



•研究报告•

乌江流域生物多样性与生态系统服务的空间格局及相互关系

杨俊毅¹, 关潇^{1*}, 李俊生^{1,2}, 刘晶晶¹, 郝颖晶¹, 王槐睿^{3*}

1. 中国环境科学研究院国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012; 2. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055; 3. 海南省辐射环境监测站, 海口 570100

摘要: 生物多样性与生态系统服务密切相关, 但二者间的复杂关系和反馈机制尚未明晰。本研究以乌江流域为研究区域, 基于物种空间分布格局, 使用MaxEnt模型、Zonation软件评估了乌江流域的生物多样性, 并应用InVEST模型核算各项生态系统服务, 运用随机森林模型、部分依赖图模型(PDP模型)分析了生物多样性与生态系统服务间的相互关系。结果显示: 乌江流域的生物多样性呈东北高西南低的分布特征, 表现为下游 > 中游 > 上游; 2020年, 乌江流域的水源供给量为810.57 mm/m², 粮食供给量为735.08 kg/ha, 固碳服务为134.00 Mg/ha, 水源涵养量为227.98 mm/m², 土壤保持量为401.30 t/ha, 生境质量为0.68; 水源供给和水源涵养对生物多样性的贡献度较高, 分别为66.24%和44.72%; 除粮食供给这种依赖人为活动的生态系统服务外, 生物多样性与各生态系统服务均呈正相关。研究说明, 受气候和人类活动影响较大的生态系统服务驱使着生物多样性的改变, 但对于依赖生物功能的生态系统服务, 生物多样性是其重要调节因素。

关键词: 乌江流域; 生物多样性; 生态系统服务; 空间分布格局

杨俊毅, 关潇, 李俊生, 刘晶晶, 郝颖晶, 王槐睿 (2023) 乌江流域生物多样性与生态系统服务的空间格局及相互关系. 生物多样性, 31, 23061. doi: 10.17520/biods.2023061.

Yang JY, Guan X, Li JS, Liu JJ, Hao HJ, Wang HR (2023) Spatial patterns and interrelationships between biodiversity and ecosystem services in the Wujiang River Basin. Biodiversity Science, 31, 23061. doi: 10.17520/biods.2023061.

Spatial patterns and interrelationships between biodiversity and ecosystem services in the Wujiang River Basin

Junyi Yang¹, Xiao Guan^{1*}, Junsheng Li^{1,2}, Jingjing Liu¹, Haojing Hao¹, Huairui Wang^{3*}

1 State Environmental Protection Key Laboratory of Regional Eco-process and Function Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

2 Command Center for Comprehensive Survey of Natural Resources, China Geological Survey Bureau, Beijing 100055

3 Hainan Radiation Environment Monitoring Station, Haikou 570100

ABSTRACT

Aims: There is a close relationship between biodiversity and ecosystem services. This study seeks to clarify the complex relationships and feedback mechanisms experienced between biodiversity and ecosystem services.

Method: Based on the spatial distribution pattern of species, this study utilized the MaxEnt model and Zonation software to evaluate the biodiversity of the Wujiang River Basin and applied the InVEST (integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs) model to account for various ecosystem services. The study also used the random forest and partial dependence plot (PDP) machine learning models to analyze the relationship between biodiversity and ecosystem services in the Wujiang River Basin.

Results: The results showed that the biodiversity in the northeast of the Wujiang River Basin exhibited a distribution pattern of high, while in the southwest, the distribution pattern was low, with the downstream > midstream > upstream. In 2020, the Wujiang River Basin water supply was 810.57 mm/m²; the food supply was 735.08 kg/ha; carbon fixation

收稿日期: 2023-02-28; 接受日期: 2023-05-16

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFC1807704)

* 共同通讯作者 Co-authors for correspondence. E-mail: cynthia815@126.com; 57334776@qq.com

<https://www.biodiversity-science.net>

was 134.00 Mg/ha; water conservation capacity was 227.98 mm/m²; soil conservation capacity was 401.30 t/ha, and the habitat quality was 0.68. Water supply, accounting for 66.24%, and water conservation, accounting for 44.72%, had relatively high contributions to biodiversity. Except for food supply, an ecosystem service that relies on human activities, all other ecosystem services positively correlated with biodiversity.

Conclusion: The study indicate that ecosystem services influenced strongly by climate and human activities drive changes in biodiversity, but biodiversity is a regulatory factor of some importance for ecosystem services that depend on biological functions.

Key words: Wujiang River Basin; biodiversity; ecosystem services; spatial distribution pattern

生物多样性是指生物及其与周边环境形成的生态复合体以及与此相关的各种生态过程的总和(Mori et al, 2017; 文志等, 2020), 生态系统服务通过生物地球化学循环实现, 是人类从生态系统中获得的各种惠益(Carpenter et al, 2009), 二者在生态系统中均表现出受限于自然基底, 并被气候变化和人类活动所影响的特征(Paul et al, 2020)。高水平的生物多样性和生态系统服务不仅可为当前社会发展提供物质保障, 还有利于物质保障的长期稳定供给, 是人类社会可持续发展的重要基石。但千年生态系统评估(MA)、生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台(IPBES)的全球评估报告(Carpenter et al, 2009; Bongaarts, 2019)等权威研究共同证实了世界各国普遍面临着生物多样性下降和生态系统退化的境况, 保护生物多样性和增强生态系统服务成为人类社会实现可持续发展的必然选择。

生物多样性和生态系统服务密切相关, 二者不仅影响因素重叠, 且它们本身也具有交互作用(Mace et al, 2012), 厘清二者间的复杂关系和反馈机制是实现生物多样性和生态系统服务综合提升的基础。生物多样性是物种相互作用和各种生态过程共同作用的结果, 受气候变化和人类活动干扰(井新等, 2022), 并在生态过程中产生生态系统服务, 如植被生长带来的固碳释氧和土壤保持(Huang et al, 2018; Wen et al, 2019)。来自生物多样性-生态系统功能(BEF)的研究表明, 生态功能随着生物多样性水平的提高而增加(Rey Benayas et al, 2009; Paul et al, 2020)。但并非所有生态系统服务都完全依赖于生态功能, 生态系统服务由生物多样性、生态功能和非生物驱动因素单独或共同决定(Midgley, 2012; 井新和贺金生, 2021), 因此生态功能的增加未必能带来生态系统服务的提升(文志等, 2020)。如Lange等(2015)、Wen等(2019)的研究发现土壤微生物多样性和植物多样性增加有利于土壤保持和固

