

广西岩溶湖库空间分异、形态特征及地质-气候控制机制*

甘智杰^{1,2,3}, 李建鸿^{1,3**}, 唐湘玲², 黄芬^{1,3}, 于爽^{1,3}, 覃露慧^{1,2,3}, 肖琼^{1,3}, 孙平安^{1,3}

(1: 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西壮族自治区/自然资源部岩溶动力学重点实验室, 联合国教科文组织国际岩溶研究中心/岩溶动力系统与全球变化国际联合研究中心, 桂林 541004;

2: 桂林理工大学, 桂林 541006;

3: 桂林岩溶地质广西野外科学观测研究站, 广西壮族自治区平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 桂林 541004)

摘要: 在全球气候变暖加剧、全球碳循环研究日益重要的背景下, 岩溶区水体作为高效的碳汇载体, 其精准识别与特征研究具有重要意义。广西作为我国典型岩溶区, 其岩溶与非岩溶湖泊水库(湖库)的系统划分尚属空白。本研究旨在填补这一空白, 为全国岩溶区湖库研究提供基础数据, 并为水域生态保护治理提供科学依据。研究以广西 788 个湖库(面积>10 hm²)为对象, 基于 Lake-Topo Cat 等多源地理空间数据, 利用 GIS 技术识别湖库并提取其形态特征(面积、库容、岸线)及集水区属性。结合 World Karst Aquifer Map (WOKAM) 和 Global Lithological Map (GLIM) 数据, 依据集水区岩溶地层面积占比(>75%为岩溶湖库, 35-75%为半岩溶, 10-35%为弱岩溶, <10%为非岩溶)对湖库进行系统分类。进一步应用随机森林模型, 定量分析气候降雨、集水区岩性、地形及人口密度等因子对岩溶湖库分布的影响。研究发现:(1) 广西的 788 个湖库中, 岩溶湖库数量最多(314 个, 占比 40%), 主要集中分布于桂中、桂西北、桂西南和桂东北的峰丛洼地、溶蚀盆地等岩溶强烈发育区;(2) 岩溶湖库单体面积最大(98.25 km²)、库容极值最高(10,260 m³)、岸线形态最复杂(极值 554.97 km), 但其平均面积(1.07 km²)和中位库容(1.30 m³)较小, 表明其以中小型为主但存在特大型个体。(3) 岩溶湖库集水区以碳酸盐沉积岩为主导(占比>90%), 而非岩溶湖库集水区则以硅质碎屑沉积岩等非岩溶类型岩石为主。(4) 随机森林模型的重要性分析揭示, 岩溶湖泊的形成主要受高渗透性可溶岩(22.91%)、低渗透性致密岩(26.67%)和降雨量(28.94%)的控制。其中, 高渗透性可溶岩与充沛降雨是关键驱动因子, 而低渗透性致密岩则显著制约其发育; 岩溶水库的修建则受降雨量(22.66%)、碳酸盐岩(12.35%)、低渗透岩致密岩(11.14%)、地形坡度(13.19%)和人类建设活动共同控制。本研究首次系统绘制了广西岩溶湖库分布图谱并量化其形态特征, 揭示了岩性(高渗透性可溶岩主导与低渗透性致密岩制约)和气候(降雨量)是岩溶湖库形成的核心控制因素。研究成果填补了广西岩溶湖库系统调查的空白, 为深入理解岩溶区碳汇过程提供了重要基础数据, 也为区域水资源管理与水域生态保护策略制定提供了科学支撑。

关键词: 岩溶; 湖泊水库; 空间分异; 随机森林

Spatial differentiation, morphological characteristics and geological-climate control mechanisms of karst lakes and reservoirs in Guangxi

* 2025-08-01 收稿;2025-12-07 收修改稿。

广西壮族自治区自然科学基金项目(2023JJA150068, 桂科 AB2401015)、桂林岩溶地质广西野外科学观测研究站科研能力建设项目(桂科 23-026-274)、中国地质调查局地质调查项目(DD20230547)、中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2023010)、桂林市科学研究与技术开发项目(20220129-1)、桂林市科技局 2023 年重点研发项目(20230111-1)和国家自然科学基金项目(41702271、42377081、41977166)联合资助。

**通信作者; E-mail: jianhongLi1988@163.com

Gan Zhijie^{1,2,3}, Li Jianhong^{1,3**}, Tang Xiangling², Huang Fen^{1,3}, Yu Shi^{1,3}, Tan Luhui^{1,2,3}, Xiao Qiong^{1,3} & Sun Ping'an^{1,3}

(1. Institute of Karst Geology, CAGs/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR; International Research Center on Karst of UNESCO, Guilin 541004, P.R.China.

2. Guilin University of Technology, Guilin 541006, P.R.China

3. Guangxi Guilin Karst Geology Field Scientific Observation and Research Station, Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo 531406, P.R.China

Abstract: Against the backdrop of intensifying global warming and the growing emphasis on global carbon cycle research, the precise identification and characterization of water bodies in karst regions—as efficient carbon sinks—is of great significance. As a typical karst area in China, Guangxi still lacks a systematic classification of its karst and non-karst lakes and reservoirs. This study aims to fill this gap, to provide foundational data for research on lakes and reservoirs in karst areas nationwide, and to offer a scientific basis for ecological protection and management of regional water bodies. We investigated 788 lakes and reservoirs (each >10 ha in area) in Guangxi. Using multi-source geospatial data including Lake-TopoCat and applying GIS technology, we identified these water bodies and extracted their morphological characteristics (area, reservoir capacity, shoreline length) and catchment attributes. By integrating data from the World Karst Aquifer Map (WOKAM) and the Global Lithological Map (GLIM), and based on the proportion of karst strata within the catchment area (>75% defined as karst, 35–75% as semi-karst, 10–35% as weak karst, and <10% as non-karst), a systematic classification was conducted. A random forest model was further applied to quantitatively analyze the influence of climatic (rainfall), lithological, topographic, and anthropogenic (population density) factors on the distribution of karst lakes and reservoirs. The results show that: (1) Among the 788 lakes and reservoirs, karst types are the most numerous (314, accounting for 40%), primarily concentrated in the intensively developed karst regions of central, northwest, southwest, and northeast Guangxi, such as peak cluster depressions and karst basins. (2) Karst lakes and reservoirs exhibit the largest maximum individual area (98.25 km²), the highest extreme reservoir capacity (10,260 million m³), and the most complex shoreline morphology (maximum 554.97 km). However, their average area (1.07 km²) and median reservoir capacity (1.30 million m³) are relatively small, indicating a prevalence of medium and small sizes alongside the existence of extra-large individuals. (3) The catchments of karst lakes and reservoirs are dominated by carbonate sedimentary rocks (>90%), whereas non-karst types are mainly underlain by non-carbonate rocks such as siliceous clastic sediments. (4) The random forest model significance analysis reveals that the formation of natural karst lakes is primarily controlled by highly permeable soluble rocks (22.91%), low-permeability compact rocks (26.67%), and rainfall (28.94%). Among these, permeable soluble rocks and abundant rainfall are key drivers, whereas low-permeability rocks significantly restrict development. The construction of karst reservoirs is jointly controlled by rainfall (22.66%), carbonate rocks (12.35%), low-permeability compact rocks (11.14%), terrain slope (13.19%), and human activity. This study provides the first systematic mapping of karst lakes and reservoirs in Guangxi and quantifies their morphological traits, demonstrating that lithology (dominated by permeable soluble rocks and restricted by low-permeability rocks) and climate (rainfall) are the core factors controlling their formation and distribution. The results fill a gap in the systematic survey of karst water bodies in Guangxi, deliver essential baseline data for understanding carbon sink processes in karst regions, and offer scientific support for regional water resource management and aquatic ecosystem protection strategies.

