

基于能值-生态足迹的贵州高原典型喀斯特区域 水资源可持续评价研究

李月¹, 冯霞¹, 吴路华², 罗光杰³, 王金凤⁴, 吴倩⁵

(1. 贵州财经大学 公共管理学院, 贵阳 550025; 2. 铜仁学院 经济管理学院, 贵州 铜仁 554300;
3. 贵州师范学院贵州省流域地理国情监测重点实验室, 贵阳 550018; 4. 六盘水师范学院 经济管理学院,
贵州 六盘水 553004; 5. 贵州水利水电职业技术学院, 贵阳 551416)

摘要:【目的】深入剖析喀斯特地区水资源利用问题, 从自然资源供应与需求关系辨析水资源利用状况, 以期对喀斯特地区水资源高效开发利用与可持续发展提供科学依据和有益参考。【方法】生态足迹模型是生态经济学中测量人类社会资源消耗的经典方法, 基于能量流的能值生态足迹模型是该领域研究的最新成果。本研究选取贵州高原典型喀斯特区域—南明河流域为研究对象, 基于 2010—2020 年南明河流域的用水量、供水量等数据, 运用能值水资源生态足迹模型系统地分析了南明河流域 2010—2020 年的水生态足迹、水生态承载力、水生态赤字和生态压力等变化情况。【结果】①2010—2020 年, 南明河流域水资源能值生态足迹年均值为 1.080 hm²/人, 水资源能值生态承载力年均值为 0.562 hm²/人, 水资源生态赤字明显, 但整体呈逐年下降趋势; ②南明河流域水资源生态压力指数年均值达 2.004, 处于亚安全状态, 生态系统承受压力在较安全范围; ③2010—2020 年, 南明河流域水资源生态经济协调指数年均值为 1.345, 接近最佳协调状态 (1.414), 水资源经济协调性整体较好。【结论】总体来看, 南明河流域人均能值生态足迹、万元 GDP 和生态赤字呈逐年下降趋势, 生态承载力、生态压力和生态经济协调指数呈现上下波动态势, 水资源利用整体向好的方面发展。

关键词: 喀斯特; 水资源; 能值理论; 水生态足迹; 可持续发展

中图分类号: X826

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023088

李月, 冯霞, 吴路华, 等. 基于能值-生态足迹的贵州高原典型喀斯特区域水资源可持续评价研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(4): 96-104.

LI Yue, FENG Xia, WU Luhua, et al. Evaluating sustainable development of water resources in typical Karst basins in Guizhou plateau using energy-ecological footprint analysis[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(4): 96-104.

0 引言

【研究意义】水资源不仅是维持人类生存和发展必不可少的基础资源, 也是社会经济发展的重要保障条件^[1-3]。1950 年以来, 各类用水量供不应求, 用水危机逐渐成为缺水危机的主要原因之一。随着世界经济和社会的高速发展, 水资源的保障程度早已从工业社会时期的“唾手可得”演变为现如今有些地区的“千金难求”。南明河流域作为典型的喀斯特流域, 工程性缺水问题突出, 如何加强水资源可持续管理, 推动其集约节约利用已成为南明河流域亟待解决的问题, 对于贵州乃至喀斯特地区的水资源可持续利用具有重要意义。【研究进展】1922 年, 加拿大学者 Rees^[4]

首次提出生态足迹的概念与方法, 由 Wackernagel 等^[5]进行完善后应用于不同空间尺度的自然资源资本账户定量评价, 进而衍生得到水足迹、水资源生态足迹等概念。其中, 水生态足迹法是对传统生态足迹法的拓展, 主要强调水资源在利用的过程中对生态空间的占用情况^[6]。近年来, 国内外相关学者将水资源生态足迹法广泛应用于水资源管理的具体实践过程当中, 已成为国际上开展生态足迹核算^[7]、水资源承载力评价与战略配置的重要手段和依据, Pellicer-Martínez 等^[8]运用水足迹模型对西班牙塞古拉河流域水资源进行测算, 认为采用概率方式对流域水资源演变和空间特征评估更为科学有效, 近年来, 我国部分学者将水生态足迹法应用于诸如上海^[9]、重庆^[10]、深圳^[11]、湖北^[12]、浙江^[13]、辽宁^[14]等省市, 以及黄河^[15]、长江^[16]、玛纳斯河^[17]等流域尺度的水资源利用评价和经济协调性发展分析研究, 同时提出有针对性的措施与建议。但水生态足迹法在运用过程中仍存在一些局限, 主要表现在模型的重要参数引用方面, 均衡因子和产量因子大多数都是采用全球性的

收稿日期: 2023-03-09 修回日期: 2023-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42367008); 贵州省水利科技项目 (KT202223, KT202323); 黔科合基础-ZK[2023]一般 464; 贵州省基础研究计划项目 (自然科学) ([2020]1Y157); 贵州省科技成果转化项目 [2022]010; 贵州省科技厅项目 (黔科合基础-ZK[2021]一般 192)

作者简介: 李月 (1991-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为土地变化科学与生态修复。E-mail: liyue@mail.gufe.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

数据,虽然使得水资源生态足迹法在不同地区之间便于横向比较,但对地区间差异性的忽略,易导致计算结果与地区的实际情况产生偏差。随着研究的不断深入,一些学者尝试将能值理论逐渐融入到生态足迹模型中并应用于实践,从能值流动的视角对地区水生态足迹与生态承载力进行测算,通过引入不易随时间变化而波动的太阳能值转换率,将不同类型的能量转换成便于统一计算的太阳能值,使得测算结果与实际情况更加贴近,为系统分析自然资源供应与需求的关系研究提供了新的思路与手段^[18],其在学术界得到了广泛的应用,例如 Wang 等^[19]通过将能值理论和水生态足迹结合,量化了黄河流域人类对水资源的需求和水资源系统的可供量; Zhang 等^[20]利用耦合的能值生态足迹框架获取了北京市生态安全的量化状态;王慧亮等^[21]基于能值水生态足迹模型分析了黄河流域 2011—2018 年的能值水生态足迹、能值水生态承载力和水生态盈亏状况,发现黄河流域水资源安全形势不容乐观,应采取相应措施提高水资源利用效率;刘珂伶等^[18]运用该模型评价了北京市的水资源可持续发展情况,证明了水资源能值生态足迹模型的科学性和可行性。但已有喀斯特地区水资源可持续性研究集中于水资源生态足迹变化特征和水资源承载力空间分布特征分析^[22-24],研究方法则主要采用集对分析法、模糊综合评判法模型^[25-26]、生态足迹模型等^[27-28],上述研究内容不仅涉及面窄,而且研究方法普遍存在计算过程复杂和数据难以获取等问题。