碳服务的提高, 但Adler等(2011)、Chen等(2022)、Wallis等(2023)的研究发现植物多样性与净初级生产力间并没有明确的关系。同时, 气候变化和人类活动会产生或影响生态系统服务(Paul et al, 2020), 包括气候变化对净初级生产力和水源供给的影响, 人类活动对粮食供给和生境质量的影响, 这些生态系统服务的变化会导致生物多样性的改变, 如区域内粮食供给的提升造成生物多样性的降低(Clark & Tilman, 2017), 城市发展过程中生境质量变化对生物多样性的影响(Bongaarts, 2019)等。目前已有较多研究关注生物多样性与生态系统服务的复杂联系, 但涉及的生态系统服务种类较少, 不能全面反映二者间的复杂关系和反馈机制, 有待进一步开展系统研究, 从而为生物多样性与生态系统服务的综合提升提供可靠的理论依据。

乌江流域位于我国西南地区中部, 生物多样性丰富, 承担着长江上游生态屏障功能, 但该地区目前仅有关于生物多样性或生态系统服务的研究。鉴于此, 本文基于乌江流域内植物物种空间分布格局, 应用MaxEnt模型、Zonation软件评估了乌江流域的生物多样性空间分布格局特征, 并使用InVEST模型核算了流域内三类六种生态系统服务, 再运用随机森林模型、部分依赖图模型(partial dependence plot, PDP模型)分析了生物多样性与各生态系统服务间的相互关系, 以期为当地生物多样性与生态系统服务的管理提升提供理论基础和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

乌江是长江上游南岸的最大支流, 发源于贵州省赫章县, 自西向东汇集了多条支流, 在重庆市涪陵区汇入长江。乌江流域(104°18′–109°22′ E, 26°07′–30°22′ N)是典型的喀斯特地区, 位于我国第二阶梯向第三阶梯的过渡区, 海拔由西向东逐渐降

低, 平均海拔为1,100 m, 面积为 $8.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。乌江流域属亚热带季风气候, 年均气温13–18℃, 年均降水量900–1,400 mm; 化屋脊以上为乌江上游, 化屋脊至思南为乌江中游, 思南以下为乌江下游(杨俊毅等, 2023)。乌江流域的植物区系以温带成分为主, 热带成分为辅, 主要由阔叶林、针叶林、灌丛和草甸组成; 因地势起伏较大, 地貌类型多样, 植被垂直分异明显, 常绿阔叶林是该流域山地垂直地带谱中典型的基带, 也是优势垂直带, 植被水平分布呈西南低东北高的特点。境内生物多样性丰富, 生态功能重要, 拥有各类保护区53个以及两个国家重点生态功能区(图1)。

1.2 数据来源及处理

1.2.1 物种分布数据

植物物种分布数据来源于中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.ac.cn/>)、国家标本资源共享平台(<http://www.nsii.org.cn/>)、全球生物多样性信息网络(<http://www.gbif.org>)等, 物种名的校对参照《中国植物志》(<http://www.iplant.cn/>)。在1 km范围内出现的重复物种仅保留1个点位, 并校准其经纬度; 为保证后续建模的可靠性, 仅保留分布点大于10个的物种(Ramirez-Villegas et al, 2014), 最终获得植物分布点12,922个, 分属561种植物。

1.2.2 环境因子

初步选取19种生物气候因子(附录1)、3种地形因子(海拔、坡度和坡向)、3种土壤因子(土壤有机

质、土壤酸碱度和土壤质地)作为影响物种分布的环境变量。生物气候因子数据来源于WorldClim (<https://worldclim.org/>), 空间分辨为1 km; 地形因子数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>), 空间分辨率为30 m; 土壤因子数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>), 空间分辨率为1 km。为减少因参数自相关性过高产生的误差, 对各物种的环境变量进行Pearson相关性分析, 仅将相关系数小于0.8的环境变量用于MaxEnt建模(Ramirez-Villegas et al, 2014; Li et al, 2021)。

生态系统服务核算所使用的土地利用数据来源于Earth System Science Data (<http://www.earth-system-science-data.net/>), 空间分辨率为30 m; 植物净初级生产力(NPP)数据来源于MODIS植被指数产品(<https://earthdata.nasa.gov/>), 空间分辨率为250 m; 年均潜在蒸散量、月均降水量、年均降水量和净生态系统生产力数据来源于国家地球系统科学数据中心(<http://loess.geodata.cn/>), 空间分辨率为1 km; 土壤数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn/>), 空间分辨率为1 km。各数据均为2020年的数据, 在 ArcGIS上统一投影坐标为WGS1984, 并采用最邻近法采样规则将空间分辨率统一为30 m。

1.3 研究方法

1.3.1 生物多样性评估

MaxEnt模型是根据最大熵原理, 基于物种实际分布的环境条件预测其潜在分布(Phillips et al, 2006; Li et al, 2021)。在模型运行中, 将数据的75%作为训练数据, 25%作为验证数据; 为减少模型的不确定性, 模拟次数设为1,000, 重复运行4次, 其余参数为默认值; 根据受试者工作特征(ROC)曲线下的面积(AUC)分析各物种的模拟精度(Phillips et al, 2006; Zhao et al, 2022), 仅将AUC值大于0.7的模拟结果用于下一步研究。

Zonation是一个用于大尺度生物多样性保护规划的软件, 是根据景观连通性和生物多样性特征(如物种分布、土地利用等), 逐步移除具有最小边际损失的栅格, 得到一个高连通性景观结构的嵌套栅格, 以此表征生物多样性保护等级, 并将此作为生物多样性评价指标。生物多样性保护等级的边际损失计算公式如下(Lehtomäki & Moilanen, 2013):