Keywords: Karst; Lakes and Reservoirs; Spatial Differentiation; Random Forest;

世界气象组织的《全球气候状况 2023》报告指出，全球大气 CO₂ 浓度已从工业革命前的 208ppm 升高到 2024 年的 421.2ppm，且以每年约 2ppm 的速度增加，这一趋势加剧了地球的温室效应，并引发了极端天气事件的频发、海平面上升及生态系统退化等一系列环境问题，在全球范围内造成了规模空前的影响，应对气候变化和全球碳循环研究已然成为科学界的共识^[1-7]。岩溶作用是全球碳循环的重要部分，碳在大气圈、地表水和地下水以及碳酸盐岩矿物之间进行积极的交换^[8]，敏感且快速的响应外界环境的变化，在

水循环的驱动下,碳酸盐岩(全球最大的碳库)在如降雨、季节等时间尺度中积极参与了全球碳循环^[9-10]。李朝君等的研究表明,岩溶湖泊水库(湖库)的平均二氧化碳吸收通量约为 $8.50\text{ t km}^{-2}/\text{a}$,而非岩溶湖库的平均二氧化碳吸收通量约为 $2.86\text{ t km}^{-2}/\text{a}$,岩溶湖库的排放效率几乎是而非岩溶湖库的三倍^[11],这使得对湖库进行岩溶和非岩溶的划分成为了必然。

2011年,全球水系统项目(Global Water System Project)发起了一项国际合作,为科学界构建了统一且具有精确地理定位的水库数据库(GRand),收录了6862座水库与大坝的信息,其中包括库容超过 0.1 km^3 的水库^[12]。然而,该数据库并未涉及岩溶地层的相关记录。Lake-Topo Cat以基于HydroLAKES数据库作为掩膜层,识别出143万个面积超过10公顷的湖泊和水库,并提供丰富的水文特征数据^[13],但同样未能区分岩溶与非岩溶湖泊和水库;马荣华等^[14]以11004景/幅卫星遥感影像数据为基础,确认了全国目前共有 1.0 km^2 以上的自然湖泊2693个,但亦未对岩溶湖泊进行单独识别。申诗嘉等^[15]则基于广东省水利统计数据,从定性及定量角度分析了不同类型水库的空间分布特征,为区域水利工程规划与水资源管理提供了参考,但仍未开展岩溶视角下的分类研究。综上所述,无论是国际数据库还是国内研究成果,现有湖泊与水库研究大多聚焦于空间分布、面积及库容等基本属性,对其岩溶属性的识别与对比分析仍然缺乏系统性探索。

事实上,仅从数量、面积或库容等表层属性开展研究,难以揭示岩溶湖库的独特性及形成机制。已有研究表明,其成因受地质构造、岩性条件、水文过程和气候环境的多重控制:构造格局决定了水体汇聚与阻隔条件^[16],碳酸盐岩分布与溶蚀强度主导洼地的形成与演化^[17],而水文及气候变化则通过影响补给与蒸发过程塑造湖库演替^[18]。然而,目前相关研究多为局部案例,缺乏从宏观地质背景到区域水文过程的系统性、多尺度综合分析框架。

我国湖库类型多样、分布广泛,其中岩溶湖泊与水库主要集中于西南典型岩溶区。广西岩溶面积约占全区总面积的43.05%,约占全国岩溶总面积的五分之一,是我国岩溶地貌最为典型和发育程度最高的地区之一。西江流域面积达 20.2 万 km^2 ,占广西总面积的86%,不仅是珠江的主干流,也是珠江流域的重要组成部分。受地貌破碎、土层薄弱等自然条件影响,岩溶区极易发生水土流失,且水体对面源污染和地下水污染高度敏感,使得湖库在区域水资源调蓄与水质保障中发挥着不可替代的作用^[19]。同时,岩溶湖库在区域碳循环中具有独特功能,其强烈的水—气界面交换过程直接影响着碳的释放与吸收,对区域乃至全球碳收支产生深远影响。因此,系统厘清广西岩溶湖库的分布格局及控制因素,不仅可为我国其他岩溶区湖库研究提供基础参考,也对水域生态保护与流域碳循环评估具有重要意义,并为国家“双碳”战略和流域综合治理提供科学支撑。

1 数据与方法

1.1 数据来源

湖泊水库数据主要来源于Lake-Topo Cat: A global Lake drainage Topology and Catchment database,涵盖全球面积大于10 ha的湖泊与水库及其对应的集水区信息,均基于Hydro LAKES Topo Cat v1.1数据库。Lake-Topo Cat建立于2006年由美国世界自然基金会启动的Hydro SHEDS项目基础之上,旨在提供高质量的全球水文地理信息支持大尺度水文生态研究^[13]。Hydro SHEDS提供结构统一、空间连续的水文数据产品,包括集水区边界、河流网络及湖泊分布。

岩溶区划的数据主要来源于The World Karst Aquifer Map(WOKAM)及其数据库,WOKAM系统标注了全球岩溶含水层空间分布,涵盖石灰岩、白云岩等可溶性岩石区域。数据集通过集成地质图、地形坡度及水文地质参数,为岩溶地区地下水脆弱性评估、岩溶塌陷风险预测及水资源可持续发展提供关键数据支撑,尤其适用于中国西南岩溶地貌区域研究^[20]。

岩性数据主要来源于Global Lithological Map(GLIM),其提供了全球地表15类主要岩石类型(如碳酸盐沉积岩、蒸发岩、变质岩等)的分布信息,通过机器学习算法融合多源地质数据与遥感光谱特征^[21]。该数据集适用于全球碳循环模拟、土壤侵蚀速率计算及矿产资源勘探,尤其适用于岩性-水文耦合模型构建及生态环境影响评估。

降雨数据来源于中国 1km 分辨率逐月降水量数据集（1901-2024），该数据集是根据 CRU 发布的全球 0.5° 气候数据集以及 WorldClim 发布的全球高分辨率气候数据集，通过 Delta 空间降尺度方案在中国降尺度生成的。数据集经由 496 个独立气象观测点的数据进行验证，验证结果可信^[22]。

人口密度数据基于 LandScan HD 数据集，由 Oak Ridge National Laboratory (ORNL) 基于地理空间科学、遥感技术与机器学习方法构建，旨在提供全球最高分辨率的人口分布估算结果^[23]。该数据集分辨率达到 90m，是目前可用的最高分辨率的全球人口分布数据之一。

Global Human Settlement Layer (GHSL) 由欧盟联合研究中心（Joint Research Centre, JRC）开发，旨在通过遥感与地理信息技术刻画全球人类聚居分布、密度及动态变化特征^[24]。GHSL 数据基于多时相卫星影像（如 Landsat、Sentinel）提取全球范围内的建筑物、人口与城市边界信息，生成包括建筑覆盖度（GHS-BUILT）、人口密度（GHS-POP）、聚居区分类（GHS-SMOD）等多类产品。该数据集为空间城市化分析、土地利用变化监测及人类活动对生态环境影响评估提供了关键支撑，广泛应用于全球可持续发展与区域规划研究。

1.2 定义

岩溶湖库是指主要分布在岩溶地区(包括地表、地下), 或以岩溶水为主要补给水源, 具有岩溶地区特有的富钙偏碱性水土特征和典型岩溶水土循环演化机制, 以喜钙耐碱的湿地生物群落为主或与喜钙耐碱的生物群落相互依存为特征的内陆湖泊水库^[25]。其中, 湖泊一般为在地质构造、岩性条件及水文气候等自然因素作用下形成的天然封闭性或半封闭性水体, 其形成机制主要与地壳运动、岩溶溶蚀、堰塞作用等地貌过程相关; 水库则是由人类通过修建坝体或其他工程手段截流河道或蓄水而形成的人工水体, 在形成机制上主要受人类活动主导, 与湖泊存在显著区别。本研究依据湖库补给水源是否源自岩溶区来判定其岩溶属性, 补给水源范围即为集水区范围, 其中若湖库的补给水源 75%以上来源于岩溶区, 则认为其为岩溶湖库; 对于补给水源 35%-75%来源于岩溶区的湖库, 认为其为半岩溶湖库; 若有仅有 10%-35%补给水源来自岩溶区域, 则认为其为弱岩溶湖库; 其大于 90%补给水源来自非岩溶区域的湖库, 则为非岩溶湖库。

1.3 技术方法

1.3.1 岩溶湖库划分方法 本研究基于多源地理空间数据集成与空间分析技术, 旨在实现岩溶区湖库的精准划分。从 Lake-Topo Cat 数据库中提取广西区域内湖库及其集水区的矢量边界信息, 同时从 WOKAM 数据库中提取广西岩溶区的空间分布数据, 以确保数据源具有权威性并保持空间分辨率一致。随后, 基于 Python 编程环境, 结合 ArcGis pro 中的 ArcPy 与 GeoPandas 等空间分析工具, 构建自动化处理流程, 对岩溶区与集水区数据进行空间叠加分析, 计算各集水区内岩溶地层的面积占比, 并依据预设阈值进行分类: 岩溶区占比 10%-35%的集水区定义为弱岩溶集水区, 35%-75%为半岩溶集水区, 大于 75%则为典型岩溶集水区。分类结果通过空间连接工具与原始湖库数据进行链接, 形成属性完整的综合图层。

针对数据融合过程中的拓扑冲突问题, 采用动态优化策略: 若同一编号的集水区边界连续且属性一致, 则进行几何合并; 若空间重叠但属性差异显著, 则优先保留面积较大的集水区单元, 确保数据逻辑的合理性。对于边界模糊或属性矛盾的极端情况, 通过人工判别结合历史水文资料和遥感影像解译, 进一步厘清集水区归属, 避免自动化处理可能导致的误判。最终, 通过筛选与导出功能, 将岩溶特征显著的湖库集水区独立成图, 生成专题图层。在图层生成后, 开展人工质量检查, 验证岩溶湖库的空间分布是否与区域地貌、水文条件吻合, 必要时基于经验对异常区域进行局部修正。

