

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.08.010

王星晨, 杨平恒, 杨琰. 中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区的自然和人文地理特征对比 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(8): 95-111.

中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区的 自然和人文地理特征对比

王星晨, 杨平恒, 杨琰

西南大学 地理科学学院/自然资源部重庆金佛山岩溶生态环境野外科学观测研究站, 重庆 400715

摘要: 碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区的地理环境差异, 对资源分布和人类活动有着深远的影响. 基于中国裸露型碳酸盐岩分布、多源遥感数据和统计数据, 通过密度函数和分级统计, 分析中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区在自然和人文地理要素方面的差异. 研究表明: ① 中国裸露型碳酸盐岩面积为 139.68 万 km^2 , 主要集中于黔、渝、桂、藏、鄂、湘、滇等省级行政单位, 其中西南喀斯特地区为碳酸盐岩最大的连片分布区, 面积占比 37.5%. ② 在自然地理要素方面, 碳酸盐岩地区受亚热带山地气候影响, 水热条件良好, 年降雨量湿润区 ($>800\text{ mm}$) 为 38.7%, 年均气温高值区 ($15\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) 为 21.9%, 归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 较大, 高原山地分布广泛, 高海拔区 ($>4\ 000\text{ m}$) 为 32.8%; 非碳酸盐岩地区土壤条件相对较好, 稳定性较高, 区域地表河网密度偏大, 土壤水力侵蚀指数低值区 ($0\sim 2$) 占比 53.8%. ③ 在人文地理要素方面, 碳酸盐岩地区自古以来“易守难攻”的地势特点吸引人口迁入, 农耕文化历史悠久, 人口密度和传统村落密度较大; 非碳酸盐岩地区由于地理位置优势, 经济发展和基础设施建设相对完善, 道路密度和夜间灯光指数偏高. 该研究详细对比分析了中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区的自然地理和人文地理特点, 并揭示区域存在的挑战和潜力, 为可持续发展提供科学支持和决策依据.

关键词: 碳酸盐岩地区; 非碳酸盐岩地区; 空间分布; 自然地理; 人文地理; 对比分析

中图分类号: K901 文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2024)08-0095-17

Comparison of Natural and Human Geographical Features between Carbonate and Non-Carbonate Rock Regions in China

WANG Xingchen, YANG Pingheng, YANG Yan

School of Geographical Sciences, Southwest University/ Observation and Research Station of Chongqing Jinfo Mountain Karst Eco-Environments, Ministry of Natural Resources, Chongqing 400715, China

Abstract: The geographical disparity between carbonate and non-carbonate rock regions exerts a profound

收稿日期: 2023-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(42277048); 教育部人文社会科学研究规划基金项目(23YJZ780003).

作者简介: 王星晨, 硕士研究生, 主要从事岩溶学研究.

通信作者: 杨平恒, 博士, 教授.

influence on resource distribution and human activities. This paper utilizes density function analysis, multi-source remote sensing data, and statistical data to examine the disparities in physical and human geographical elements between carbonate and non-carbonate rock regions in China. The findings indicate that: ① The total area of exposed carbonate rocks in China is 1, 396, 800 km², primarily concentrated in Guizhou, Chongqing, Guangxi, Xizang, Hubei, Hunan, Yunnan provinces etc. Among them, the south-west karst region represents the largest contiguous distribution area of carbonate rocks accounting for 37.5%. ② In terms of physical geographical elements, the carbonate rock regions is influenced by sub-tropical mountain climate with favorable hydrothermal conditions. The humid areas with an annual rainfall (>800 mm) accounts for 38.7%, the average annual temperature high-value areas (15–20 °C) is 21.9%, and the high NDVI index, widely distributed plateau mountains and high altitude areas (>4 000 m) account for 32.8% of the region. The non-carbonate rock regions exhibits good soil conditions and higher stability along with a dense surface river network. The low soil hydraulic erosion index (0–2) area is 53.8%. ③ In terms of human geography elements, the “easy to defend and difficult to attack” terrain of the carbonate region attracted people to move in, a rich history of agricultural culture, and a high population density accompanied by traditional villages. On the other hand, due to geographic advantages, economic development, and infrastructure construction, the non-carbonate regions exhibit higher road density and night light index. In this paper, the characteristics of physical geography and human geography of carbonate and non-carbonate regions in China are analyzed in detail, and the challenges and potential of the regions are also revealed, so as to provide scientific support and decision-making basis for sustainable development.