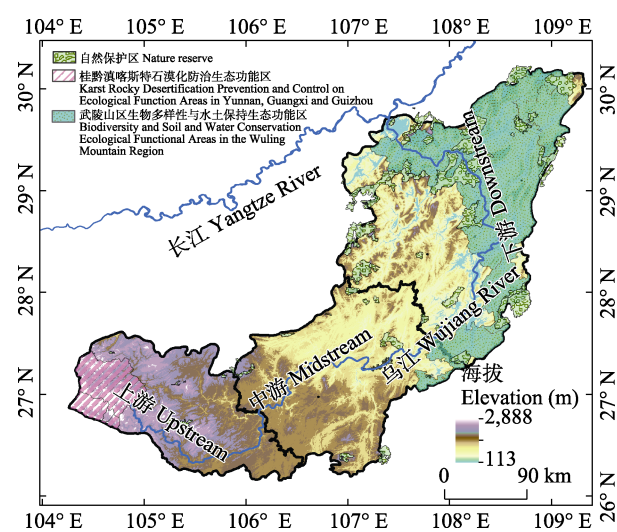


图1 乌江流域地理区位图

Fig. 1 Geographic location map of the Wujiang River Basin

$$\delta_i = \sum_j [V_j(R_j(S)) - V_j(R_j(S-i))] \quad (1)$$

其中, δ_i 是移除每个栅格*i*的边际损失, V_j 为递增函数, $R_j(S)$ 是物种*j*在剩余栅格*S*的分布, $S-i$ 表示剩余栅格*S*减去栅格*i*的合集。

运行Zonation软件, 导入基于MaxEnt模型所得的各物种潜在分布, 以2020年的土地利用数据为条件层, 移除规则为附加效益函数(additive benefit function), 翘曲因子设置为1, 其余参数为默认值。

1.3.2 生态系统服务核算

基于千年生态系统评估中所包含的4类生态系统服务, 考虑到数据的可获得性、乌江流域的生态功能定位, 本文选取三类六种生态系统服务开展研究: 供给服务中的水源供给和粮食供给; 调节服务中的固碳服务和水源涵养; 支持服务中的土壤保持和生境质量。水源供给在InVEST模型的产水模块中计算(Huang et al, 2022); 粮食供给基于NPP计算(Zhang et al, 2020); 固碳服务在InVEST模型的碳模块结合空间校正的方法计算(杨俊毅等, 2023); 水源涵养基于水源供给, 综合地形指数、土壤饱和导水率和流速系数计算(曹明等, 2021); 土壤保持在InVEST模型的泥沙淤积模块中计算(Huang et al, 2022); 生境质量在InVEST模型的生境质量模块中进行评估(刘园等, 2019)。

1.3.3 生物多样性与生态系统服务的相互关系

随机森林模型是一种包含多个决策树的分类器算法, 多决策树的训练方式使其克服了过拟合问题, 且随机森林模型既能处理离散型数据, 也能处理连续型数据, 适用于包含多类变量的分析(Dai et al, 2022)。在使用随机森林模型进行回归分析的过程中, 将70%的数据作为训练数据集, 30%的数据作为验证数据集, 节点数设为500, 以得到各生态系统服务对生物多样性的贡献度。

部分依赖图模型是一种全局解释模型的方法, 可分析单个因子对模型结果的边际效应, 展示解释变量与目的变量间复杂的线性或非线性响应(Friedman, 2001)。本文利用部分依赖图模型定量分析了生物多样性与生态系统服务之间的响应特征。

2 结果

2.1 生物多样性空间分布格局

本研究共获得561种植物的分布数据, 使用

MaxEnt模型模拟了其潜在分布, 共有537种植物的AUC值大于0.70, 其中近50%物种的AUC值大于0.90(图2), 表明模型具有良好的模拟效果。将AUC值大于0.70的537种植物的潜在分布和2020年的土地利用数据置于Zonation软件, 评估乌江流域生物多样性。结果表明乌江流域生物多样性的空间分布格局与物种点分布基本保持一致, 均呈东北高西南低的特征, 表现为下游 > 中游 > 上游(图3)。与物种点分布相比, 生物多样性在地理空间上的分布更连续, 如乌江下游西部的物种点呈团状密集分布, 而生物多样性则沿山脉呈带状分布。

2.2 生态系统服务的空间格局

乌江流域的调节服务与支持服务均呈东北高西南低的分布格局, 最高区域均位于下游, 除土壤保持的最低区域位于中游外, 其余最低区域均位于上游; 供给服务中, 水源供给呈东北高西南低的分布格局, 但粮食供给呈西南高东北低的分布格局(图4, 表1)。2020年, 乌江流域的水源供给总量为 $7.12 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 单位均值为 810.57 mm/m^2 ; 粮食供给总量为 $6.46 \times 10^6 \text{ t}$, 单位均值为 735.08 kg/ha ; 固碳服务总量为 $1.15 \times 10^3 \text{ Tg}$, 单位均值为 131.30 Mg/ha ; 水源涵养总量为 $2.00 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 单位均值为 227.98 mm/m^2 ; 土壤保持总量为 $3.53 \times 10^9 \text{ t}$, 单位均值为 401.30 t/ha ; 生境质量单位均值为0.68 (生境质量为指数, 统计中仅计算其均值)。

2.3 生物多样性与生态系统服务的相互关系

以生物多样性为因变量, 各项生态系统服务为自变量, 基于随机森林模型定量分析各生态系统服务对生物多样性的贡献度。供给服务中, 水源供给

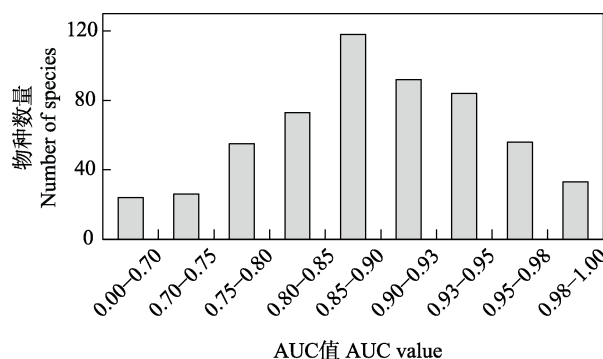


图2 MaxEnt模型所得561种植物物种AUC值的分布

Fig. 2 Distribution of the number of AUC values for 561 plant species from the MaxEnt model