1.3.2 随机森林 随机森林是一种集成学习算法, 通过构建多个决策树并进行投票或平均, 以提升分类或回归任务的准确性与泛化能力^[26]。该方法采用自助采样与特征随机选择机制, 有效减少过拟合, 提升模型稳定性。本研究采用随机森林模型对影响因素进行建模, 变量重要性通过平均准确率下降量 (Mean Decrease Accuracy, MDA) 方法进行评估, 即通过打乱某变量值观察预测准确率下降幅度, 从而量化其对模型性能的贡献。

模型构建在 R 语言平台上实现, 本文设置树的数量为 $N=500$, 每次节点分裂时输入的特征变量个数为 $m=3$, 并启用 `importance = TRUE` 参数以提取变量重要性信息。建模前对样本进行分层抽样, 按 7:3 比例划分为训练集与测试集, 分别用于模型训练与准确性验证。

通过 MDA 来计算特征变量重要性, 该方法基于袋外数据 (Out-of-bag)。首先对每棵决策树使用其对应的袋外数据计算模型的误差 e_t ; 随后, 随机改变袋外数据第 j 个特征变量 X_j 的值, 再次计算模型误差 e_{jt} ; 最终, 变量的重要性可表示 $V(X_j)$ ^[27-28]:

$$V(X_j) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (e_{jt} - e_t)$$

其中 N 为森林中树的总数。若某一变量在被扰乱后显著增加了模型误差 X_i ，说明该变量对模型预测准确性具有关键作用，视为重要特征。

2 广西岩溶湖库分布现状

2.1 广西岩溶湖库总体分布格局

广西地处云贵高原东南边缘，两广丘陵西部，南临南海。整体地貌为山地丘陵型盆地格局，盆地大小不一，山系多呈弧形展布，丘陵错综复杂、结构层层相套。广西岩溶分布面积达 102232.12 km²，占全区总面积的 43.05%，主要分布于桂中、桂西北、桂西南和桂东北。广西共有湖泊与水库 788 个，其中岩溶湖库 314 个，占比 39.85%，如图 1 所示，岩溶湖库主要集中在广西中部、西北、西南、东北区域的峰丛洼地、溶蚀盆地等岩溶发育区。这些区域岩溶地层广泛发育，地下水与地表水交换频繁，湖库集水区多受溶蚀裂隙网络控制，水文过程与岩溶管道系统高度耦合，促成岩溶湖库的形成。半岩溶湖库和弱岩溶湖库数量分别为 27 和 15 个，主要分布于典型岩溶区与碎屑岩或非可溶岩地层的过渡地带，表现为岩溶与非岩溶地质单元的交错分布，其中半岩溶湖库的岩溶地层与碎屑岩层共存，地表水系部分受岩溶管道影响，整体水文结构表现为溶蚀作用与地表径流的混合控制模式；相比之下，弱岩溶湖库岩溶地层零星分布或埋藏较深，其集水区以非可溶岩为主，地表水系发育完整，形成主要依赖地表径流汇水，岩溶作用对水文过程的影响较弱。而非岩溶湖库主要分布在广西中部及南部，其区域地质结构稳定，水文循环以地表径流和大气降水补给为主，基本不受岩溶作用控制。

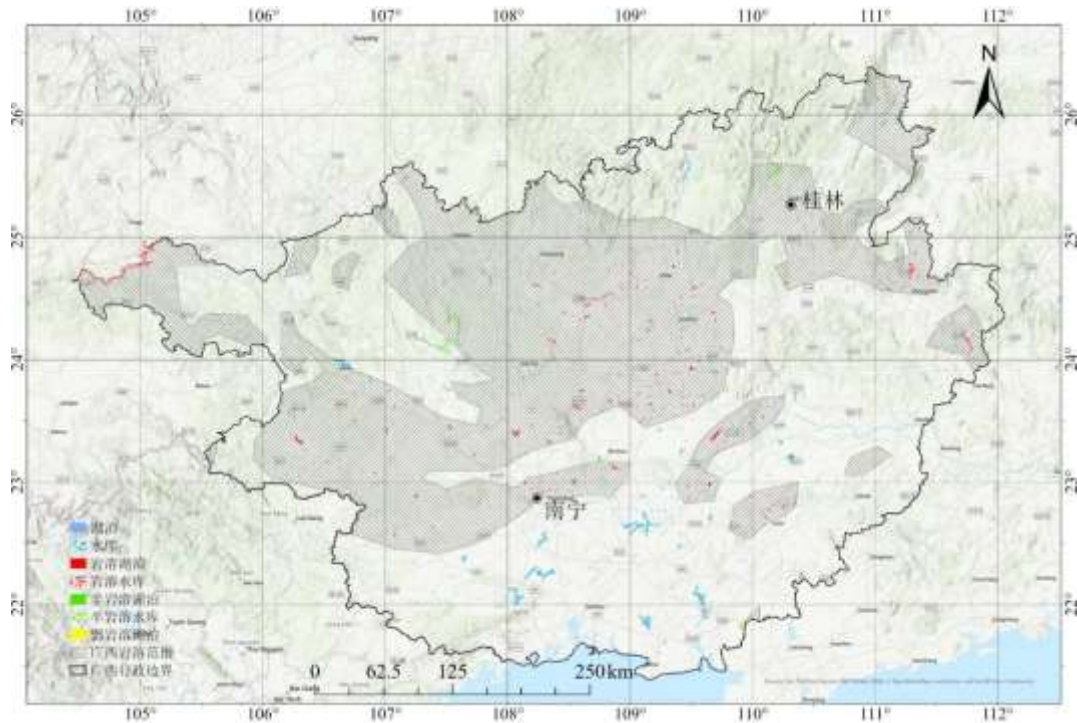


图 1 广西岩溶湖库图

Fig.1 Map of Karst Lakes and Reservoirs in Guangxi

2.2 广西岩溶湖库特征

2.2.1 广西岩溶湖库岸线、面积、容量 图 2 和表 1 的数据显示，非岩溶湖库总面积最大（515.72 km²），岩溶湖库次之（335.95 km²），半岩溶与弱岩溶湖库面积分别为 130.30 km² 和 9.15 km²。岩溶湖库个体面积普遍较大，极大值高达 98.25 km²，远超半岩溶（13.19 km²）、弱岩溶（4.6 km²）及非岩溶湖库（66.54 km²）。平均面积则呈现特殊分布：半岩溶类型均值最高（5.01 km²），但其面积中位数仅 0.34 km²，表明其分布高度偏态，少数大型水库显著拉高平均值；岩溶与非岩溶湖库平均面积相近（1.07–1.21 km²），中位数均低于 0.3 km²，表明其主体为中小型水库。

岩溶湖库的容量极大值达 10260 mcm，分别为半岩溶（2610 mcm）、弱岩溶（4.6 mcm）及非岩溶湖库（3000 mcm）的 3.9 倍、2230 倍和 3.4 倍，但其平均值（41.73 mcm）和中位数（1.3 mcm）均低于半岩

溶 (129.15 mcm, 1.65 mcm)，表明岩溶区存在少数特大型蓄水体。半岩溶湖库的平均容量最高，其过渡性地貌兼具岩溶与非岩溶蓄水优势的特点。弱岩溶湖库容量均值仅为 2.93 mcm，与其弱岩溶背景下的蓄水能力不足一致。非岩溶湖库的平均容量 (29.84 mcm) 介于岩溶与半岩溶类型之间，但其容量分布同样呈现偏态特征 (中位数 1.09 mcm)，表明其存在特大型湖库，但小型湖库数量占优。

岩溶湖库的岸线极大值 (554.97 km) 显著高于其他类型 (半岩溶 362.32 km、弱岩溶 35.86 km、非岩溶 359.24 km)，反映复杂岩溶地貌下水体边界的不规则扩展。半岩溶湖库的平均岸线 (24.1 km) 和中位数 (4.14 km) 均较高。弱岩溶湖库岸线均值 (5.89 km) 最低，形态相对简单，符合其受岩溶作用影响较弱的特征。非岩溶湖库岸线极大值 (359.24 km) 与岩溶类型接近，但中位数 (3.38 km) 略高，表明其水体形态主要受非岩溶地貌控制，岸线分布较为均匀。