Key words: carbonate rock regions; non-carbonate rock regions; spatial distribution; natural geography; human geography; comparative analysis

喀斯特是水对可溶性岩石(碳酸盐岩、硫酸盐岩和卤化物岩)的溶蚀作用所形成的地表及地下各种现象的总称^[1]. 1988 年, 全球喀斯特地区总面积约为 2 200 万 km², 约占全球陆地面积的 15%^[2]. 2003 年, 中国含有喀斯特地层的国土面积有 344 万 km²^[3-4]. 其中, 碳酸盐岩型喀斯特在中国面积最大、分布最广^[5]. 碳酸盐岩地区地貌广阔、地形破碎、水土流失严重, 因其特殊的地质环境背景、地表—地下“二元”水文结构导致水文过程变化迅速, 水土资源空间分布不均, 被学术界界定为世界上主要的生态环境脆弱地区之一^[6-7]. 人口的增长和资源压力的不断增加, 降雨、人口密度的不均匀性等问题加重了区域的石漠化进程^[8-9], 也带来季节性干旱与洪涝以及各种地质灾害频发等挑战^[10-11], 区域的治理和可持续发展需求越来越高^[12-14]. 国际地圈—生物圈计划(International Geosphere-Biosphere Program, IGBP)等国际合作研究揭示了碳酸盐岩的脆弱性, 其容量类似于荒漠边缘, 抗干扰能力差, 稳定性低, 是具有特殊的物质、能量、结构和功能, 且变异敏感度高的脆弱区域^[15-16].

近年来, 基于喀斯特特征分析的研究日益增多^[17-18]. 喀斯特地区在气候、地形与地貌、岩性与土壤、植被等各方面与非喀斯特地区存在明显差异^[19-20]. 碳酸盐岩作为喀斯特地貌发育的物质基础^[21], 也是地球上最主要的碳库, 对全球碳循环和生命的演化起着决定性的作用^[22], 同时, 碳酸盐岩具有可溶性大、风化成土的速度缓慢和蓄水能力差等特点, 碳酸盐岩地区的石漠化治理对生态文明建设有至关重要的作用^[23]. Goldscheider 等^[24]对世界岩溶含水层图进行了统计评估, 详细阐述了全球碳酸盐岩产状及其在不同地形、气候和人口环境下的分布情况. 由于碳酸盐岩地质构造复杂, 地区资源开发仍面临诸多挑战. 宋林华^[25]详细介绍了中国碳酸盐岩地貌的特征、分类、形成机制和演化过程, 并探讨了其对资源环境开发的影响. 王跃跃等^[26]利用 Landsat 8 影像数据, 结合碳酸盐岩岩性图等地质资料, 对黔南地区碳酸盐岩空间分布特征进行分析. 上述研究有大尺度(区域尺度)、中尺度(地方尺度)和小尺度(地点), 结合多要素对碳酸盐岩地区进行特征分析. 在前人研究的基础上, 本研究分析中国碳酸盐岩的分布面积及其分布特征, 以多源遥感

数据等资料为基础, 进行碳酸盐岩与非碳酸盐岩区域的自然和人文地理特征对比研究, 以期加深对碳酸盐岩地区的特点、挑战和潜力的全面了解, 为可持续发展提供科学支持和决策依据, 也为区域生态环境保护与石漠化治理提供参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

中国疆域辽阔, 陆地面积约 960 万 km^2 , 大陆海岸线超 1.8 万 km 。中国作为世界文明古国之一, 文化源远流长, 民族众多^[27], 拥有丰富多彩的地貌类型, 包括黄土地貌、丹霞地貌、雅丹地貌和喀斯特地貌等^[28]。生态环境多样且独特, 土壤类型、植被分布和生物多样性与其他地区存在差异, 自然环境复杂多样, 生物多样性丰富^[29]。生态文明建设不断加强, 全国耕地面积达 12 758 万 hm^2 ^[30]。2023 年, 国内经济呈高质量发展扎实推进态势, 生产总值同比增长 5.2%, 粮食总产量同比增长 1.3%, 工业增加值同比增长 4.6%, 服务业增加值同比增长 5.8%^[31]。