【切入点】我国南方喀斯特地区属于亚热带季风气候、降水量丰富,其特有的二元三维地质结构,使得地表水资源“工程性”缺水问题突出^[29-31],加之近年来城市化和工业化的快速发展,导致水资源供给结构性矛盾日益尖锐。因此,加强水资源调控管理对于保障喀斯特地区的可持续发展十分迫切。南明河流域系长江水系乌江支流,是长江上游重要的生态屏障,属于典型的喀斯特区域。因此,科学地分析其水资源利用现状,是实现流域可持续发展的基础。【拟解决的关键问题】本文以南明河流域为研究对象,通过构建能值生态足迹模型,分析南明河流域 2010—2020 年的水资源生态足迹和生态承载力,并通过水资源生态赤字、生态经济协调指数、生态压力指数等对水资源利用状况开展科学评价,以期为南明河流域的水资源开发与可持续发展提供理论依据与技术支持,为进一步拓展喀斯特地区水资源利用研究提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

南明河流域是乌江右岸的一级支流,自西南向东

北流经贵阳市观山湖区、花溪区、南明区等六区二县一市,流域面积 2 158 km²,属于典型的喀斯特流域(图 1)。流域属于亚热带高原季风湿润型气候,年平均气温为 15.4 ℃,多年平均降水量约为 1 085.45 mm,降水时空分布不均,降水量从西南向东北呈递减趋势。

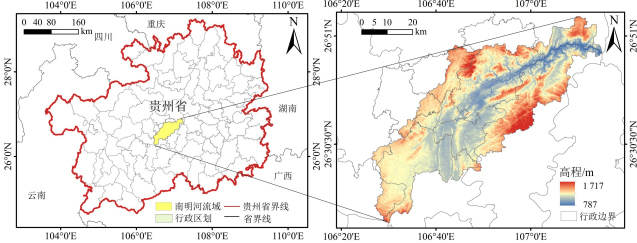


图 1 研究区地理位置

Fig.1 The location of study area

1.2 数据来源

水资源能值生态足迹计算中涉及南明河流域用水量、供水量、水资源总量、区域面积、年末常住总人口、万元 GDP 等数据,相关来源见表 1。

表 1 南明河流域数据来源

Tab.1 Data sources of Nanming River basin		
数据参数	具体参数	数据来源
用水量	农业用水	《贵阳市水资源公报》 http://swglj.guiyang.gov.cn
	工业用水	
	生活用水	
	生态用水	
	污染用水	
供水量	地表水、地下水	
区域面积、万元 GDP		《贵州省统计年鉴》 http://stjj.guizhou.gov.cn/
年末常住总人口		《贵阳市统计年鉴》 https://www.guiyang.gov.cn/

1.3 研究方法

1.3.1 水资源能值生态模型

水资源能值生态足迹 (PWE_f) 是将能值理论融入到生态足迹模型中而构成的^[32]。 PWE_f 是利用太阳能值转换率和区域能值密度将区域的水资源转换成具有特殊性质的生物生产性土地面积^[33],根据南明河流域水资源的实际利用情况计算得到,水资源能值生态足迹主要由工业用水、农业用水、生活用水、生态用水和污染用水足迹五个部分组成。计算式为:

$$PWE_f = \sum_{i=1}^n \frac{C_{ki}}{P} + \frac{W_{efq}}{N}, \tag{1}$$

$$W_{efq} = \frac{Q_q \cdot \tau_q}{P}, \tag{2}$$

$$C_{ki} = \frac{M_{ki} \cdot \tau_{ki}}{N}, \tag{3}$$

式中: PWE_f 为人均水资源能值生态足迹 ($hm^2/人$); C_{ki} 为第 i 类用水的人均太阳能值 ($sej/人$), $i \in [1,4]$; W_{efq} 为水污染足迹 (hm^2); Q_q 为污水排放量 (t); τ_q 为废污水能值转换率; M_{ki} 为第 i 类用水量 (m^3);

N 为南明河流域人口数量; τ_{ki} 为第 i 类用水的太阳能值转换率 (sej/m^3); P 为南明河流域能值密度 (sej/hm^2), 是由南明河流域可更新资源的总能值与其面积的比值得到, 根据能值理论, 可更新资源为太阳能、风能、雨水势能和雨水化学能中最大值与地球旋转能之和, 经核算南明河可更新资源的总能值为 $4.510 \times 10^{20} \text{ sej}$, P 值为 $6.437 \times 10^{14} \text{ sej}/\text{hm}^2$ 。

水资源生态承载力 (PWE_c) 是衡量一个区域水资源丰缺度的重要指标。南明河流域水资源能值由雨水势能、地表水化学能和地下水化学能三部分组成, 水资源来自雨水、地表水和地下水。此外有研究表明, 一个地区的水资源承载力中如果少于 60% 的水资源用于维持生态环境发展, 就会对该地区的生态环境造成威胁, 因此, 计算水资源承载力时应乘以系数 0.4^[34]。其计算式为:

$$PWE_c = 0.4 \times \frac{WE_r + WE_g + WE_u}{P_w \times N}, \quad (4)$$

式中: PWE_c 为人均水资源能值生态承载力 ($\text{hm}^2/\text{人}$); WE_g 为地表水能值 (sej); WE_r 为雨水势能值 (sej); WE_u 为地下水能值 (sej); P_w 为南明河流域水资源平均能值密度 (sej/hm^2), 是由南明河流域水资源总能值与其面积的比值得到, 据 2010—2020 年《贵阳市水资源公报》统计, 南明河流域多年平均降水量和辖区面积分别为 1 085 mm 和 7 006.564 km^2 , 经核算南明河流域水资源平均能值密度为 $9.720 \times 10^{14} \text{ sej}/\text{hm}^2$; 相关生态承载力计算式和相关参数如下:

$$E_r = S \times \text{Rain} \times \varphi \times \rho_w \times h \times g, \quad (5)$$

$$E_g(E_u) = M_g(M_u) \times G \times \rho_w, \quad (6)$$

式中: E_r 为雨水势能 (J); E_g 、 E_u 表示地表水和地下水化学能 (J); S 为区域面积 (m^2); Rain 为平均降水量 (m); φ 为径流系数 (0.4); M_g 、 M_u 分别为地表水、地下水水资源量 (m^3); G 为吉布斯自由能; h 为平均海拔高度 (m); g 为重力加速度 (9.8 m/s^2)。模型中主要能值转换率及相关参数见表 2。