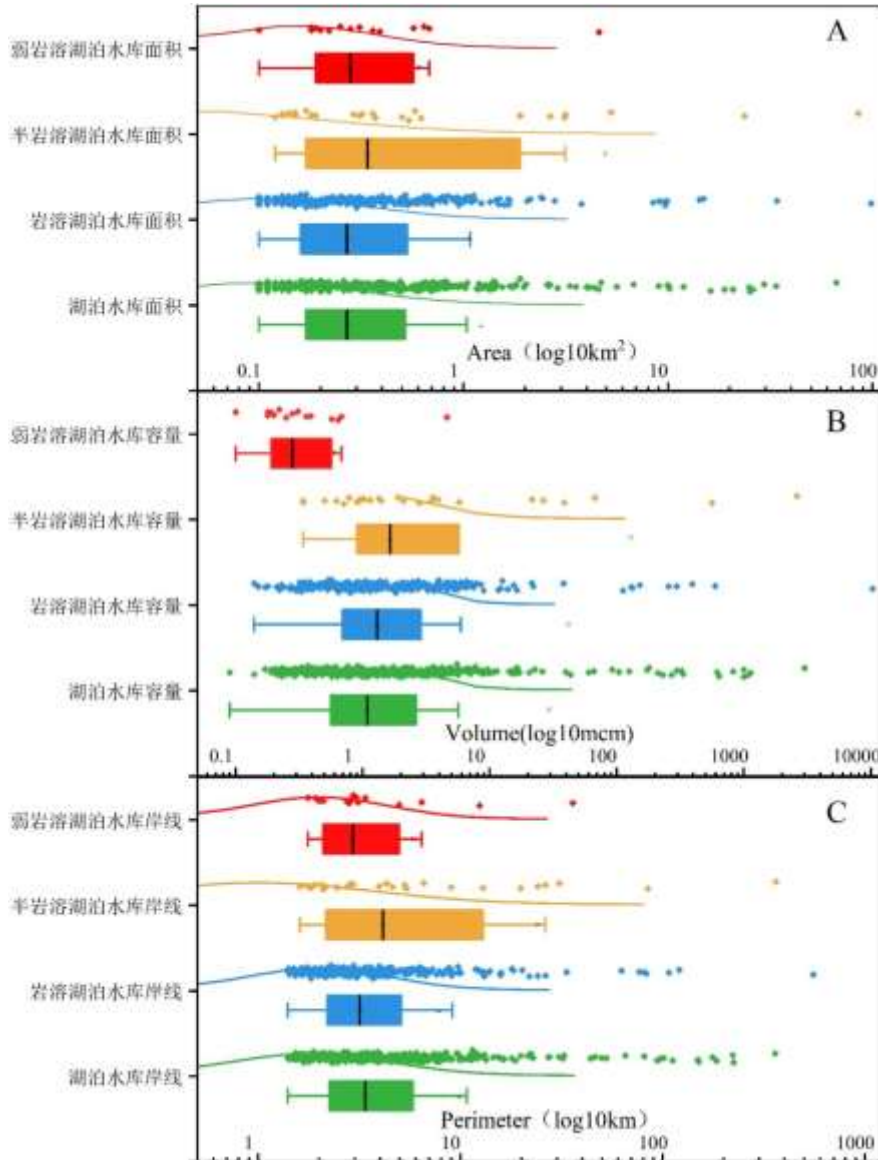


图 2 湖库面积、容量、岸线箱线图 (A 为面积箱线图; B 为容量箱线图; C 为岸线箱线图)

Figure 2 Box Plot of Lake and Reservoir Area, Capacity and Shorelines (Note: A is the area box plot; B is the capacity box plot; C represents the shorelines box plot)

2.2.2 广西湖库集水区及岩性 如图 4 和表 2 所示，在广西境内的 788 个湖泊与水库中，湖泊集水区总面积约 $5.86 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，平均每个湖泊 128.5 km^2 ，最小 0.38 km^2 、最大 $1.50 \times 10^4 \text{ km}^2$ ；水库集水区总面积约

5.21 × 10⁴ km², 平均 156.8 km², 范围 0.38 – 2.73 × 10⁴ km²。按岩溶发育程度划分, 湖泊中的非岩溶湖泊集水区占比最高(80.0%), 总面积 4.69 × 10⁴ km², 平均为 109.0 km²; 岩溶、半岩溶与弱岩溶湖泊分别占 4.9%、10.1%和 5.0%, 其平均集水区面积依次为 1446.7 km²、657.4 km² 和 195.8 km²。水库则以岩溶类型为主, 其集水区面积合计 4.66 × 10⁴ km², 占比 89.4%, 平均面积为 149.2 km²; 半岩溶水库占 7.6%, 平均 218.7 km²; 非岩溶水库仅占 3.0%, 平均 782.9 km², 无弱岩溶水库。

表 1 湖库面积、容量、岸线基本数据
Tab.1 Basic Data of Lake and Reservoir Area, Capacity and Shorelines

		湖库	岩溶湖库	半岩溶湖库	弱岩溶湖库
面积 (km ²)	极小	0.10	0.10	0.12	0.10
	极大	66.54	98.25	13.19	4.60
	平均	1.21	1.07	5.01	0.61
	中位数	0.27	0.27	0.34	0.28
	总值	515.72	335.95	130.30	9.15
容量 (mcm)	极小	0.09	0.14	0.34	0.27
	极大	3000.00	10260.00	2610.00	4.60
	平均	29.84	41.73	129.15	2.93
	中位数	1.09	1.30	1.65	1.54
	总值	12683.34	13061.41	3357.91	9.15
岸线 (km)	极小	1.40	1.40	1.61	1.76
	极大	359.24	554.97	362.32	35.86
	平均	9.77	7.82	24.10	5.89
	中位数	3.38	3.18	4.14	2.94
	总值	4153.02	2447.48	626.48	88.38

如图 3 和图 4 所示, 广西湖泊与水库集水区的岩性结构中, 碳酸盐沉积岩与硅质碎屑沉积岩总体占据主导地位, 不同岩溶发育程度的水体在岩性组成上表现出明显差异。在整体范围内, 碳酸盐沉积岩占比 40%, 硅质碎屑沉积岩 29.36%, 混合沉积岩 16.84%, 其余如酸性深成岩、松散沉积物和火山岩等合计不足 5%。非岩溶湖泊集水区主要覆盖硅质碎屑沉积岩 (41.08%), 碳酸盐沉积岩次之 (24.86%), 而岩溶湖泊则几乎完全由碳酸盐沉积岩构成 (90.34%), 混合沉积岩次之 (9%)。半岩溶与弱岩溶湖泊则分别呈现“碳酸盐 > 硅质碎屑 > 酸性深成”与“硅质碎屑 > 碳酸盐 > 酸性深成”两种过渡格局。水库方面, 碳酸盐沉积岩更为突出, 所有水库占比为 52.18%, 混合沉积岩为 22.52%, 硅质碎屑沉积岩约 19.69%; 非岩溶水库硅质碎屑沉积岩 (89.74%) 为主, 而岩溶与半岩溶水库则分别呈现“碳酸盐岩 (54.83%) > 混合沉积岩 (24.35%) > 硅质碎屑 (16.6%)”与“碳酸盐岩 (47.25%) > 硅质碎屑 (20.98%)”的岩性组合特征。

表 2 湖库集水区面积
Tab.2 Area of Lake and Reservoir Catchment

	平均 (km ²)	最大值 (km ²)	最小值 (km ²)	共 (km ²)
湖泊	108.98	15048.47	0.38	46861.39
岩溶湖泊	1446.68	2891.70	1.66	2893.36
半岩溶湖泊	657.38	3081.48	4.05	5916.44
弱岩溶湖泊	195.78	1499.27	0.60	2936.76
水库	782.85	918.75	646.96	1565.70
岩溶水库	149.22	27348.32	0.38	46557.89
半岩溶水库	218.67	3337.31	1.04	3936.00