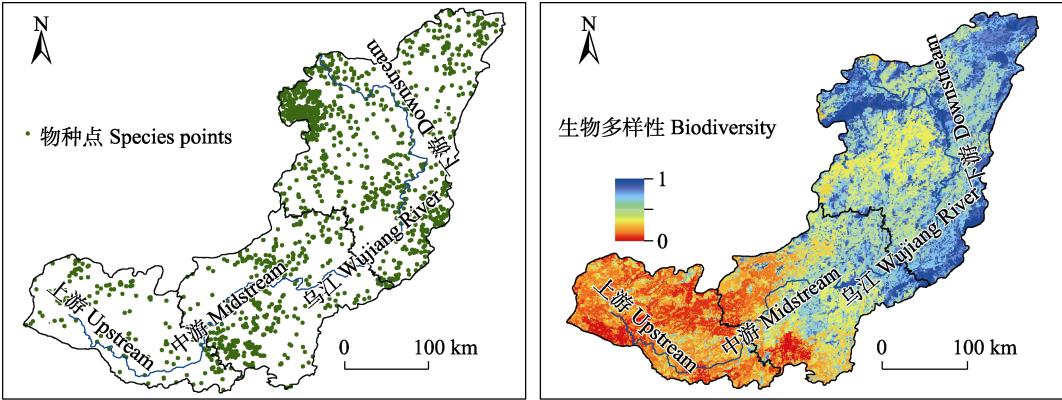


图3 乌江流域物种点分布和基于Zonation评估的生物多样性空间格局
Fig. 3 Species point distribution and spatial pattern of biodiversity based on Zonation assessment in the Wujiang River Basin

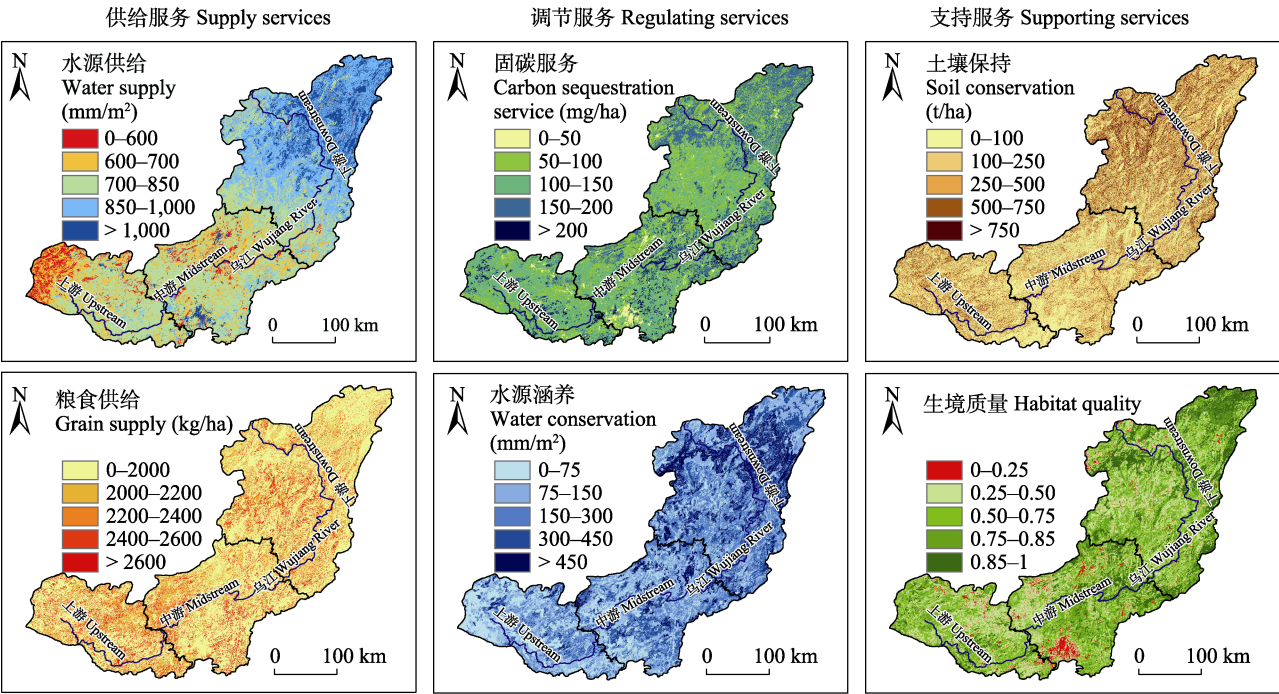


图4 2020年乌江流域6种生态系统服务的空间格局
Fig. 4 Spatial pattern of six ecosystem services in the Wujiang River Basin in 2020

表1 2020年乌江流域六种生态系统服务统计
Table 1 Statistics of six ecosystem service in the Wujiang River Basin in 2020

| | 供给服务 Supply services | | | | 调节服务 Regulating services | | | | 支持服务 Supporting services | | | |
|-----------------|------------------------------------|--|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|------------------------------------|--|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--|
| | 水源供给 Water supply | | 粮食供给 Grain supply | | 固碳服务 Carbon sequestration service | | 水源涵养 Water conservation | | 土壤保持 Soil conservation | | 生境质量 Habitat quality | |
| | 均值 Mean (mm/m ²) | 总量 Total (× 10 ⁸ m ³) | 均值 Mean (kg/ha) | 总量 Total (× 10 ⁴ t) | 均值 Mean (Mg/ha) | 总量 Total (Tg) | 均值 Mean (mm/m ²) | 总量 Total (× 10 ⁸ m ³) | 均值 Mean (t/ha) | 总量 Total (× 10 ⁸ t) | 均值 Mean | |
| 上游 Upstream | 709.85 | 137.94 | 826.30 | 160.60 | 127.30 | 247.41 | 146.13 | 28.37 | 329.24 | 6.40 | 0.63 | |
| 中游 Midstream | 741.94 | 187.51 | 737.81 | 186.49 | 129.74 | 328.00 | 203.06 | 51.28 | 272.42 | 6.88 | 0.66 | |
| 下游 Downstream | 896.37 | 386.86 | 692.40 | 298.88 | 134.00 | 578.40 | 279.42 | 120.52 | 509.21 | 21.98 | 0.72 | |
| 全流域 Total basin | 810.57 | 712.31 | 735.08 | 645.97 | 131.30 | 1,153.81 | 227.98 | 200.18 | 401.30 | 35.26 | 0.68 | |