表 2 主要能值转换率

Tab.2 Main emergy conversion rates

项目	能值转换率/ (sej 单位 ⁻¹)	项目	能值转换率/ (sej 单位 ⁻¹)
农业用水 ^[18]	8.80×10^{11}	地下水 ^[36]	1.70×10^{12}
工业用水 ^[18]	1.60×10^{12}	地表水 ^[36]	9.23×10^{11}
生活用水 ^[18]	2.32×10^{12}	雨水势能 ^[37]	1.00×10^4
生态用水 ^[18]	1.26×10^{12}	雨水化学能 ^[37]	1.80×10^4
污染用水 ^[35]	4.49×10^{12}	-	-

1.3.2 水资源可持续利用评价指标

水资源生态赤字/盈余 (WED/WES) 是水资源生态承载力与生态足迹二者之间的差值, 其大小可用来衡量区域水资源可持续发展的情况, 如果差值为 0 表明水资源实现生态平衡; 如果差值小于 0 会出现水资源

生态赤字 (WED), 威胁到区域水资源生态安全; 如果差值大于 0 则会出现生态盈余 (WES), 有利于水资源的可持续发展。具体计算式为:

$$WED(WES) = PWE_c - PWE_f, \quad (7)$$

水资源生态压力指数 ($WEPI$) 是衡量一个区域的水资源生态是否处于安全范围之内。参考 Yang 等^[38]的研究结果 (图 2), 当 $WEPI < 1$ 时, 说明流域内人类活动对水资源的消耗量低于流域的生态承载量, 说明流域内的水资源具有一定的生态安全范围; 当 $WEPI > 1$ 时, 则说明该地区的水资源消耗量超过了其实际的生态承载量, 对该地区的生态环境造成了一定的影响; 当 $WEPI = 1$ 时, 则表明该区域水资源供求达到一个平衡状态。其计算式为:

$$WEPI = \frac{PWE_f}{PWE_c}, \quad (8)$$

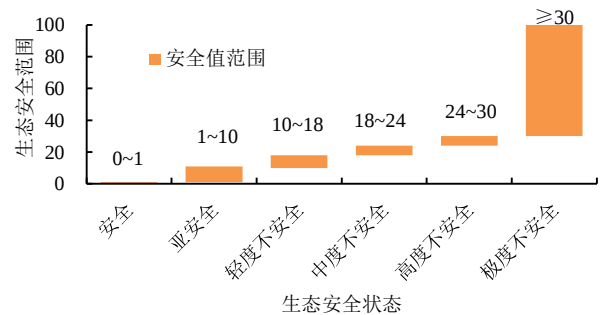


图 2 区域生态压力安全等级分类

Fig.2 Classification of regional ecological pressure safety level

水资源生态经济协调指数 ($WECI$) 是衡量不同时空内区域水资源开发利用程度与当地经济发展水平的协调性和相互关系。其计算方法为^[39]:

$$WECI = \frac{WEPI+1}{\sqrt{WEPI^2+1}}, \quad (9)$$

其中, $WECI$ 取值为 (1, 1.414)。当 $WECI = 1.414$ 时, 表示处于最佳的生态协调状态; $WECI$ 越接近 1, 表明生态协调性越差; $WECI$ 越接近 1.414, 表明生态系统协调得越好^[18]。

1.3.3 万元 GDP 水资源生态足迹 (WEG)

为深入分析南明河流域的水资源开发利用状况, 本研究引用 WEG 模型测算南明河流域 2010—2020 年水资源生态足迹与对应万元 GDP 的比值, 其比值越小, 表明该地区的水资源利用效率越高, 反之则越低^[40]。

2 结果与分析

2.1 PWE_f 变化趋势

2010—2020 年南明河流域水资源生态足迹见表 3。研究发现南明河流域水资源能值生态足迹 PWE_f 总体呈下降趋势, 降幅约为 36%。其中, 2010—2013 年呈现逐年下降态势, 降幅约为 24%, 2018 年 PWE_f

表 3 2010—2020 年南明河流域水资源生态足迹

Tab.3 Ecological Footprint of water resources in Nanming River basin from 2010 to 2020								
年份	农业用水 能值/ ($\times 10^{20}$ sej)	工业用水 能值/ ($\times 10^{20}$ sej)	居民生活用水 能值/ ($\times 10^{20}$ sej)	生态用水 能值/ ($\times 10^{19}$ sej)	污染用水 能值/ ($\times 10^{21}$ sej)	总能值/ ($\times 10^{21}$ sej)	总能值生态 足迹/ ($\times 10^6$ sej)	人均能值生态 足迹/ ($\text{hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)
2010	2.077	7.062	3.782	1.298	1.805	3.110	4.832	1.391
2011	1.976	6.456	5.090	2.558	1.688	3.066	4.763	1.140
2012	1.901	6.322	4.079	2.545	1.715	2.971	4.615	1.089
2013	2.341	6.442	3.928	2.633	1.634	2.932	4.554	1.058
2014	2.627	5.989	4.130	1.462	1.684	2.973	4.618	1.065
2015	2.723	5.550	4.160	1.877	1.679	2.941	4.569	1.039
2016	2.532	5.547	4.341	2.155	1.695	2.958	4.596	1.029
2017	2.340	5.544	4.519	2.419	1.711	2.975	4.622	1.013
2018	2.310	5.690	4.730	3.389	1.908	3.215	4.995	1.077
2019	2.324	5.739	4.949	4.057	1.966	3.307	5.138	1.088
2020	2.060	4.853	6.359	4.284	1.952	3.322	5.161	0.895

从五类用水账户能值生态足迹可以看出(图 3)，工业用水和农业用水足迹的变化呈先降低再基本保持不变的趋势特征，这是由于随着社会经济的发展，引进了高科技农业灌溉技术，严格控制工业用水标准、提高工厂生产效率等措施，一定程度上大幅度的节省了用水量；生活用水足迹特征表现为先增加后下降，至 2012 年后保持稳定状态，这与政府加大节约用水的宣传力度密切相关；生态用水足迹 2010—2020 年基本保持不变；而污染用水足迹整体呈现下降趋势，自贵阳市 2012 年成为全国第一个水环境治理领域先行先试政府和社会资本合作模式（Public-Private Partnership，简称 PPP 模式）的城市以来，从人力物力上都有效解决了流域污水处理能力不足的硬伤，试行 4 a 中，污水处理能力从每日 99.00 万 t 提高到 183.58 万 t，极大程度上降低了污染用水量，且污染用水足迹很有可能是导致人均能值生态足迹变化的重要原因之一，其二者变化趋势基本保持一致。