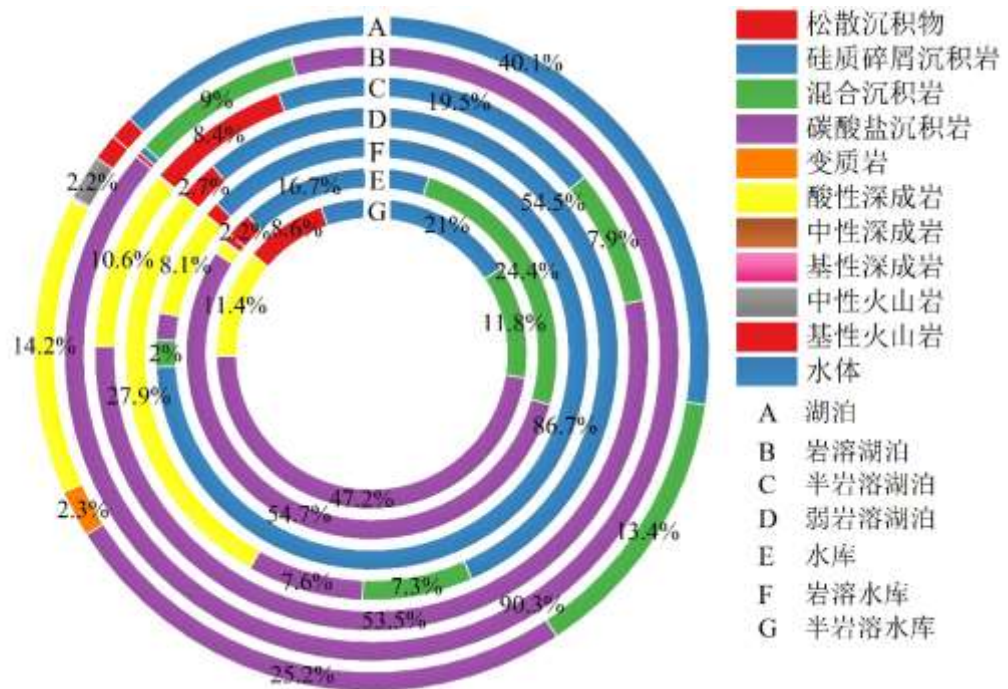


图3 集水区岩性图

Fig.3 Lithology Map of the Catchment Area

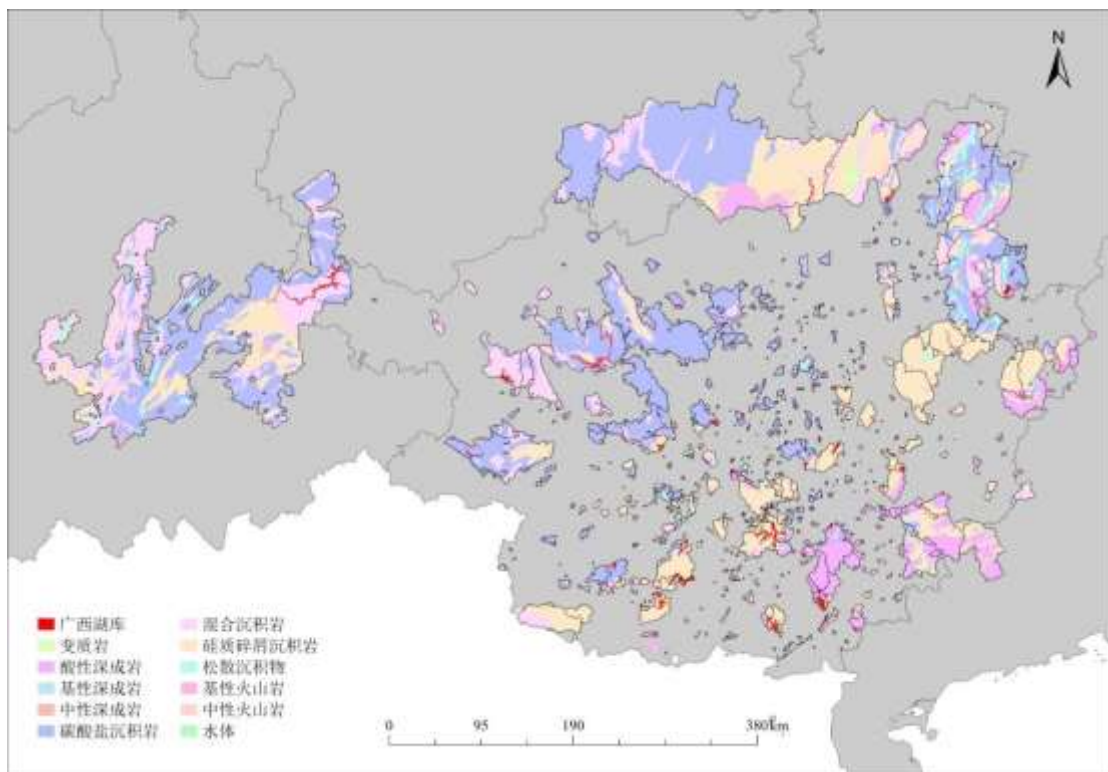


图4 广西湖库集水区岩性分布图

Fig.4 Lithology distribution Map of Lake and Reservoir Catchment Areas in Guangxi

3 讨论

3.1 岩溶湖库分布格局的成因

3.1.1 地质岩性对岩溶湖库分布的影响 广西的岩溶湖库主要集中分布于中部、西北、西南及东北地区(图 5A)。西北、西南部为云贵高原边缘过渡带, 岑王老山、凤凰山、金钟山、都阳山等山体受强烈河流切割后形成峰丛洼地地貌。封闭或半封闭洼地中, 地表径流汇聚易形成天然湖泊; 而部分洼地经人工筑坝后则转化为岩溶水库, 构成高密度蓄水区。桂东北峰林平原则受漓江等河流的侧向溶蚀作用影响, 发育串珠状洼地, 为龟石水库、青狮潭水库等的形成提供了地形基础。南部和中部地区以平原与盆地为主, 由十万大山、云开大山、大容山等山系分隔, 平坦地势与地下河网络交织, 使溶蚀洼地更易连片发育, 形成以大龙洞水库为代表的串联型蓄水系统(图 5A,C)^[29]。

从地质岩性背景来看, 广西广泛分布的泥盆系至三叠系厚层碳酸盐岩为岩溶作用提供了充足的物质基础。在亚热带季风气候的长期作用下, 雨热共促的化学风化与溶蚀过程加速了碳酸盐岩的溶解, 形成洼地、地下河及溶洞系统, 为天然湖泊的发育提供了物质与空间条件。构造活动进一步塑造了岩溶格局: 桂西北的河池断裂带、桂西南的右江断裂带及桂东北的桂林弧形构造带等区域, 断裂与褶皱作用加速了岩石破碎与溶蚀, 断裂交汇处形成的断陷盆地成为封闭型湖泊的理想发育部位^[30-31]。此外, 新构造运动的间歇性抬升引发河流下切与地下河顶板塌陷, 进一步促成洼地或天坑湖盆的形成(图 5A,B)。

相比之下, 岩溶水库的形成受人类工程决策和地质适宜性的共同制约。坝址选址通常避开强岩溶发育区, 倾向选择岩体完整、渗漏风险低的硅质碎屑岩、变质岩及部分弱岩溶带。这些低渗透致密型地层具备较高的基岩强度和工程稳定性, 是人工蓄水的理想地质基础。构造凹陷区因具备良好的集水条件和构造盆地形态, 也成为水库选址的重要地貌单元(图 5A,B,D)。此类工程性选址与天然湖泊形成机制存在本质差异。

3.1.2 人类聚落与水库分布的相互影响 人类聚落密度与经济活动强度对广西不同区域的水库分布格局产生了深刻影响(图 6)。其中, 南宁—柳州—桂林城市群与桂西北典型岩溶区的差异最为显著。在城市群区域, 人口与经济高度集聚, 强烈的用水需求驱动了水库建设。因此, 该区域水库呈现高密度分布 (2.8 个/100 km²), 明显高于桂西北岩溶区 (0.7 个/100 km²)。然而, 在库容规模方面却呈现相反趋势: 岩溶区水库的平均容量 (41.73 mcm) 显著大于城市群 (非岩溶区) 水库 (21.5 mcm)。这一对比揭示出双重驱动机制: 一方面, 人口密集和经济活动活跃促进了城市群小型水库的大量建设, 以满足生活和生产的多元化用水需求; 另一方面, 典型的岩溶地貌决定了岩溶区水库数量虽少, 但单体规模往往较大。这一发现与申诗嘉等^[15]对广东省的研究一致, 即高人口密度区水库多而小, 而岩溶区则少而大。

在广西北部、西部和西南部等岩溶区, 人口密度较低、经济发展水平有限, 水库分布相对稀疏。但這些水库在区域水资源调控与生态保障中作用突出。它们通过蓄集雨季径流, 涵养生态基流, 保障枯水期水源稳定, 为山区农业提供持续灌溉水源, 并承担防洪减灾的重要职能。Shen 等^[32]的研究进一步印证了这一价值, 指出此类水库建成后可显著提升区域水资源保障能力, 其农业灌溉保障率可达 80%。

3.2 基于随机森林模型识别岩溶湖库形成的主控因子

随机森林是一种集成学习方法, 通过构建多个决策树并整合它们的预测结果, 提高模型的准确性^[33]。根据前文的研究, 本文从高渗透可溶型 (碳酸盐沉积岩、混合沉积岩、松散沉积物)、低渗透致密型 (硅质碎屑沉积岩、变质岩、酸性深成岩、中性深成岩、基性深成岩、中性火山岩、基性火山岩)、地形地貌 (水体面积、集水面积、坡度)、气候 (年降雨量)、人类活动 (人口密度、建筑密度) 五个方向, 通过 MDA 法计算变量重要性, 模型准确率均高于 65%。

3.2.1 岩溶湖泊形成的主控因子 图 7 显示, 年均降水量、碳酸盐岩沉积岩、低渗透致密型岩石和高渗透可溶型岩石在岩溶湖泊形成中具有最高的重要性, 分别为 28.94%、28.32%、26.67%和 22.91%, 表明气候与岩性是岩溶湖泊形成的核心控制因子。