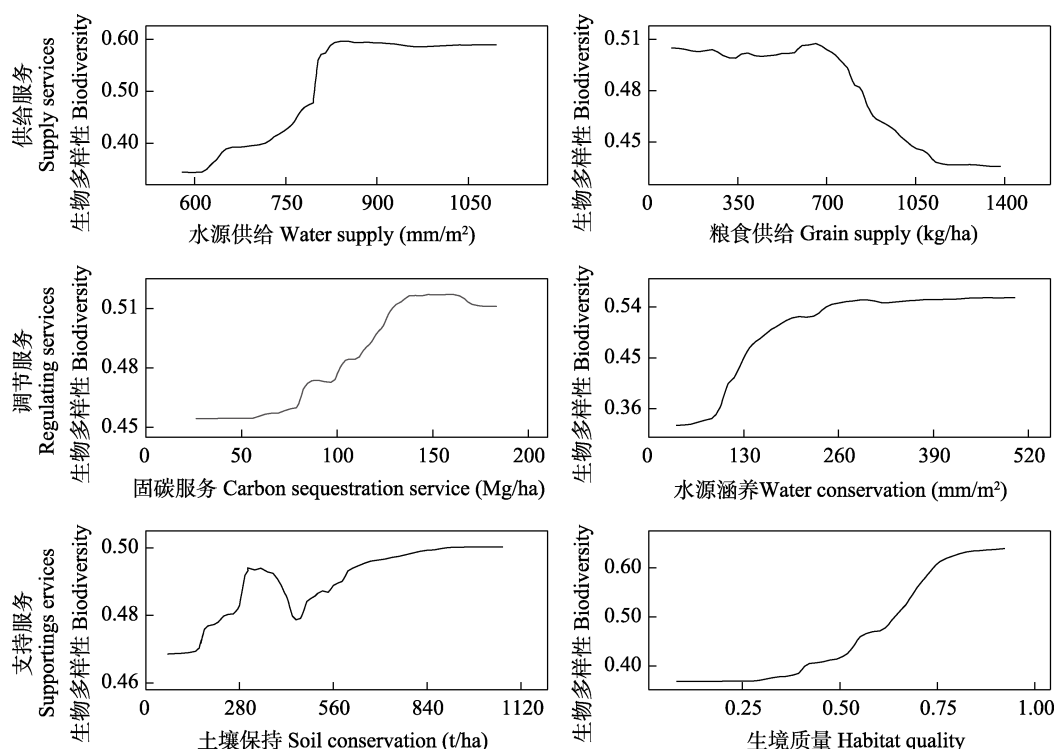


图5 2020年乌江流域生物多样性与6种生态系统服务间的非线性关系

Fig. 5 Nonlinear relationship between biodiversity and six ecosystem services in the Wujiang River Basin in 2020

和粮食供给对生物多样性的贡献度分别为66.24%和27.43%;调节服务中,固碳服务和水源涵养对生物多样性的贡献度分别为19.91%和44.72%;支持服务中,土壤保持和生境质量对生物多样性的贡献度分别为26.18%和42.82%。

部分依赖图模型分析结果表明(图5),除粮食供给外,各生态系统服务与生物多样性均呈正相关。水源供给超过790 mm/m²时,生物多样性大幅提高,达到850 mm/m²后,生物多样性趋于稳定;粮食供给在0–700 kg/ha时,生物多样性基本稳定,超过700 kg/ha后,生物多样性明显下降;固碳服务在135–165 Mg/ha时,生物多样性最高且保持稳定,超过165 Mg/ha后,生物多样性略有下降;水源涵养超过90 mm/m²后,生物多样性显著提高,当超过260 mm/m²后,生物多样性趋于稳定;土壤保持在300–380 t/ha时生物多样性较高,超过380 t/ha时生物多样性反而下降,达到450 t/ha后,生物多样性才呈增加趋势,直至1,000 t/ha,生物多样性趋于稳定;生境质量超过0.3后生物多样性显著提高,超过0.85后生物多样性趋于稳定。

3 讨论

本研究基于InVEST模型等遥感手段核算了生态系统服务,但仅靠模型易出现数量级的差异,因此核算结果需与实地数据进行对比分析。与2020年《长江流域及西南诸河水资源公报》(<http://www.cjw.gov.cn/>)中的数据比较,本研究成果水源供给准确率为99.76%;与各县市统计年鉴中的粮食产量比较,粮食供给准确率为91.66%;与Tang等(2018)基于实地采样的2011–2015年全国均值数据比较,固碳服务高26.78%;与Wu等(2019)基于实地采样的2000–2015年全国均值数据比较,水源涵养服务高49.95%;根据计算得到的实际土壤流失量与2020年《中国河流泥沙公报》(<http://www.irtces.org/>)中的数据比较,本研究土壤保持服务准确率为99.76%;和贵州省《环境状况公报》比较,生境质量空间分布基本一致。多项研究表明我国西南地区的固碳服务在近年来显著增加(Hu et al, 2022),鉴于Tang等(2018)、Wu等(2019)的采样时间在本研究之前,Wu等(2019)研究期间的降水量显著低于2020年,且他们的研究也

表明西南地区固碳服务和水源涵养明显高于全国均值, 因此本研究结果高于Tang等(2018)、Wu等(2019)的研究结果是合理的。综上, 本研究所核算的各项生态系统服务结果可信, 能用于进一步分析。