2.2 PWE_c 变化趋势

从 2010—2020 年的水资源供给来看，雨水、地表水和地下水是南明河流域水资源的主要来源，水资源的总能值在 $(3.845\sim7.285) \times 10^{21}$ sej 内波动，其中 2010 年的水资源总能值最低，2012 年达到最大值

7.285×10^{21} sej，约为 2010 年的 1.9 倍，水资源的总能值生态承载力介于 $(1.582\sim2.998) \times 10^6 \text{ hm}^2$ (表 4)。 PWE_c 呈波动变化趋势，主要受降水量的影响，与丰水年和枯水年密切相关。其中 2010、2011、2013 年作为枯水年，水资源储量显著降低，导致水资源总能值也随之下降；2012、2015 年作为丰水年，显著提升了南明河流域的水资源蓄水能力，加之 2012 年贵阳市成为全国首个先行先试 PPP 模式的城市，投入了大量人力物力兴修蓄水工程，2012 年水资源总能值较 2010 年上升了 89.44%。

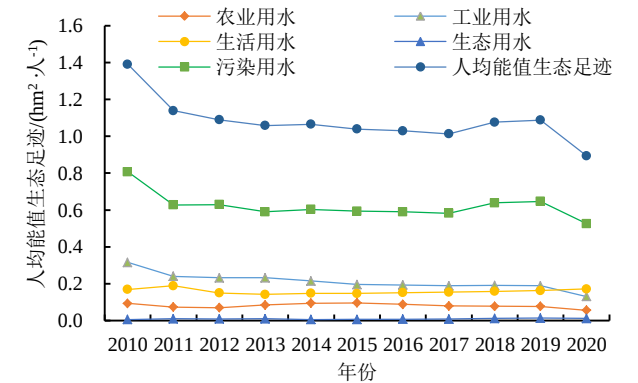


图 3 南明河流域用水账户足迹

Fig.3 Footprint of water account in Nanming River basin

表 4 2010—2020 年南明河流域水资源生态承载力

Tab.4 Ecological carrying capacity of water resources in Nanming River basin from 2010 to 2020					
年份	雨水势能值/($\times 10^{20}$ sej)	地表水能值/($\times 10^{21}$ sej)	地下水能值/($\times 10^{21}$ sej)	总能值/($\times 10^{21}$ sej)	人均能值生态承载力/($\text{hm}^2 \cdot \text{人}^{-1}$)
2010	3.004	2.296	1.249	3.845	0.456
2011	2.367	2.173	1.543	3.952	0.389
2012	3.451	3.999	2.941	7.285	0.708
2013	2.799	2.660	1.746	4.686	0.448
2014	3.656	4.718	2.154	7.238	0.687
2015	3.336	4.389	2.285	7.008	0.656
2016	3.374	4.360	2.186	6.883	0.634
2017	3.411	4.330	2.087	6.759	0.610
2018	3.449	3.906	1.999	6.251	0.555
2019	3.585	3.891	2.004	6.254	0.545
2020	3.642	4.511	2.097	6.972	0.497

2010—2020 年, 南明河流域人均水资源能值生态承载力在均值 $0.562 \text{ hm}^2/\text{人}$ 上下波动, 其中, 地表水贡献了大部分生态承载力, 地下水次之, 雨水势能的贡献率最小, 仅为 5.37% (表 4)。 PWE_c 呈“锯齿”型波动态势, 主要原因可能是受到地表水的影响。2011 年研究区所在区域降水量较 2010 年下降了 21.19% , 是研究期内降水量最少的年份, 加之喀斯特地区降水空间分布不均的特征^[41], 一定程度上导致该年的流域水资源生态承载力最低, 仅为 $0.389 \text{ hm}^2/\text{人}$; 2012 年作为南明河流域近 10 a 内的丰水年, 加之政府大量修建蓄水工程, 一定程度上提高了水资源的供应能力, 水资源生态承载力显著提升, 是 2011 年的 1.8 倍 (图 4)。

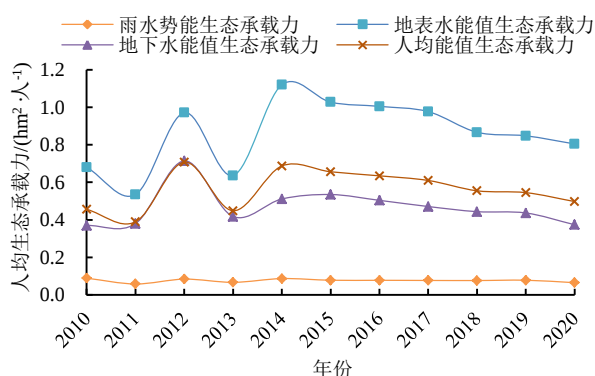


图 4 南明河流域用水账户承载力

Fig.4 Bearing capacity of water account in Nanming River basin

2.3 水资源可持续利用分析

2.3.1 WED 与 WEPI 变化特征

2010—2020 年, 南明河流域 WED 总体呈逐年下降趋势, 从 2010 年的 $-0.935 \text{ hm}^2/\text{人}$ 下降至 2020 年的 $-0.397 \text{ hm}^2/\text{人}$, 降幅约为 58% 。WEPI 在 2010—2020 年呈“波浪”型变化, 多年平均值为 2.004 , 处于亚安全状态。其中, 2012 年达到最低值 1.539 , 2010 年达到峰值, 约为 2012 年的 2 倍 (图 5)。故南明河流域的水资源生态状况多年处于赤字状态。

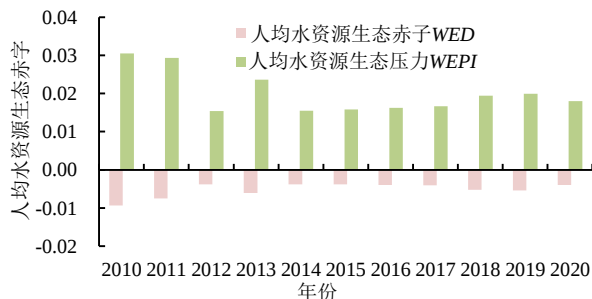


图 5 南明河流域人均水资源生态赤字/压力

Fig.5 Ecological deficit/pressure on water resources per capita in the Nanming River basin