首先, 高渗透可溶型岩石为岩溶湖泊的发育提供了物质基础。碳酸盐岩具备良好的溶蚀性和渗透性, 易在地下形成空腔、溶洞与塌陷洼地, 是封闭性集水洼盆及湖盆发育的关键地质前提^[16]。在长期水-岩相互作用作用下, 可溶岩区的地表和地下径流系统逐渐演化为连通的溶蚀网络, 为湖泊蓄水提供空间条件。相对而言, 低渗透致密型岩石的重要性亦较高, 显示其对岩溶系统发育具有显著的制约作用。此类岩石难以被溶蚀, 常形成岩溶带边界或阻水层, 在地表或浅层地下形成局部的汇水区与封闭洼地, 有利于地表径流的滞留与湖水的稳定存在。两者共同构成了“可溶—不可溶”岩性耦合的岩溶洼地结构体系: 前者提供空腔与渗透通道, 后者形成约束与封闭条件。

其次, 地形地貌因子在岩溶湖泊的形成与演化中发挥重要调节作用。坡度和集水区面积的重要性分别为 16.42%和 15.14%, 说明地形不仅影响地表径流汇集效率, 也决定了洼地的封闭性和蓄水稳定性。缓坡及低洼地区更易形成径流滞留和地下水溢出带, 是湖泊形成的有利部位; 而较大的集水面积增强了地表径流汇入湖盆的能力, 维持湖泊的水量平衡与长期存在^[34]。

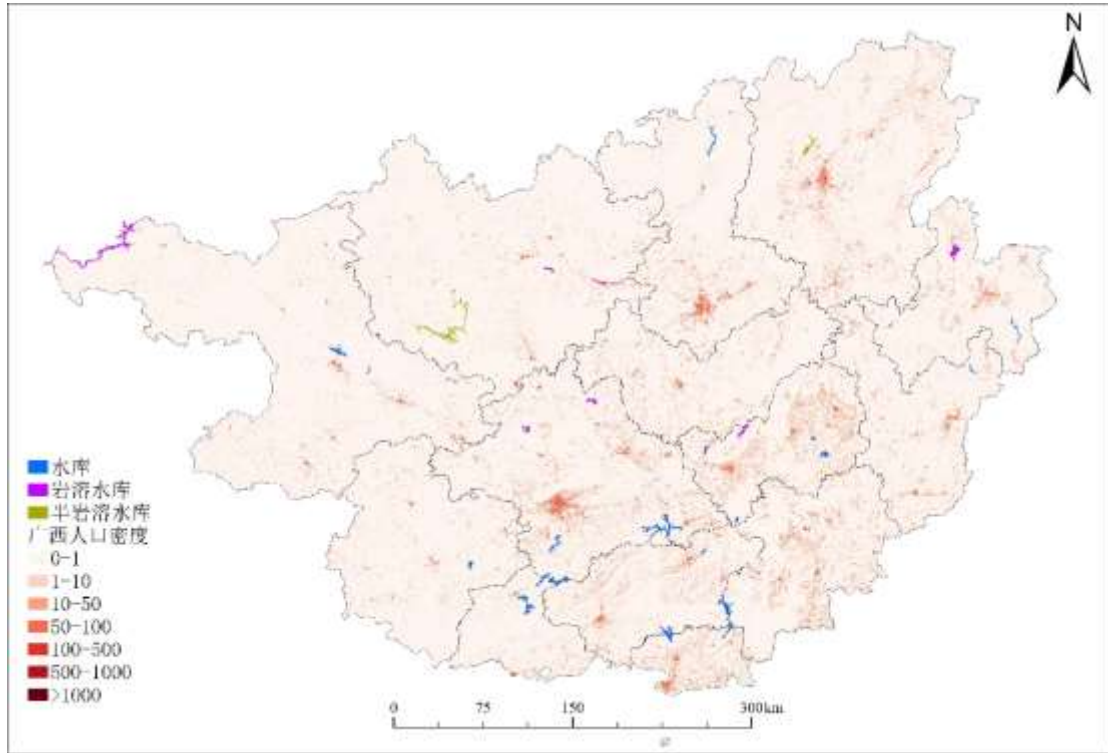


图6 广西人口密度图

Fig. 6 Population Density Map of Guangxi

气候因素同样是岩溶湖泊形成的重要驱动。年均降水量的重要性接近 29%，位列首位。广西属亚热带湿润气候，丰富的降水为碳酸盐岩溶蚀提供了充足的水源和溶质载体。强烈的季风降雨不仅加速了岩溶作用和塌陷洼地的形成，也在丰水期促进地下空腔的扩展和地表径流汇集。降雨的时空分布差异进一步决定了湖泊水量的季节性波动与演化速率。

最后，人类活动因子在岩溶湖泊形成中作用较弱，重要性仅为 9.93% 和 9.54%。天然岩溶湖泊主要受自然地质—气候过程控制，人类在此类地貌中的分布相对稀疏，工程干扰有限。因此，人类活动更多表现为后期景观利用与生态调节作用，对湖泊初始形成的贡献较小

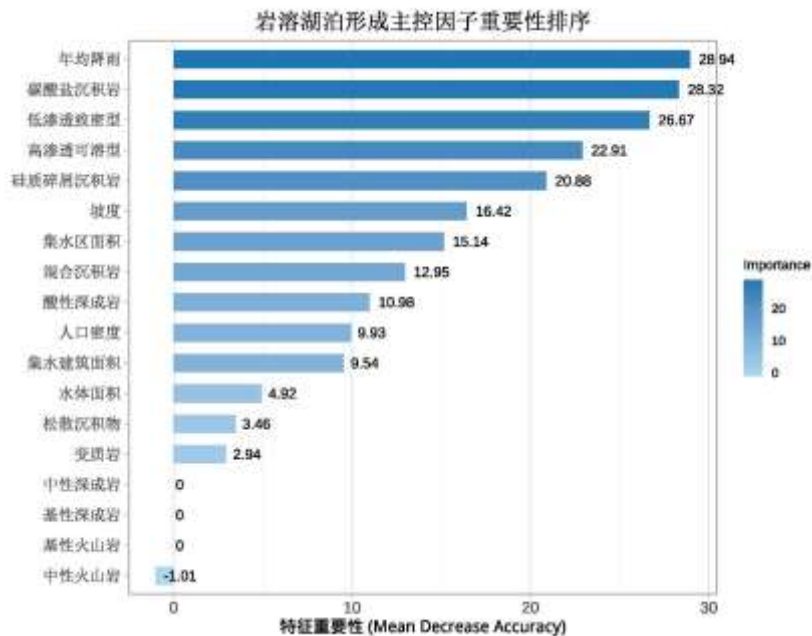


图7 岩溶湖泊随机森林模型特征变量相对重要性分析图

Fig.7 Analysis Diagram of the Relative Importance of Characteristic Variables in the Random Forest Model of Karst Lakes

3.2.2 岩溶水库形成的主控因子 图8显示,岩溶水库形成的主要控制因子依次为年均降水量(22.66%)、坡度(13.19%)、碳酸盐沉积岩(12.35%)以及多种基性与酸性岩类(约-11%-12%),表明气候与地形条件是岩溶区水库形成与选址的首要约束因素,而岩性条件则对坝址地质稳定性与集水能力具有重要影响。

首先,气候条件是岩溶水库形成的主导驱动。年均降水量(22.66%)的重要性最高,说明降雨是决定岩溶区水库分布与蓄水能力的关键因子。广西属亚热带湿润季风气候,降雨丰沛且时空分布集中,为库区提供了充足的水源补给。高降雨量不仅保证了流域汇水量和水库蓄水率,也影响坝址上游流域的补给强度与年际水量波动。在丰水期,强降雨加速地表径流汇入,利于库盆蓄水;而枯水期降雨偏少,则易导致库容下降^[35]。因此,降雨在岩溶区既是水库形成的外部动力,也是其长期运行稳定性的气候基础。

其次,地形地貌条件在岩溶水库选址与形成中具有显著调控作用。坡度的重要性达到13.19%,仅次于降雨。较缓的地形有利于坝址稳定与蓄水区形成,而陡坡区则不利于坝体建设及蓄水安全。岩溶区地形起伏大、切割深,选择坡度适中且下伏坚硬岩层的谷地作为坝址是岩溶水库建设的关键。地形不仅控制库区的蓄水形态和面积,也影响流域集水效率与水文汇流格局,是连接气候降雨与水库蓄水能力的重要地貌纽带。