从乌江流域各项生态系统服务的空间分布看, 总体为下游生态环境较好, 提供的生态系统服务较多, 中游次之, 上游较差, 但土壤保持与粮食供给的空间分布与此并不一致(图4)。土壤保持表现为下游 > 上游 > 中游, 可能是因为上游为桂黔滇喀斯特石漠化防治生态功能区所在区域, 是退耕还林工程、石漠化综合治理工程等大规模生态修复的重点实施区(Hu et al, 2022), 生态工程的实施会带来植被面积的增加, 而植被覆盖度和根系的增加有利于土壤保持服务的提高, 即使仍不如自然条件较好的下游, 但会稍高于中游地区。粮食供给表现为上游 > 中游 > 下游, 这是因为粮食是人类耕作生产的, 其空间分布会与人口密度相一致(赵敏等, 2022)。

基于随机森林所得的各生态系统服务对生物多样性的贡献度可以理解为二者间相互影响的程度, 但区分施加影响方和被影响方还需结合生态系统过程来分析。从各生态系统服务对生物多样性的贡献度来看, 供给服务、调节服务和支持服务并无明显差异, 但与水相关的生态系统服务表现出高于其他生态系统服务的影响度, 水源供给和水源涵养对生物多样性的贡献度分别为66.24%和44.72%。与水相关的生态系统服务受自然影响强烈, 有研究表明, 降水对水源供给的贡献度高达90%, 是典型的单气象因子驱动的生态系统服务(付刚, 2022)。在生态系统中, 降水直接影响水源供给的高低, 而生物多样性虽然会被降水所影响, 如降水过少导致的水源不足会降低生物多样性(曹明等, 2021), 但生物对降水变化的响应是滞后的, 因此受自然影响较大的生态系统服务不仅先于生物多样性改变, 其供给水平的高低也成为生物多样性的调节因素之一。粮食供给受人为干扰强烈, 人类是否耕作决定了农田是否有产出, 在农田生态系统中, 人类活动使得单一的粮食作物占据了其他植物的生存空间, 破坏了动物的栖息环境(Clark & Tilman, 2017), 造成生物多样性的下降, 这类生态系统服务供给水平的高低也是影响生物多样性变化的因素之一。对于固碳服务和土壤保持等来说, 生物多样性是它们的基础。生

物多样性与生物功能多样性直接相关, 并影响生态系统功能, 生态位互补理论认为, 由于生态位差异, 高生物多样性群落中的生物能够占有更广的“功能空间”, 生物功能更丰富, 使群落的资源利用效率得到提高(Letten et al, 2017), 这就意味着生物多样性高的植物群落光能利用效率更高, 使得区域内光合作用增强, 进而提高固碳服务(Huang et al, 2018), 同时, 植物多样性丰富的地区地下根系更密集, 生态位分化更明显, 使得地上植物叶片功能多样性增加, 这些均有利于土壤保持服务的提高, Wen等(2019)在海南地区的研究中同样发现了植物叶片多功能可提高土壤保持服务。可见对于依赖生物功能的生态系统服务来说, 生物多样性是其调节因素。综上可知, 生态系统通过生物地球化学循环实现生态系统服务, 分析生物多样性与生态系统服务的关系要根据生态系统过程来甄别。生物多样性调节着依赖于生物功能而存在的生态系统服务; 对于受自然影响和人为干扰较大、先于生物多样性改变的生态系统服务, 生物多样性被它们所影响。

生物多样性与生态系统服务是相互影响的, 生态系统服务的变化因直接影响人类社会福祉而更易被大众感知(Paul et al, 2020), 如降水减少, 人类会普遍感知到水源供给的匮乏, 但难以察觉到生物多样性的丧失, 因此, 分析生物多样性随生态系统服务的变化对监管更有参考价值。本文基于乌江流域生物多样性与生态系统服务的响应特征, 发现当生态系统服务处于较低和较高水平时, 对生物多样性的影响均趋于稳定, 而当生态系统服务处于中间水平, 较小的变化就会显著影响生物多样性。乌江流域上游的生态系统服务和生物多样性水平较低, 如果通过适当的管理手段提高上游的生态系统服务水平, 会对生物多样性有较高的增益; 中游的生态系统服务和生物多样性处于中间水平, 生物多样性对生态系统服务变化较敏感, 生态系统服务的轻微变化就会对生物多样性产生较大影响, 因此需关注此地区生态系统服务的变化, 防止生态环境恶化影响生态系统服务进而造成生物多样性的大幅下降; 乌江下游的生态系统服务和生物多样性水平较高, 即使生态系统服务水平稍有降低, 生物多样性仍能保持较高的水平。

除粮食供给这种严重依赖人为活动的生态系

统服务外, 乌江流域内的生物多样性与各生态系统服务均呈正相关。土壤保持服务在较低水平时, 会有较高的生物多样性, 这是因为土壤保持在核算时用的是土壤潜在侵蚀量减去实际土壤侵蚀量(Huang et al, 2022), 当部分地区自然环境较好、土壤潜在侵蚀量低时, 也会核算出低的土壤保持, 而这类地区会有较高的生物多样性。在固碳服务极高的地区, 生物多样性反而稍有下降, 这是因为乌江流域实施过多轮大规模生态修复工程, 种植了部分物种单一的人工林, 这类植被生长年限不长, 与成熟的天然林相比, 它们的光合作用更高(Hu et al, 2022), 但食物链和营养等级较少, 因此在固碳服务高的区域, 生物多样性反而稍有下降。水源供给、粮食供给等强烈受自然影响和人为干扰的生态系统服务是影响生物多样性的重要因素, 根据其与生物多样性的非线性关系可提出具有实际意义的管理意见。从响应特征来看, 当水源供给低于790 mm/m²时生物多样性会迅速降低, 因此在区域生物多样性保护中, 应随时关注降水量, 在易干旱地区, 应实施适当的人为干预, 如确保生态林的比例提高生态蓄水能力、搭配种植针阔叶树种提高流域产流等, 保证水源供给, 从而保护生物多样性; 生物多样性在粮食生产低于700 kg/ha时基本不变, 但当超过700 kg/ha后, 生物多样性急速下降, 目前流域内粮食产量为735.08 kg/ha, 在满足人类需求的前提下, 不宜再扩大粮食耕种面积, 并可适当减少。