2.3.2 WEPI 变化特征

2010—2020 年, 南明河流域水资源生态经济协

调指数波动幅度变化较大 (图 6)。 $WEPI$ 处于 $1.266\sim 1.383$ 范围, 多年平均值达到 1.345 , 表明长期以来南明河流域的生态协调性相对稳定。2012、2014 年 $WEPI$ 达到最大值 1.383 , 南明河流域的水资源生态与经济发展之间的关系得到了显著提升, 但部分年份的水资源生态经济协调指数与最佳值 1.414 相比仍有较大差距, 该地区的水生态系统经济协调能力仍有待提高。

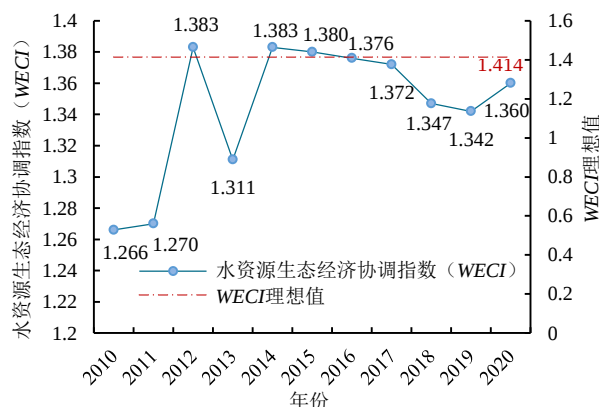


图 6 南明河流域水资源生态经济协调指数

Fig.6 Nanming River basin water resources ecological and economic harmonization index

2.3.3 WEG 变化特征

2010—2020 年南明河流域万元 GDP 生态足迹整体呈现下降趋势 (图 7), 2010—2020 年降幅超过 95% , 年均降幅达到 16% 。该值整体呈逐年减小趋势, 表明南明河流域在社会经济发展过程中, 由于生产方式升级转型、劳动力增速提效等原因, 使得流域水资源利用效率得以不断提升, 水资源保护与可持续利用效果显著, 这与南明河流域生态经济协调性基本稳定的结论基本一致; 另外, 线性预测方程的拟合度达到 85% , 说明方程的拟合效果较好, 同时通过方程可知未来的万元 GDP 生态足迹将会持续减小, 表明南明河流域的水资源利用效率将得以不断提升。

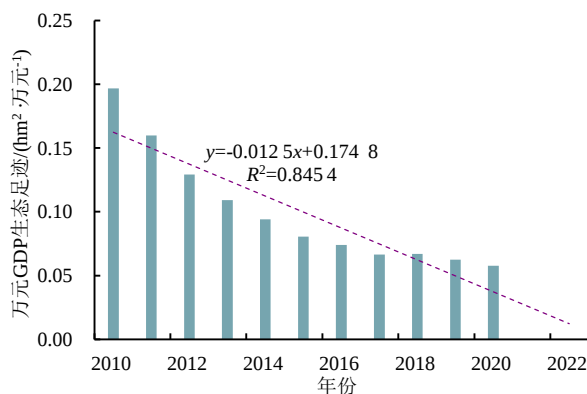


图 7 万元 GDP 生态足迹

Fig.7 Ecological footprint of 10,000 yuan GDP

3 讨论

3.1 PWE_f 与传统水资源生态足迹的对比分析

通过传统人均水资源生态足迹模型得知,其变化趋势与人均水资源能值生态足迹的变化趋势基本一致,但人均水资源生态足迹数值高于传统水资源生态足迹(图8),究其原因主要在于两方面。首先,传统计算模型中没有充分考虑不同水足迹对生态用地的贡献率差异,简单地认为不同类型的用水账户对生态用地的占用是相同的,实际上,占用能力的大小取决于各类水资源的最终流向,例如污染用水足迹不仅源于工业污染,还有部分来自人们生活污染用水以及农业生产过程中农药、化肥等污水的汇入,因此污染用水的占用能力应相对较高;其次是在传统的计算方法中,主要参数大多引用于全国性均衡因子和产量因子,仅把各类用水的消耗单位换算为同一类生产性土地面积,对各地区的具体特性欠缺考虑。而能值生态足迹模型作为该领域研究的前沿与修正,充分考虑了各地区间的差异性,根据区域可更新的总能值和区域水资源的总能值与其区域面积的比值来计算均衡因子、产量因子,依据差异性选用不同太阳能值转换系数,能够更加真实地刻画出区域水资源的生态足迹情况。

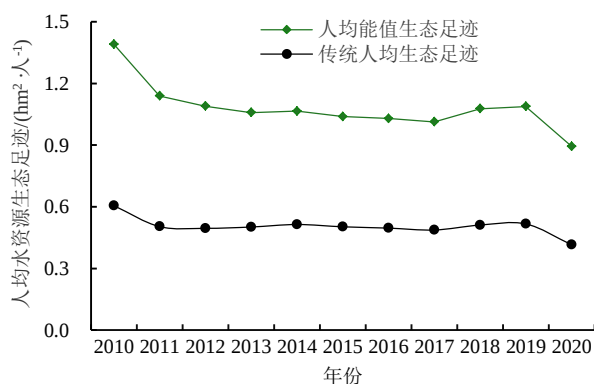


图8 人均生态足迹对比分析

Fig.8 Comparative analysis of ecological footprint per capita

将 PWE_c 与传统人均水资源生态承载力模型^[39]进行比较,结果表明,人均水资源能值的生态承载力相比传统人均水生态承载力较小(图9),其主要原因在于,水资源能值生态承载力的计算中是以能量流为转换基础^[18],考虑到各地区之间的差异性,采用区域内的水资源总量来计算区域能值密度,而传统生态承载力测算以采用全球性的均衡因子为主,地区间的差异性一定程度上被忽略。此外,传统生态承载力收集的数据账户所涵盖的信息不全面,仅包括六大类生物生产性土地,忽略了沙漠、冰川等环境恶劣的土地类型,生态承载力测算仍存在不稳定性^[42]。