高渗透可溶型岩石在岩溶水库形成中具有双重作用。碳酸盐岩的重要性为12.35%,表明其分布对坝址选址和渗漏风险具有显著影响。碳酸盐岩区虽然有利于溶蚀洼地和谷地的形成,为库区提供地形条件,但同时其高渗透性可能造成渗漏问题,需通过防渗处理加以控制。因此,在岩溶区修建水库时,碳酸盐岩既提供了空间形态上的有利地貌,又对工程地质稳定性提出更高要求。相反,低渗透致密型岩石在岩溶水库形成中扮演“阻水层”和“稳定基底”的角色。其重要性虽低于可溶岩,但在坝址区形成不透水基底,显著降低库底渗漏风险,并提高坝体稳定性。岩性组合的差异决定了不同地段的水工地质适宜性,低渗透岩体适合修建主坝或副坝,可溶岩区则多作为库盆扩展区或汇水区存在。

最后,人类活动因素在岩溶水库形成中权重较低(0.82%和1.38%),但其影响主要体现在工程决策与建设层面而非自然形成机制方面。岩溶区居民分布稀疏,水库修建多出于灌溉、防洪或供水需求,在岩溶区修建水库时,人类通过选址、坝体设计、防渗处理及地貌改造等工程措施,有效克服了碳酸盐岩区高渗透性带来的渗漏风险,并借助地形改造优化库区形态和蓄水效率。因此,人类活动在岩溶水库的形成过程中扮演关键推动者角色,不仅改变了原有径流路径与地貌结构,也通过工程调控主导了水库的最终形成与功能实现。

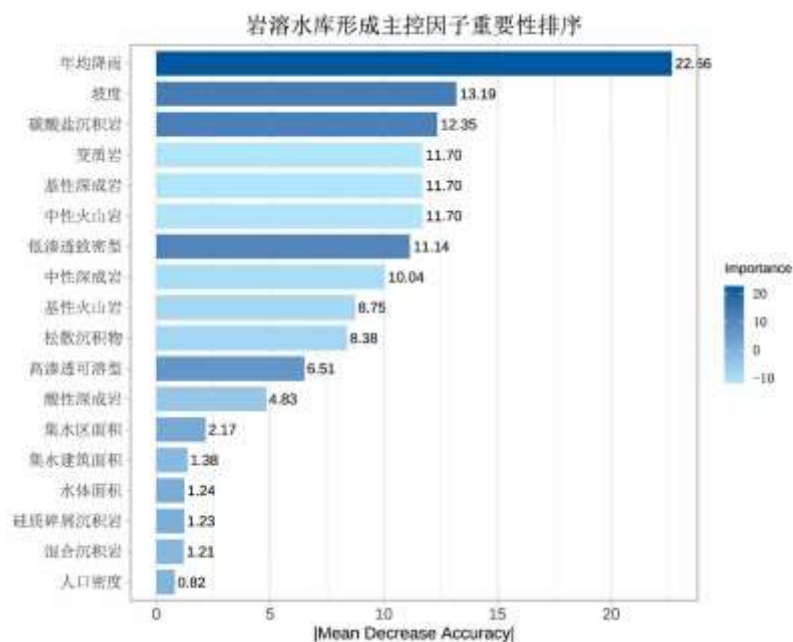


图8 岩溶水库随机森林模型特征变量相对重要性分析图

Fig.8 Analysis Diagram of the Relative Importance of Characteristic Variables in the Random Forest Model of Karst Reservoirs

3.3 不足与展望

本研究以广西典型岩溶区为核心,构建了区域尺度的岩溶湖库分布图谱,并结合多因子随机森林模型识别主控因子,揭示了岩性与降雨协同控制的形成机制,为理解喀斯特地区湖库格局的空间异质性提供了新的数据支撑与方法范式。然而,本研究仍存在一定局限性和改进空间。

在岩溶与非岩溶划分方法上,本文主要依据 Lake-Topo Cat 与 WOKAM 数据中碳酸盐岩地层在集水区的面积占比进行定量划分。该方法虽在宏观尺度上实现了统一标准与空间可比性,但存在一定的边界模糊问题。由于岩溶过程具有显著的地下潜伏性与非线性特征,部分区域的岩溶发育强度与地层可溶性并非严格对应,仅以岩性面积比例判定岩溶属性,可能低估了碎屑岩覆盖下隐伏岩溶区的范围,也可能高估了薄

层碳酸盐岩地区的岩溶发育程度。后续研究可引入如结合溶蚀洼地密度、地下河分布、碳酸盐岩厚度与地下水动态等多源地质与地貌指标构建综合判定体系,对岩溶发育强度进行加权评价;同时利用高分辨率DEM与InSAR地表形变监测结果,识别隐伏岩溶塌陷区,从而提高岩溶与非岩溶划分的科学性与精度。

从国际视角看,广西岩溶湖库的形成机制与空间格局兼具普遍性与区域特征。与东南亚中南半岛岩溶区相比,广西受多期构造抬升与强烈溶蚀作用影响,形成峰丛洼地与串珠状库群的复合格局,而东南亚地区多为开放型洼地和平缓溶蚀盆地,湖库以季节性淹没型为主,蓄水稳定性相对较低^[36]。与中欧喀斯特区相比,广西位于亚热带湿热气候带,降雨集中度更高、溶蚀速率更快,地表—地下水交换更频繁、碳循环更活跃,而中欧地区则以封闭洼地湖库为代表,水位波动受地下河充排水控制显著^[37]。由此可见,广西的“高降雨—强溶蚀—多断裂”的岩溶水系代表了全球湿热型岩溶系统的极端样式,其“岩性—降雨—地形”复合控制模式不仅可为理解东南亚湿热岩溶区的湖库演化提供借鉴,也为不同气候带下岩溶水文过程及碳汇功能研究提供对比参照。

最后,本研究揭示的“岩性—降雨双重控制机制”与“岩溶水库碳汇潜力”可进一步转化为水库选址地质适宜性评价、季节性水量调控及碳通量监测体系优化等具体管理策略,为岩溶区水资源保护、生态治理及高质量发展提供具有可操作性的科学支撑。

4 结论

本研究通过多源地理空间数据融合与随机森林模型,系统识别了广西岩溶与非岩溶湖库的空间分布格局,定量解析了其形态特征与主控因子。主要结论如下:

(1)广西788个湖库(>10ha)中,岩溶湖库占比最高(314个,40%),集中分布于桂中、桂西北、桂西南及桂东北的峰丛洼地、溶蚀盆地等岩溶强发育区;半岩溶湖库(27个)、弱岩溶湖库(15个)主要位于岩溶与非可溶岩地层的过渡带。

(2)广西岩溶湖库呈现“极值突出、均值偏小”的独特格局。单体最大面积(98.25 km²)和库容(10260 mcm)远超其他类型(半岩溶:13.19 km²/2610 mcm;弱岩溶:4.60 km²/4.60 mcm;非岩溶:66.54 km²/3000 mcm),但平均面积(1.07 km²)与中位库容(1.30 mcm)表明其主体为中小型水体。此外岩溶湖库形态较为复杂,岸线极值达554.97 km,显著高于其他类型,反映岩溶地貌对水体边界的高度塑形作用。

(3)分析结果表明,岩性渗透性差异是岩溶湖泊与岩溶水库形成背景差异的关键地质基础。在岩溶湖泊中,发育于碳酸盐岩、混合沉积岩及松散沉积物等高渗透可溶型区域的水体最为集中。这类岩石溶蚀性强、孔隙度高,易形成封闭洼地和地下径流通道,为湖泊的自然汇水与地下补给提供了地貌条件。相反,岩溶水库更倾向分布于硅质碎屑岩、变质岩及火山—深成岩类组成的低渗透致密型区域,其岩体完整性高、渗透性弱,更适宜建设坝体与人工蓄水工程。总体上,岩性不仅控制了溶蚀洼地和地下河系统的空间格局,也决定了天然湖泊与岩溶水库在形成机制上的差异:前者受自然地貌演化驱动,后者则以地质稳定性与集水条件的人工选址为主。

(4)基于随机森林模型的主控因子识别结果进一步表明,岩溶湖泊与岩溶水库在主导因子相似却也存在明显分化。对于岩溶湖泊而言,模型显示高渗透可溶型岩(重要性22.91%)、年均降雨量(28.94%)及地形坡度(16.42%)是最主要的控制因子,反映出岩溶溶蚀、降雨入渗与封闭洼地地形之间的耦合作用。而在岩溶水库中,降雨(22.66%)依然是最重要的驱动项,其次为坡度(13.19%),反映出水库的分布与蓄水条件主要由流域补给能力与坝址地貌控制。人类活动因素在岩溶水库形成中权重虽然较低(0.82%和1.38%),但其影响主要体现在工程决策与建设层面。降水量与坡度在两类系统中均具有重要作用,但在岩溶湖泊中主要调节溶蚀速率与地下补给强度,在岩溶水库中则主要控制地表径流汇水效率。由此可见,岩溶湖泊与岩溶水库虽同处岩溶环境,但分别受“自然演化驱动”与“工程选址调控”的双重机制控制,其主控因子及作用路径存在显著差异。