参考文献

- Adler PB, Seabloom EW, Borer ET, Hillebrand H, Hautier Y, Hector A, Harpole WS, O'Halloran LR, Grace JB, Anderson TM, Bakker JD, Biederman LA, Brown CS, Buckley YM, Calabrese LB, Chu CJ, Cleland EE, Collins SL, Cottingham KL, Crawley MJ, Damschen EI, Davies KF, DeCraeppeo NM, Fay PA, Firn J, Frater P, Gasarch EI, Gruner DS, Hagenah N, Lambers JHR, Humphries H, Jin VL, Kay AD, Kirkman KP, Klein JA, Knops JMH, La Pierre KJ, Lambrinos JG, Li W, MacDougall AS, McCulley RL, Melbourne BA, Mitchell CE, Moore JL, Morgan JW, Mortensen B, Orrock JL, Prober SM, Pyke DA, Risch AC, Schuetz M, Smith MD, Stevens CJ, Sullivan LL, Wang G, Wragg PD, Wright JP, Yang LH (2011) Productivity is a poor predictor of plant species richness. *Science*, 333, 1750–1753.
- Bongaarts J (2019) Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. *Population and Development Review*, 45, 680–681.
- Cao M, Li JS, Wang W, Xia JY, Feng CT, Fu G, Huang WJ, Liu FZ (2021) Assessing the effectiveness of water retention ecosystem service in Qinling National Nature Reserve based on InVEST and propensity score matching model. *Biodiversity Science*, 29, 617–628. (in Chinese with English abstract) [曹明, 李俊生, 王伟, 夏聚一, 冯春婷, 付刚, 黄文婕, 刘方正 (2021) 基于InVEST与倾向评分匹配模型评估秦岭国家级自然保护区水源涵养服务保护成效. 生物多样性, 29, 617–628.]
- Carpenter SR, Mooney HA, Agard J, Capistrano D, Defries R S, Díaz S, Dietz T, Duraipappah AK, Oteng-Yeboah A, Pereira HM, Perrings C, Reid WV, Sarukhan J, Scholes RJ, Whyte A (2009) Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 106, 1305–1312.
- Chen SF, Xie L, Zhou WL, Chen H, Xu XJ, Jiang S, Zang MY, Peng Y, Chen X, Duan YF, Chen L, Li XX, Ding H, Fang YM (2022) Species diversity has a positive interrelationship with aboveground biomass and a mismatch with productivity in a subtropical broadleaf forest on the Wuyi Mountains, China. *Diversity*, 14, 952.
- Clark M, Tilman D (2017) Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice. *Environmental Research Letters*, 12, 064016.
- Dai LJ, Ge JS, Wang LQ, Zhang Q, Liang T, Bolan N, Lischied G, Rinklebe J (2022) Influence of soil properties, topography, and land cover on soil organic carbon and total nitrogen concentration: A case study in Qinghai-Tibet Plateau based on random forest regression and structural equation modeling. *Science of the Total Environment*, 821, 153440.
- Friedman JH (2001) Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *The Annals of Statistics*, 29, 1189–1232.
- Fu G (2022) The Trade-off and Synergy Between Landscape Pattern Evolution and Ecosystem Services in China in the Past 40 Years. PhD dissertation, Beijing Normal University, Beijing. (in Chinese with English abstract) [付刚 (2022) 近40年中国陆域景观格局演变与生态系统服务权衡和协同关系研究. 博士学位论文, 北京师范大学, 北京.]
- Hu LN, Li Q, Yan JH, Liu C, Zhong JX (2022) Vegetation restoration facilitates belowground microbial network complexity and recalcitrant soil organic carbon storage in southwest China karst region. *Science of the Total Environment*, 820, 153137.
- Huang Q, Peng L, Huang KX, Deng W, Liu Y (2022)