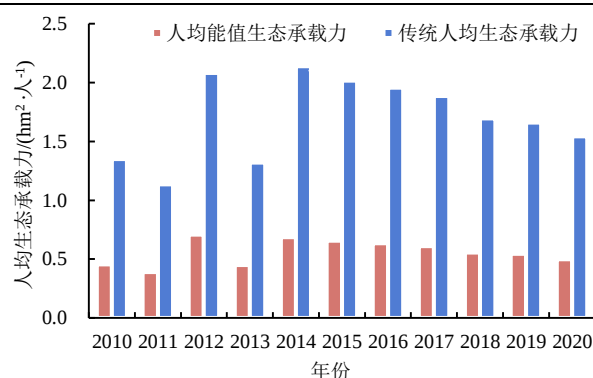


图9 人均生态承载力对比分析

Fig.9 Comparative analysis of ecological carrying capacity per capita

3.2 不确定性分析

本研究以能量流作为研究方法的“基本引线”,一定程度上拓展了能值水资源生态足迹模型在喀斯特地区的应用范围,通过采用能值水资源生态足迹模型系统地分析了南明河流域的水资源可持续利用现状,为探索喀斯特地区水资源高效利用方式和破解水资源利用“困境”提供了数据支撑与方法参考。然而,本研究所采用的能值折算系数和能值转换率2个参数主要是参考已有研究成果得到,暂未结合喀斯特地区的特性进行参数本地化修正,致使研究结果存在一定偏差,亟待进一步论证。同时,由于近年来各县区的行政区划有所变更,导致相关资料与数据发生一定程度的变化,且在水资源供给中未考虑非常规水资源,可能影响了研究结果的准确性。因此,在下一阶段的研究中试图进行相关参数修正,纳入非常规水资源的考量,使研究将更具有现实价值和重要意义。

4 结论

1) 2010—2020年,南明河流域 PWE_f 为 $0.895 \sim 1.391 \text{ hm}^2/\text{人}$,其中污染用水足迹是导致南明河流域水资源生态足迹变化的主要原因,其次是工业用水足迹。

2) PWE_c 为 $0.389 \sim 0.708 \text{ hm}^2/\text{人}$,地表水的比重最大,其次是地下水,雨水势能比重最小,南明河流域水资源承载力主要来自地表水的贡献。

3) 南明河流域 WED 和 $WEPI$ 年均值分别为 $-0.518 \text{ hm}^2/\text{人}$ 和 2.004 ,南明河流域多年处于水资源生态赤字和生态亚安全状态;但是 $WECI$ 和 WEG 分别为 1.345 和 $0.100 \text{ hm}^2/(\times 10^4 \text{ 元})$,南明河流域经济协调性接近 1.414 的最佳状态,水资源的利用效率不断提升,经济协调性整体较好。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 王先庆, 李博, 李进, 等. 基于生态足迹模型的水资源可持续利用分析[J]. 人民长江, 2019, 50(5): 107-112.
WANG Xianqing, LI Bo, LI Jin, et al. Analysis on sustainable utilization of water resources based on ecological footprint model[J]. Yangtze River, 2019, 50(5): 107-112.
- [2] 陈德余. 我国区域经济发展中的水资源管理问题研究—评《水资源管理》[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(9): 151.
- [3] 栗晓玲. 农业水资源优化配置研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(7): 1-7, 34.
SU Xiaoling. Advance of optimal allocation of water resources in agriculture: A review[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(7): 1-7, 34.
- [4] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out[J]. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 121-130.
- [5] WACKERNAGEL M, REES W E. Our ecological footprint: reducing human impact on the earth[M]. Gabriola Island, BC: New Society Publishers, 1996.
- [6] 李丹. 基于水生态足迹的水资源可持续利用评价: 以河西内陆河流域为例[D]. 兰州: 西北师范大学, 2014.
LI Dan. Evaluation of water resources sustainable utilization based on water ecological footprint theory: A case of Hexi inland river basin[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2014.
- [7] 路瑞, 赵琰鑫. 基于水资源生态足迹的黄河流域水资源利用评价[J]. 人民黄河, 2020, 42(11): 48-52, 134.
LU Rui, ZHAO Yanxin. Analysis of the water resources utilization in the Yellow River Basin based on water resources ecological footprint model[J]. Yellow River, 2020, 42(11): 48-52, 134.
- [8] PELLICER-MARTÍNEZ F, MARTÍNEZ-PAZ J M. Probabilistic evaluation of the water footprint of a river basin: Accounting method and case study in the Segura River Basin, Spain[J]. The Science of the Total Environment, 2018, 627: 28-38.
- [9] 丁华, 邱卫国. 基于生态足迹的上海市水资源生态承载力评价[J]. 人民长江, 2013, 44(15): 19-21.
DING Hua, QIU Weiguo. Assessment on ecological carrying capacity of water resources in Shanghai City based on ecological footprint model[J]. Yangtze River, 2013, 44(15): 19-21.
- [10] 张倩, 谢世友. 基于水生态足迹模型的重庆市水资源可持续利用分析与评价[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(2): 93-100.
ZHANG Qian, XIE Shiyou. Using ecological water footprint model to analyze sustainable use of water resources in Chongqing[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(2): 93-100.
- [11] 范月华, 陈涟, 唐文雯, 等. 基于改进水生态足迹模型的深圳市水资源可持续利用分析[J]. 水电能源科学, 2021, 39(4): 36-39, 35.
FAN Yuehua, CHEN Lian, TANG Wenwen, et al. Sustainable utilization of water resources in Shenzhen city based on improved water ecological footprint model[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(4): 36-39, 35.
- [12] 贾诗琪, 张鑫, 彭辉, 等. 湖北省水生态足迹时空动态分析[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(3): 27-32, 37.
JIA Shiqi, ZHANG Xin, PENG Hui, et al. Spatio-temporal dynamics of water ecological footprint in Hubei Province[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(3): 27-32, 37.
- [13] 李允洁, 吕惠进, 卜鹏. 基于生态足迹法的浙江省水资源可持续利用分析[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(12): 22-26, 32.
LI Yunjie, LYU Huijin, BU Peng. Sustainable utilization of water resources in Zhejiang Province based on ecological footprint analysis[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(12): 22-26, 32.
- [14] 邵骏, 卢满生, 杜涛, 等. 长江流域水资源生态足迹及其驱动因素[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(12): 19-24, 32.
SHAO Jun, LU Mansheng, DU Tao, et al. Water resources ecological footprint in Yangtze River Basin and its driving factors[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(12): 19-24, 32.
- [15] 左其享, 姜玲, 冯亚坤, 等. 黄河沿线省区水资源生态足迹时空特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(10): 1-8, 34.
ZUO Qiting, JIANG Long, FENG Yakun, et al. Spatiotemporal variation of ecological footprint of water resources in the provinces in the Yellow River Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(10): 1-8, 34.
- [16] 卢新海, 柯善淦. 基于生态足迹模型的区域水资源生态补偿量化模型构建: 以长江流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(2): 334-341.
LU Xinhai, KE Shangan. Establishment of regional water resources ecological compensation model based on ecological footprint model: Take the Yangtze River for example[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(2): 334-341.
- [17] 李鹏辉, 米桃桃, 高素芳, 等. 基于水足迹理论的玛纳斯河流域水资源评价[J]. 人民长江, 2019, 50(8): 103-108.
LI Penghui, MI Taotao, GAO Sufang, et al. Water resources assessment of Manas River Basin based on water footprint theory[J]. Yangtze River, 2019, 50(8): 103-108.
- [18] 刘珂伶, 杨柳. 基于能值理论的水资源生态足迹变化特征: 以北京市为例[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 406-414.
LIU Keling, YANG Liu. Characteristics of water resources ecological footprint based on emergy theory: Taking Beijing as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 406-414.
- [19] WANG H L, SHI Q, LI H, et al. Spatiotemporal evolution of water ecological footprint based on the emergy-spatial autocorrelation method[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2023, 30(16): 47 844-47 860.
- [20] ZHANG J X, MA L. Urban ecological security dynamic analysis based on an innovative emergy ecological footprint method[J]. Environment, Development and Sustainability, 2021, 23(11): 16 163-16 191.
- [21] 王慧亮, 李卓成. 基于能值水生态足迹模型的黄河流域水资源利用评价[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 147-152.
WANG Huiliang, LI Zhuocheng. Evaluation of water resources utilization in the Yellow River Basin based on emergy water ecological footprint model[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 147-152.
- [22] 周亮广, 梁虹. 基于主成分分析和熵的喀斯特地区水资源承载力动态变化研究: 以贵阳市为例[J]. 自然资源学报, 2006, 21(5): 827-833.
ZHOU Lianguang, LIANG Hong. A study on the evolution of water resource carrying capacity in Karst area based on component analysis and entropy[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(5): 827-833.
- [23] 周涛, 梁虹, 焦树林, 等. 基于主成分分析和熵的喀斯特地区地下水资源承载力评价[J]. 水科学与工程, 2016(4): 16-19.
ZHOU Tao, LIANG Hong, JIAO Shulin, et al. Assessment on groundwater resources carrying capacity in Karst area based on component analysis and entropy[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2016(4): 16-19.
- [24] 戴明宏, 王腊春, 魏兴萍. 基于熵权的模糊综合评价模型的广西水资源承载力空间分异研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 193-199.
DAI Minghong, WANG Lachun, WEI Xingping. Spatial difference of water resource carrying capacity of Guangxi using fuzzy comprehensive evaluation model based on entropy weight method[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 193-199.
- [25] 郑群威, 苏维词, 杨振华, 等. 基于集对分析法的喀斯特地区水资源安全动态变化及原因分析: 以贵州省为例[J]. 中国岩溶, 2019, 38(6): 846-857.
ZHENG Qunwei, SU Weici, YANG Zhenhua, et al. Analysis of dynamic change and reason of water resource security in Karst areas using the set