5 参考文献

- [1] Frankignoulle M, Abril G, Borges A, et al. Carbon dioxide emission from European estuaries. *Science*, 1998, 282(5388): 434-436. DOI: 10.1126/science.282.5388.434
- [2] Larson C. An Unsung Carbon Sink. *Science*, 2011, 334, 886-887. DOI:10.1126/science.334.6058.886-b.
- [3] Li J, Pu J, Sun P, et al. Summer Greenhouse gases exchange flux across water-air interface in three water reservoirs located in different geologic setting in Guangxi, China. *Environmental Science*, 2015, 36(11): 4032-4042. DOI:10.13227/j.hjkk.2015.11.012. [李建鸿,蒲俊兵,孙平安,等.不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究.环境科学,2015,36(11):4032-4042.]
- [4] Yuan D. Carbon Cycle and Global Karst. *Quaternary Sciences*, 1993, (01):1-6. DOI: 10.3321/j.issn:1001-7410.2001.03.004. [袁道先.地球系统的碳循环和资源环境效应.第四纪研究,2001,(03):223-232.]
- [5] [张陶.漓江典型断面水气界面CO₂交换的通量、变化及控制机[学位论文].重庆:西南大学,2018.
- [6] 高亚婷.水库型旅游景区空间分布特征及其影响因素[学位论文].昆明:云南大学,2022.
- [7] Zhao Y, Wu B F, Zeng Y. Spatial and temporal patterns of greenhouse gas emissions from Three Gorges Reservoir of China.

- Biogeosciences*, 2013, 10(2): 1219-1230. DOI: 10.5194/bg-10-1219-2013.
- [8] Yuan D. Carbon Cycle and Global Karst. *Quaternary Sciences*, 1993, (01):1-6. DOI: 10.3321/j.issn:1001-7410.1993.01.001. [袁道先. 碳循环与全球岩溶. 第四纪研究, 1993, (01):1-6.]
- [9] Jiang Z, Yuan D. CO₂ source-sink in karst processes in karst areas of China. *Episodes Journal of International Geoscience*, 1999, 22(1): 33-35. DOI: 10.18814/epiiugs/1999/v22i1/005
- [10] White W B. Carbon fluxes in Karst aquifers: Sources, sinks, and the effect of storm flow. *Acta Carsologica*, 2013, 42(2-3). DOI:10.3986/ac.v42i2-3.659
- [11] Li Z, Wang S, Bai X, et al. Estimation of carbonate rock weathering-related carbon sink in global major river basins. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(07):1319-1332. DOI: 10.11821/dlx201907004. [李朝君, 王世杰, 白晓永, 等. 全球主要河流域碳酸盐岩风化碳汇评估. 地理学报, 2019, 74(07):1319-1332.]
- [12] Lehner B, Liermann C R, Revenga C, et al. Global reservoir and dam (grand) database. *Technical Documentation, Version*, 2011, 1(1): 1-14.
- [13] Sikder M S, Wang J, Allen G H, et al. Lake-TopoCat: a global lake drainage topology and catchment database. *Earth System Science Data Discussions*, 2023, 2023: 1-42. DOI: 10.5194/essd-15-3483-2023.
- [14] Ma R, Yang G, Duan H, et al. China's lakes at present: Number, area and spatial distribution. *Science China Earth Sciences*, 2011, 41(03):394-401. DOI: 10.1360/zd-2011-41-3-394. [马荣华, 杨桂山, 段洪涛等. 中国湖泊的数量, 面积与空间分布. 中国科学:地球科学, 2011, 41(3): 394-401.]
- [15] 申诗嘉, 张旭辉, 袁明道等. 广东省水库空间分布特征研究. 广东水利水电, 2023, (12):15-20.
- [16] Ford D, Williams P D. Karst hydrogeology and geomorphology. *Hoboken: John Wiley & Sons*, 2007.
- [17] White W B, White E L. Correlation of contemporary karst landforms with paleokarst landforms: the problem of scale. *Carbonates and evaporites*, 1995, 10(2): 131-137.
- [18] Zeng C, Liu Z, Yang J, et al. A groundwater conceptual model and karst-related carbon sink for a glacierized alpine karst aquifer, Southwestern China. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 120-133. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.07.027.
- [19] Zhang Y, Jin X, Song Y, et al. Study on the benefits of different soil and water conservation measures in hillside citrus orchards in karst rocky desertification area of northern Guangxi Zhuang Autonomous Region. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(4): 248-259. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.020. [张宇, 金鑫, 宋颖, 等. 桂北岩溶石漠化区山坡橘园不同水土保持措施效益研究. 水利水电技术, 2025, 56(4):248-259.]
- [20] Chen Z, Auler A S, Bakalowicz M, et al. The World Karst Aquifer Mapping project: concept, mapping procedure and map of Europe. *Hydrogeology Journal*, 2017, 25(3): 771-785. DOI: 10.1007/s10040-016-1519-3.
- [21] Hartmann J, Moosdorf N. The new global lithological map database GLiM: A representation of rock properties at the Earth surface. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2012, 13(12). DOI: 10.1029/2012GC004370.
- [22] 彭守璋. 中国 1km 分辨率逐月降水量数据集 (1901—2020). 北京: 国家青藏高原科学数据中心, 2020. DOI: 10.5281/zenodo.3114194.
- [23] Tuccillo J V, Moehl J, Adams D, et al. LandScan HD: A High-Resolution Gridded Ambient Population Methodology for the World. 2025. DOI: 10.48690/1524248.
- [24] Schiavina M, Melchiorri M, Pesaresi M, et al. GHSL data package 2022. Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2022.
- [25] Ma Z, Cai D, Jiang Z. About Karst Wetland Classification System. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2009, 27(2):101-106. DOI: CNKI:SUN:GXSF.0.2009-02-024 [马祖陆, 蔡德所, 蒋忠诚. 岩溶湿地分类系统研究. 广西师范大学学报 (自然科学版), 2009, 27(2):101-106.]
- [26] Rigatti S J. Random Forest. *Journal of insurance medicine*, 2017, 47(1): 31-39. DOI: 10.1007/978-1-4419-9326-7_5.
- [27] Zhu Z, Woodcock C E, Rogan J, et al. Assessment of spectral, polarimetric, temporal, and spatial dimensions for urban and peri-urban land cover classification using Landsat and SAR data. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 117: 72-82. DOI: 10.1016/j.rse.2011.07.020

- [28] Van Beijma S, Comber A, Lamb A. Random forest classification of salt marsh vegetation habitats using quad-polarimetric airborne SAR, elevation and optical RS data. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 149: 118-129. DOI: 10.1016/j.rse.2014.04.010
- [29] 吴玉霜.广西地形分布对前汛期暴雨的影响及其智能计算客观预报方法研究[学位论文].南宁: 南宁师范大学, 2019.
- [30] 广西地质矿产局. 广西壮族自治区区域地质志. 地质出版社, 1985.
- [31] 朱德浩, 邓自强, 吴应科, 广西通志·岩溶志. 南宁: 广西人民出版社, 2000.
- [32] Shen H, Huang Y, Tang Y, et al. Impact analysis of karst reservoir construction on the surrounding environment: a case study for the southwest of China. *Water*, 2019, 11(11): 2327. DOI: 10.3390/w11112327.
- [33] Schonlau M, Zou R Y. The random forest algorithm for statistical learning. *The Stata Journal*, 2020, 20(1): 3-29. DOI: 10.1177/1536867X20909688
- [34] Lv Y, Hu W, Yang Y. Research progress of hydrological cycle in karst critical zone. *Advances in Water Science*, 2019, 30(1):123-138. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2019.01.013. [吕玉香,胡伟,杨琰.岩溶关键带水循环过程研究进展.水科学进展, 2019, 30(1):123-138.]
- [35] Gu Z, Wei H, Quan X, Liu Z. Study on the effects of rainfall and slope on soil erosion in karst rocky mountain areas of northern Guangxi Zhuang Autonomous Region. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56 (3): 251-262. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.03.020. [顾展飞, 魏海龙, 全鑫, 等. 降雨和坡度对桂北岩溶石山地区水土流失的影响研究. 水利水电技术, 2025, 56(3): 251-262.]
- [36] Peng C, Qiu Y, Zhao N et al. A dataset of vector and coverage of river and lake surface water in Guangxi, Yunnan, Guizhou (China), and the ASEAN member states. *China Scientific Data*, 2024,9(2):3-16. DOI: 32001.14.11-6035.csd.2023. 0075.zh. [彭崇泰,邱玉宝,赵宁等. 中国广西、云南、贵州及东盟十国河流、湖库面域矢量及其覆盖率数据集. 中国科学数据, 2024, 9(2):3-16.]
- [37] Xanke J, Stevanović Z, Liesch T, et al. Flooding and flood water storage in karst systems of the Mediterranean region. *Hydrogeology Journal*, 2024, 32(6): 1587-1605. DOI: 10.1007/s10040-024-02811-0.