中国是世界上碳酸盐岩分布最广泛的国家之一, 全国各地有着丰富的碳酸盐岩资源和独特的地质特征。碳酸盐岩地区分布广泛, 涵盖了西南地区的云贵高原、四川盆地、贵州盆地, 以及北方的陕西、内蒙古等地。其中, 西南喀斯特地区是世界上最大的连片裸露碳酸盐岩分布区, 包括以云贵高原为中心的贵州、广西、重庆、云南、四川、湖南、湖北、广东 8 省(直辖市、自治区)^[32]。

1.2 数据来源及研究方法

1.2.1 数据来源

碳酸盐岩分布数据来自地质云(<https://geocloud.cgs.gov.cn/>); 中国行政区边界矢量数据、河网水系数据、地形数据、NDVI 数据、夜间灯光数据、温度和降雨数据均来自资源环境科学数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/Default.aspx>); 人口数据来源于世界人口网站(<https://www.worldpop.org/>); 道路数据来自 OSM 全国矢量数据(<https://www.openhistoricalmap.org/>); 传统村落数据和土壤侵蚀数据来自全球变化数据仓储电子杂志(<http://www.geodoi.ac.cn/WebCn/NewsInfo.aspx?ID=79>)。

1.2.2 研究方法

区域内自然、经济、社会等要素间是相互联系的。对比碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区的自然地理要素(年降水量、海拔、平均气温、NDVI 值、土壤水力侵蚀指数和河网密度)差异, 有助于了解由于自然条件的制约, 不同区域呈现的差异性。而通过人文地理要素(人口密度、夜间灯光指数、道路密度和传统村落密度)对比, 有助于全面了解区域发展状况, 为决策提供科学的依据和参考。

综合分析碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区的特点, 融合多源数据, 利用 ArcGIS 进行空间分析(提取、重分类和统计分析), 得到年降水量等数据分级图。基于道路密度、河网密度公式, 通过属性表连接计算, 分别得到研究区道路和河网密度图。本研究对 3 个数据集的传统村落点整合后进行核密度分析, 得到中国传统村落密度图。

道路密度是在一定区域内所有道路的长度之和与该地区总面积的比值, 是评价城市道路网是否合理和便利程度的基本指标之一, 可以衡量道路路网的发展规模^[33]。其计算公式为:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{S} \quad (1)$$

式中: n 为区域内道路总数; l_i 为每条道路的长度; S 为研究范围的总面积; A 为区域范围内的道路密度。

河网密度是单位流域面积内的河流总长度, 表示一个地区河网的疏密程度。随气候(主要是降水和蒸发)、地质、地貌、土壤和植被而变化^[34]。其计算公式为:

$$D = \frac{L}{F} \quad (2)$$

式中: D 为河网密度(km/km^2); L 为河流总长度(km); F 为流域面积(km^2)。

核密度分析可以判断已知点在指定范围内的密度贡献值,与中心点间距越小,密度越大,能直观地反映出离散测量值在区域内的分布情况^[35].其计算公式为^[36]:

$$f_{n'}(x)=\frac{1}{n'h}\sum_{i=1}^{n'}k\left(\frac{x-x_i}{h}\right)$$

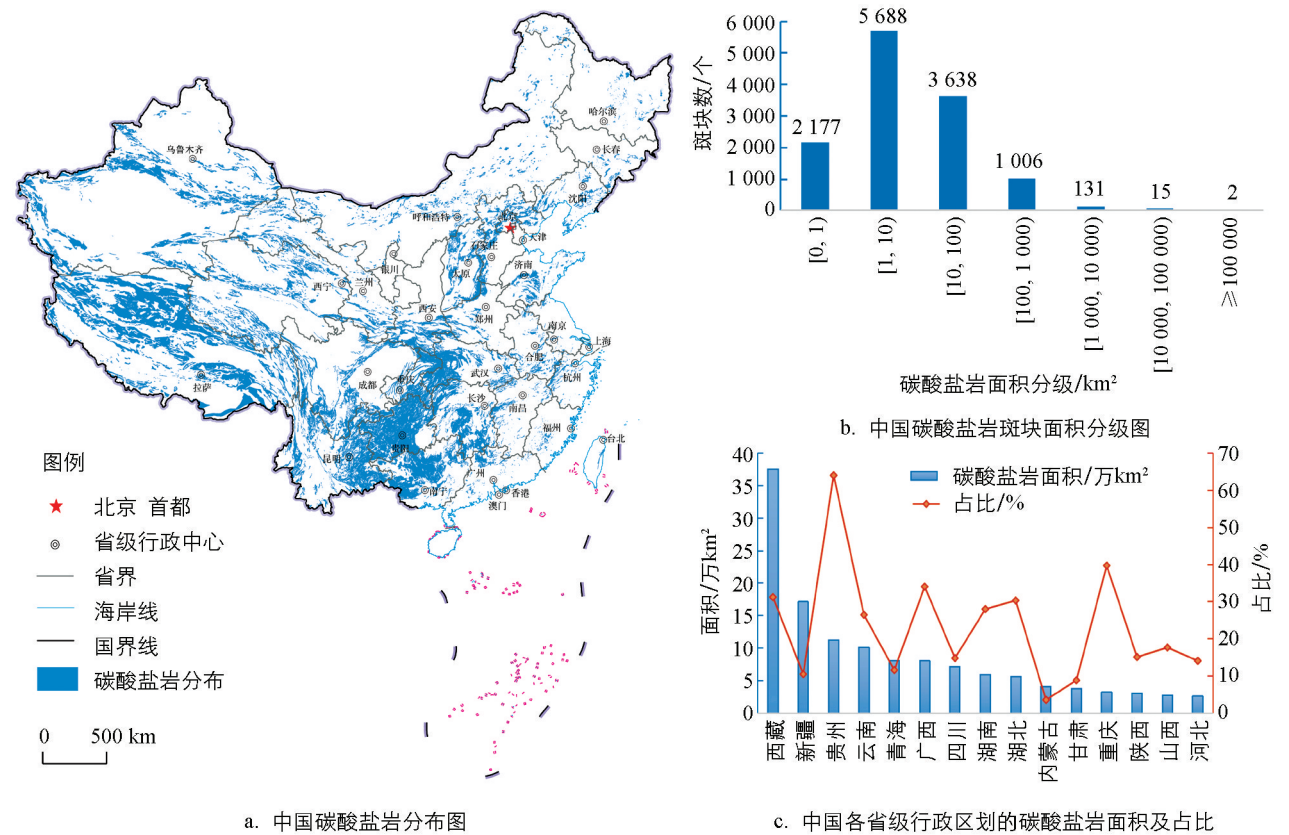
(3)

式中: $f_{n'}(x)$ 为核密度函数; $k\left(\frac{x-x_i}{h}\right)$ 为核函数; n' 为已知点数量; h 为带宽; $x-x_i$ 为栅格中心点到已知点的距离.

2 结果与分析

2.1 中国碳酸盐岩的分布

中国碳酸盐岩斑块面积分级情况如图 1 所示,碳酸盐岩斑块总数约 12 657 个,出露面积约 139.68 万 km².其中,大部分斑块面积不超过 1 000 km²,最小斑块面积约 8 m²,最大斑块面积超过 15 万 km²,平均斑块面积约 110 km².总体呈现出斑块面积小而多,大斑块主要集中于西藏和西南地区的特征.从碳酸盐岩地理分布情况来看,除上海、香港、澳门外,在其他各省份均有分布,主要位于西藏(37.5 万 km²)、新疆(17 万 km²)、贵州(11 万 km²)、云南(10 万 km²)、青海(8.1 万 km²)、广西(8 万 km²)、四川(7 万 km²)、湖南(5.9 万 km²)、湖北(5.6 万 km²)、内蒙古(4 万 km²)、甘肃(3.8 万 km²)、重庆(3.3 万 km²),其主要分布特征为:西藏、新疆碳酸盐岩分布广,西南地区碳酸盐岩连片分布且集中,东北地区碳酸盐岩零星分布.



该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2023)2763 号的标准地图制作,底图无修改.