- pair method: An example of Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(6): 846-857.
- [26] 戴明宏, 王腊春, 汤洪. 基于多层次模糊综合评价模型的喀斯特地区水资源承载力研究[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(1): 151-156.
- DAI Minghong, WANG Lachun, TANG Hao. Research on water resources carrying capacity in Karst areas based on multilevel fuzzy comprehensive evaluation model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(1): 151-156.
- [27] 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): 8 694-8 706.
- ZHU Ping, LIU Xin, ZHENG Yuhang, et al. Tradeoffs and synergies of ecosystem services in key ecological function zones in Northern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(23): 8 694-8 706.
- [28] 代稳, 张美竹, 秦趣, 等. 基于生态足迹模型的水资源生态安全评价研究[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(12): 228-233.
- DAI Wen, ZHANG Meizhu, QIN Qu, et al. Ecological security evaluation of water resource based on ecological footprint model[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(12): 228-233.
- [29] 胡建辉, 谢明干, 韦添昌, 等. 应用深地震反射技术揭示喀斯特地区深部地质结构特征[J]. *中国地质*, 2009, 36(3): 742-745.
- HU Jianhui, XIE Minggan, WEI Tianchang, et al. The application of deep seismic reflection methods to the detection of deep geological structures beneath Karst areas[J]. *Geology in China*, 2009, 36(3): 742-745.
- [30] 邹胜章, 梁彬, 朱志伟, 等. 生态系统变化对岩溶水资源的影响: 以湘西为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2004, 13(6): 599-603.
- ZOU Shengzhang, LIANG Bin, ZHU Zhiwei, et al. Effect of ecosystem on water resource in Karst area: A case study in West Hunan[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(6): 599-603.
- [31] 李季孝, 符裕红, 张代杰, 等. 云南石漠化区水资源承载力评价[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(12): 128-135.
- LI Jixiao, FU Yuhong, ZHANG Daijie, et al. Evaluating carrying capacity of water resources in the rocky desertification regions in Yunnan Province[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(12): 128-135.
- [32] 李晓格, 张颖, 单永娟. 基于能值生态足迹模型的榆林市水资源可持续利用研究[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(4): 1 066-1 075.
- LI Xiaoge, ZHANG Ying, SHAN Yongjuan. Sustainable utilization of water resources in Yulin City based on an emergy ecological footprint model[J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(4): 1 066-1 075.
- [33] 李友光, 袁榆梁, 李卓成, 等. 基于能值水生态足迹的河南省水资源可持续利用评价[J]. *人民黄河*, 2022, 44(6): 100-104, 162.
- LI Youguang, YUAN Yuliang, LI Zhuocheng, et al. Evaluation of sustainable utilization of water resources in Henan Province based on spatial-temporal variation of energy water ecological footprint[J]. *Yellow River*, 2022, 44(6): 100-104, 162.
- [34] 杜轶, 郭青霞, 张勇. 2 种不同算法的水资源生态足迹动态比较分析: 以山西省为例[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 165-171.
- DU Yi, GUO Qingxia, ZHANG Yong. Dynamic comparative analysis of water resources ecological footprint based on two different algorithms: Taking Shanxi Province as an example[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 165-171.
- [35] 杨晶晶. 基于能值生态足迹的城市可持续性评价研究: 以重庆市为例[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- YANG Jingjing. Urban sustainability assessment based on the emergy ecological footprint: A case study of Chongqing city[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [36] 吕翠美, 周海生, 凌敏华, 等. 基于能值理论的水资源对农业生产贡献量化分析[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(4): 249-253.
- LYU Cuimei, ZHOU Haisheng, LING Minhua, et al. Quantitative analysis of water resources contribution to agricultural production based on energy theory[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(4): 249-253.
- [37] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [38] YANG Q, LIU G Y, HAO Y, et al. Quantitative analysis of the dynamic changes of ecological security in the provinces of China through emergy-ecological footprint hybrid indicators[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 184: 678-695.
- [39] PENG W J, WANG X M, LI X K, et al. Sustainability evaluation based on the emergy ecological footprint method: A case study of Qingdao, China, from 2004 to 2014[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 85: 1 249-1 261.
- [40] 赵春芳, 董朝阳, 伍磊, 等. 浙江省水资源生态足迹时空格局[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(1): 242-248.
- ZHAO Chunfang, DONG Chaoyang, WU Lei, et al. Spatial-temporal pattern of water resources ecological footprint in Zhejiang Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(1): 242-248.
- [41] 李子涵, 罗维均, 杜虎, 等. 喀斯特常绿落叶阔叶混交林旱季 CO₂ 通量特征及其影响因子[J]. *地球与环境*, 2020, 48(5): 525-536.
- LI Zihan, LUO Weijun, DU Hu, et al. CO₂ flux and its driving factors in a Karst evergreen deciduous broadleaf mixed forest in dry season[J]. *Earth and Environment*, 2020, 48(5): 525-536.
- [42] REES W E. Eco-footprint analysis: Merits and brickbats[J]. *Ecological Economics*, 2000, 32(3): 371-374.

