Dean W E, Gorham E. Magnitude and significance of carbon burial in lakes, reservoirs, and peatlands[J]. Geology, 1998, 26:535-538.
- [57] 段晓男,王效科,逯非,等.中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J].生态学报,2008(2):463-469.
Duan X N, Wang X K, Lu F, et al. Current status and potential of carbon sequestration in Chinese wetland ecosystems[J]. Journal of Ecology, 2008(2):463-469 (in Chinese with English abstract).
- [58] Smith D N I, Ortega-Camacho D, Acosta-González G, et al. A multi-approach assessment of land use effects on groundwater quality in a karstic aquifer[J]. Heliyon, 2020, 6(5):1-11.
- [59] Lu S S, Chen J F, Zheng X Q, et al. Hydrogeochemical characteristics of karst groundwater in Jinci spring area, north China [J]. Carbonates and Evaporites, 2020, 35:68.
- [60] Ming X X, Groves C, Wu X Y, et al. Nitrate migration and transformations in groundwater quantified by dual nitrate isotopes and hydrochemistry in a karst world heritage site[J]. Science of the Total Environment, 2020, 735:138970.