图 1 中国碳酸盐岩分布图

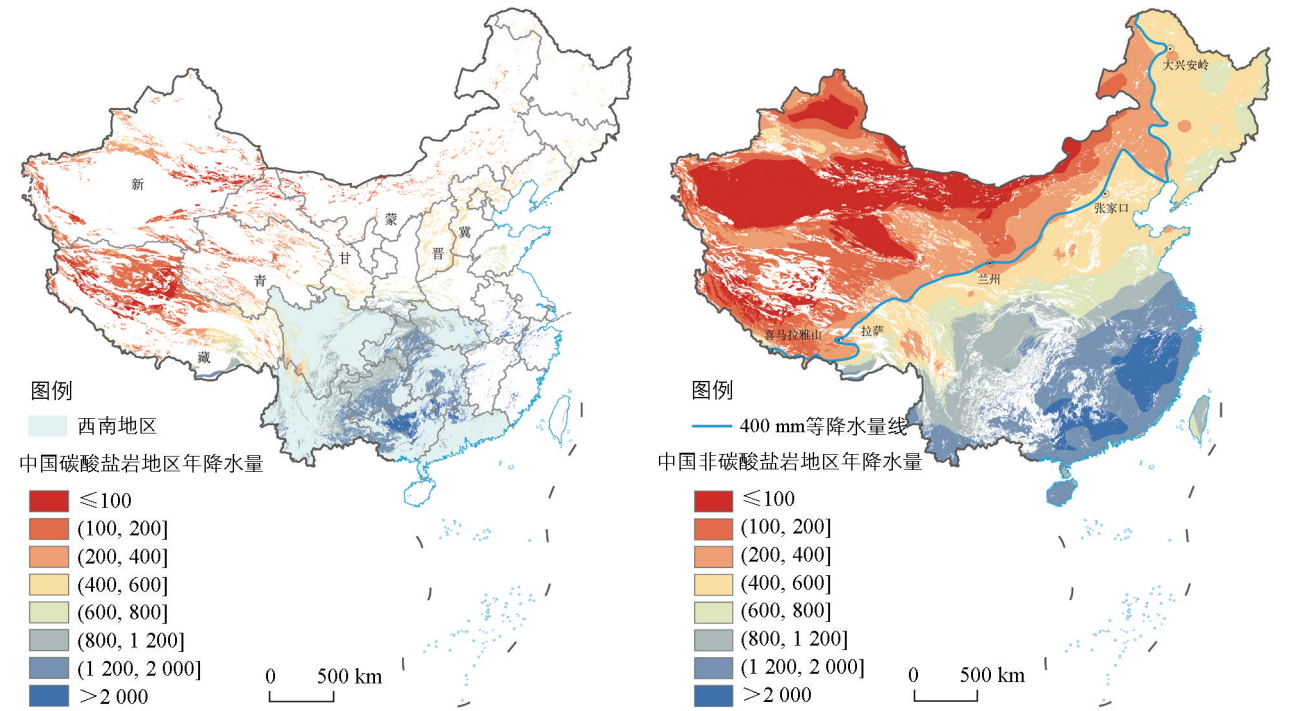
从碳酸盐岩出露面积占各省级行政区划面积比例情况来看,碳酸盐岩主要集中在黔、渝、桂,西南喀斯特地区作为碳酸盐岩最大连片分布区,占比约 37.5%.黔、渝、桂、藏和鄂地区碳酸盐岩出露面积占比超过 30%,分别为 64.0%,39.7%,34.1%,31.2%,30.3%;湘和滇的比例分别为 28.0%和 26.5%;晋、

陕、川、冀、青和新的比例超过 10%，分别为 17.7%，15.1%，14.8%，14.1%，11.6%，10.5%；其余地区比例不足 10%，宁的碳酸盐岩出露面积比例最小，仅约 0.02%。

2.2 中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区自然地理要素对比分析

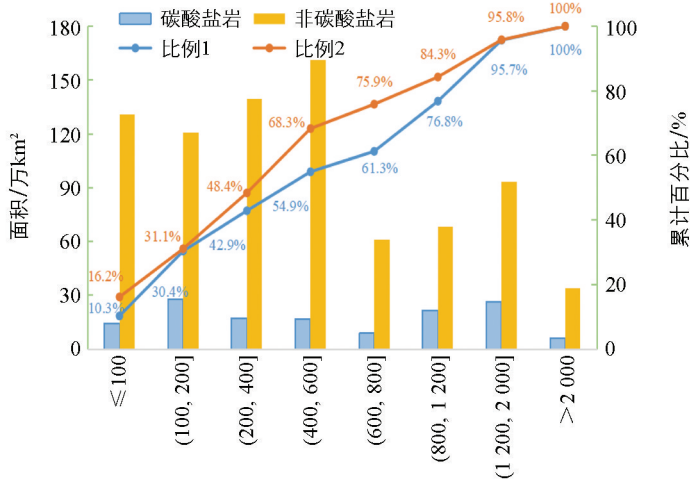
2.2.1 年降水量对比分析

降水是极为活跃的一项气象因子，是水循环过程的重要输入，在自然界的物质循环、能量流动和信息传递等方面起着举足轻重的作用^[37]。中国年降水量自东南沿海向西北内陆逐渐减少，主要受 3 种因素影响：一是夏季风影响强的地区降水多，夏季风影响弱或影响不到的地区降水少；二是地理位置距离海洋近的地区降水多，内陆则降水少；三是受到山地阻隔，迎风坡降水多，背风坡降水少^[38]。中国碳酸盐岩和非碳酸盐岩地区年降水量如图 2 所示。