Evaluating sustainable development of water resources in typical Karst basins in Guizhou plateau using energy-ecological footprint analysis

LI Yue¹, FENG Xia¹, WU Luhua², LUO Guangjie³, WANG Jinfeng⁴, WU Qian⁵

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

2. School of Economics and Management, Tongren University, Tongren 554300, China;

3. Guizhou Provincial Key Laboratory of Geographic State Monitoring of Watershed, Guizhou Education University, Guiyang 550018, China; 4. School of Economics and Management, Liupanshui Normal University, Liupanshui 553004, China;

5. Guizhou Vocational and Technical College of Water Resources and Hydropower, Guiyang 551416, China)

Abstract: 【Background and Objective】 Water resources play a vital role in sustaining life and supporting social and economic development. In the karst regions in southern China, rich precipitation combined with intricate geological structures makes sustainably managing water resources in the region a challenging task. This is further exacerbated by rapid urbanization and industrialization over the past decades. To address these challenges, this paper conducts an

in-depth analysis of water resource utilization in these regions by focusing on the Nanming River basin in the Guizhou Plateau. **【Method】** The analysis was based on the ecological footprint model - a classical method in ecological economics, and the energy ecological footprint model based on energy flow - the latest advancement in this field. Using data measured from 2010 to 2020 on water consumption and supply, we systematically analyzed the changes in water ecological footprint, ecological carrying capacity, ecological deficit, and ecological pressure in the region. **【Result】** From 2010 to 2020, the annual average ecological footprint of water resources and energy in the studied region was 1.08 hm² per capita, while the annual average ecological carrying capacity was 0.562 hm² per capita. Although there was an ecological deficit in water resources, the deficit showed a declining trend over the past 10 years. The annual average ecological pressure index of water resources in the region was 2.004, indicating a sub-security state but remaining within a safe range for such ecosystems. The average ecological and economic coordination index of water resources in the region was 1.345 over the past decade, close to the optimal coordination state which is 1.414. **【Conclusion】** Our study underscores a positive trajectory in water resource management in the Nanming River basin. Energy ecological footprint per capita, thousand-yuan- GDP and ecological deficit in the basin show declining trends, while ecological carrying capacity, ecological pressure, and ecological economic coordination index exhibit fluctuating patterns. These findings can help sustainable utilization of water resources in the studied region.

Key words: Karst areas; water resource; energy value theory; water ecological footprint; sustainable development

责任编辑: 赵宇龙

(上接第 95 页)

The effect of spire width on microclimate within Venlo-type greenhouses

GAO Zhenjun¹, XI Xiao¹, LI Hao^{2*}, LI Wei³, DING Xiaoming⁴, ZHANG Chenjun⁵

(1. College of Mechanical and Power Engineering of China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Science, Xinxiang 453002, China;

3. Guangdong Institute of Modern Agricultural Equipment, Guangzhou 510520, China; 4. Key Laboratory of Structural Design and Intelligent Construction of Agricultural Facilities, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China;

5. School of Intelligent Manufacturing, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: **【Objective】** The Venlo-type greenhouse is commonly used in commercial horticulture due to its efficient space utilization and superior light transmission. This study investigates the impact of spire width on microclimate within such greenhouses under natural ventilation conditions. **【Method】** The study focused on multi-span glass greenhouses. We used experimental measurement and CFD modelling to simulate the variations in temperature and airflow in the greenhouse for various spire widths: 3.2 m JD3.2, 3.6 m JD3.6 and 4 m JD4 under natural ventilation conditions when the outdoor wind speed was 0 and 1 m/s, respectively. **【Result】** ① Comparing with measured temperature at different sampling points in the greenhouse reveals that the relative error of the simulated temperature ranged from 0.2% to 3.3%, ② Spire width had a significant effect on temperature distribution in the greenhouse. In particular, temperature increased upward in the greenhouses with the JD3.2 spire, while, in contrast, temperature increased downward in the greenhouses with the JD3.6 spire. ③ Regardless of the outdoor wind speed, greenhouses with JD3.2 spire had the best heat removal efficiency. The heat removal efficiency of JD3.6 and JD4 spire and the associated temperature distribution in the greenhouses was better when the outdoor speed was 0 m/s than when the outdoor wind speed was 1 m/s. **【Conclusion】** For all spire widths we compared under different working conditions, the greenhouse with JD3.2 spire work best for ventilating and cooling the greenhouse.

Key words: venlo type greenhouse; spire width; natural ventilation; numeral calculations

责任编辑: 白芳芳