- Generalized additive model reveals nonlinear trade-offs/synergies between relationships of ecosystem services for mountainous areas of Southwest China. *Remote Sensing*, 14, 2733.
- Huang Y, Chen Y, Castro-Izaguirre N, Baruffol M, Brezzi M, Lang A, Li Y, Härdtle W, von Oheimb G, Yang X, Liu XJ, Pei K, Both S, Yang B, Eichenberg D, Assmann T, Bauhus J, Behrens T, Buscot F, Chen XY, Chesters D, Ding BY, Durka W, Erfmeier A, Fang JY, Fischer M, Guo LD, Guo DL, Gutknecht JLM, He JS, He CL, Hector A, Hönig L, Hu RY, Klein AM, Kühn P, Liang Y, Li S, Michalski S, Scherer-Lorenzen M, Schmidt K, Scholten T, Schuldt A, Shi XZ, Tan MZ, Tang ZY, Trogisch S, Wang ZW, Welk E, Wirth C, Wubet T, Xiang WH, Yu MJ, Yu XD, Zhang JY, Zhang SR, Zhang NL, Zhou HZ, Zhu CD, Zhu L, Bruelheide H, Ma KP, Niklaus PA, Schmid B (2018) Impacts of species richness on productivity in a large-scale subtropical forest experiment. *Science*, 362, 80–83.
- Jing X, He JS (2021) Relationship between biodiversity, ecosystem multifunctionality and multiserviceability: Literature overview and research advances. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 1094–1111. (in Chinese with English abstract) [井新, 贺金生 (2021) 生物多样性与生态系统多功能性和多服务性的关系: 回顾与展望. *植物生态学报*, 45, 1094–1111.]
- Jing X, Jiang SJ, Liu HY, Li Y, He JS (2022) Complex relationships and feedback mechanisms between climate change and biodiversity. *Biodiversity Science*, 30, 22462. (in Chinese with English abstract) [井新, 蒋胜亮, 刘慧颖, 李昱, 贺金生 (2022) 气候变化与生物多样性之间的复杂关系和反馈机制. *生物多样性*, 30, 22462.]
- Lange M, Eisenhauer N, Sierra CA, Bessler H, Engels C, Griffiths RI, Mellado-Vázquez PG, Malik AA, Roy J, Scheu S, Steinbeiss S, Thomson BC, Trumbore SE, Gleixner G (2015) Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nature Communications*, 6, 6707.
- Lehtomäki J, Moilanen A (2013) Methods and workflow for spatial conservation prioritization using Zonation. *Environmental Modelling & Software*, 47, 128–137.
- Letten AD, Ke PJ, Fukami T (2017) Linking modern coexistence theory and contemporary niche theory. *Ecological Monographs*, 87, 161–177.
- Li G, Xiao NW, Luo ZL, Liu DM, Zhao ZP, Guan X, Zang CX, Li JS, Shen ZH (2021) Identifying conservation priority areas for gymnosperm species under climate changes in China. *Biological Conservation*, 253, 108914.
- Liu Y, Zhou Y, Du YT (2019) Study on the spatio-temporal patterns of habitat quality and its terrain gradient effects of the middle of Yangtze River economic belt based on the InVEST model. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 28, 2429–2440. (in Chinese with English abstract) [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, 2429–2440.]
- Mace GM, Norris K, Fitter AH (2012) Biodiversity and ecosystem services: A multilayered relationship. *Trends in Ecology & Evolution*, 27, 19–26.
- Midgley GF (2012) Biodiversity and ecosystem function. *Science*, 335, 174–175.
- Mori AS, Lertzman KP, Gustafsson L (2017) Biodiversity and ecosystem services in forest ecosystems: A research agenda for applied forest ecology. *Journal of Applied Ecology*, 54, 12–27.
- Paul C, Hanley N, Meyer ST, Fürst C, Weisser WW, Knoke T (2020) On the functional relationship between biodiversity and economic value. *Science Advances*, 6, eaax7712.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231–259.
- Ramirez-Villegas J, Cuesta F, Devenish C, Peralvo M, Jarvis A, Arnillas CA (2014) Using species distributions models for designing conservation strategies of Tropical Andean biodiversity under climate change. *Journal for Nature Conservation*, 22, 391–404.
- Rey Benayas JM, Newton AC, Diaz A, Bullock JM (2009) Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: A meta-analysis. *Science*, 325, 1121–1124.
- Tang XL, Zhao X, Bai YF, Tang ZY, Wang WT, Zhao YC, Wan HW, Xie ZQ, Shi XZ, Wu BF, Wang GX, Yan JH, Ma KP, Du S, Li SG, Han SJ, Ma YX, Hu HF, He NP, Yang YH, Han WX, He HL, Yu GR, Fang JY, Zhou GY (2018) Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 115, 4021–4026.
- Wallis CIB, Crofts AL, Inamdar D, Arroyo-Mora JP, Kalacska M, Laliberte E, Vellend M (2023) Remotely sensed carbon content: The role of tree composition and tree diversity. *Remote Sensing of Environment*, 284, 113333.
- Wen Z, Zheng H, Ouyang ZY (2020) Research progress on the relationship between biodiversity and ecosystem services. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 31, 340–348. (in Chinese with English abstract) [文志, 郑华, 欧阳志云 (2020) 生物多样性与生态系统服务关系研究进展. *应用生态学报*, 31, 340–348.]
- Wen Z, Zheng H, Smith JR, Zhao H, Liu L, Ouyang ZY (2019) Functional diversity overrides community-weighted mean traits in linking land-use intensity to hydrological ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 682, 583–590.
- Wu X, Shi WJ, Tao FL (2021) Estimations of forest water retention across China from an observation site-scale to a national-scale. *Ecological Indicators*, 132, 108274.
- Yang JY, Li JS, Guan X (2023) Spatio-temporal pattern and driving mechanism of ecosystem carbon sequestration services in the Wujiang River Basin. *Research of Environmental Sciences*, 36, 757–767. (in Chinese with

- English abstract) [杨俊毅, 李俊生, 关潇 (2023) 乌江流域固碳服务时空格局及驱动机制. 环境科学研究, 36, 757–767.]
- Zhang Y, Gurung R, Marx E, Williams S, Ogle S, Paustian K (2020) DayCent model predictions of NPP and grain yields for agricultural lands in the contiguous U.S. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 125, e2020JG005750.
- Zhao M, Di DR, Huang GW, Shi WY (2022) Evolution and coupling between economic and population spatial pattern in Wujiang River Basin. Research of Soil and Water Conservation, 29, 298–310, 321. (in Chinese with English abstract) [赵敏, 狄东睿, 黄光伟, 时伟宇 (2022) 乌江流域经济与人口空间格局演变及耦合特征. 水土保持研究, 29, 298–310, 321.]
- Zhao ZY, Xiao NW, Shen M, Li JS (2022) Comparison between optimized MaxEnt and random forest modeling in predicting potential distribution: A case study with *Quasipaa boulengeri* in China. Science of the Total Environment, 842, 156867.
- (责任编辑: 马克明 责任编辑: 黄祥忠)

附录 Supplementary Material

附录1 本文使用的19个生物气候因子

Appendix 1 19 bioclimatic factors used in this study

<https://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2023061-1.pdf>

附录1 本文使用的19个生物气候因子

Appendix 1 19 bioclimatic factors used in this study

| 编号 | Code | 生物气候因子 | Bioclimatic factor |
|----|------|-----------|-------------------------------------|
| 1 | | 年平均气温 | Annual mean temperature |
| 2 | | 平均气温日较差 | Mean diurnal range |
| 3 | | 等温性 | Isothermality |
| 4 | | 气温季节性变动系数 | Temperature seasonality |
| 5 | | 最热月最高温度 | Max temperature of warmest month |
| 6 | | 最冷月最低温度 | Min temperature of coldest month |
| 7 | | 气温年较差 | Temperature annual range |
| 8 | | 最湿季平均温度 | Mean temperature of wettest quarter |
| 9 | | 最干季平均温度 | Mean temperature of driest quarter |
| 10 | | 最暖季平均温度 | Mean temperature of warmest quarter |
| 11 | | 最冷季平均温度 | Mean temperature of coldest quarter |
| 12 | | 年降水量 | Annual precipitation |
| 13 | | 最湿月降水量 | Precipitation of wettest month |
| 14 | | 最干月降水量 | Precipitation of driest month |
| 15 | | 降水量季节性变化 | Precipitation seasonality |
| 16 | | 最干季降水量 | Precipitation of wettest quarter |
| 17 | | 最湿季降水量 | Precipitation of driest quarter |
| 18 | | 最暖季降水量 | Precipitation of warmest quarter |
| 19 | | 最冷季降水量 | Precipitation of coldest quarter |