a. 中国碳酸盐岩地区年降水量分布图

b. 中国非碳酸盐岩地区年降水量分布图



c. 中国碳酸盐岩与中国非碳酸盐岩地区年降水量分布图

该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2023)2763 号的标准地图制作，底图无修改。

图 2 中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区年降水量对比图

在碳酸盐岩地区中,西南地区年降水量主要为 800~1 200,1 200~2 000,>2 000 mm,降水量大;甘、晋西北、冀北等地年降水量主要为 400~600 mm 和 600~800 mm,降水量较大;青、蒙等地年降水量主要为 200~400 mm,降水量较小;而西藏和新疆等地年降水量主要为 100~200 mm 和 <100 mm,降水量极小.非碳酸盐岩地区沿海等地的降水量极大,降水由东南沿海往西北内陆方向逐渐减少,新疆等地的年降水量极小.将中国碳酸盐岩和非碳酸盐岩地区的年降水量进行对比分析,碳酸盐岩地区年降水量分布呈现东多西少的特征,年降水量为 100~200,800~1 200,1 200~2 000 mm,占碳酸盐岩地区总面积的 20.1%,15.5%,18.9%,年降水量>800 mm(湿润区)的面积较大,占比 38.7%,主要集中在降水丰富的西南地区;非碳酸盐岩地区年降水量呈现明显的分级特征,年降水量>800 mm(湿润区)、400~800 mm(半湿润区)、200~400 mm(半干旱区)和 200 mm(干旱区),分别占非碳酸盐岩地区总面积的 24.1%,27.5%,17.3%,31.1%.

从累计百分比角度分析,碳酸盐岩地区在各级年降水量等级的累计占比均小于非碳酸盐岩地区(>2 000 mm 除外),即碳酸盐岩地区的干旱区面积占比偏小,而湿润区面积占比偏大.碳酸盐岩地区的湿润区占比高于非碳酸盐岩地区,主要是由于碳酸盐岩连片分布在西南地区,区域降水量大;而碳酸盐岩地区的半湿润区占比低于非碳酸盐岩地区,因非碳酸盐岩地区的大兴安岭—张家口—兰州—拉萨—喜马拉雅山东南端一线(大致在 400 mm 等降水量线)以东面积辽阔,降水量较为充足;碳酸盐岩地区和非碳酸盐岩地区的干旱区占比相差不大,因西北地区夏季风很难到达,所以降水量很小.

2.2.2 海拔对比分析

中国基本地形类型可划分为 5 类,平原、丘陵、山地、高原和盆地,盆地无具体海拔要求.进一步细分,平原地形海拔<200 m;丘陵地形海拔<500 m,按起伏度分为低丘陵和高丘陵;山地地形海拔>500 m,分为高山、中山和低山;高原地形海拔>1 000 m^[39].

中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区海拔如图 3 所示.桂、粤北、湘南、鄂东和鲁中等碳酸盐岩地区海拔为 0~200 m 和 200~500 m,地势起伏较小,整体较为平缓;冀北、黔北区域海拔为 500~800 m 和 800~1 000 m,海拔仍较低;滇东、川南、晋西和蒙等区域海拔为 1 000~2 500 m,地势起伏较大,面积较大;甘区域海拔为 2 500~4 000 m,地势较高;藏、青、新等区域海拔>4 000 m,起伏度很大.将中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区的海拔进行对比分析,碳酸盐岩地区海拔主要为 1 000~2 500 m 和>4 000 m,各占碳酸盐岩区总面积的 28.0%和 32.8%.按海拔指标分级:<1 000 m 属于低海拔、1 000~2 500 m 属于中海拔、2 500~4 000 m 属于亚高海拔、>4 000 m 属于高海拔,碳酸盐岩地区在这 4 个海拔区域的占比分别为 27.6%,28.0%,11.6%,32.8%.非碳酸盐岩地区的低、中、亚高和高海拔区域,分别占非碳酸盐岩地区总面积的 46.0%,27.7%,8.5%,17.8%,即碳酸盐岩地区的低海拔区域占比较小,其余海拔区域占比均大于非碳酸盐岩地区.

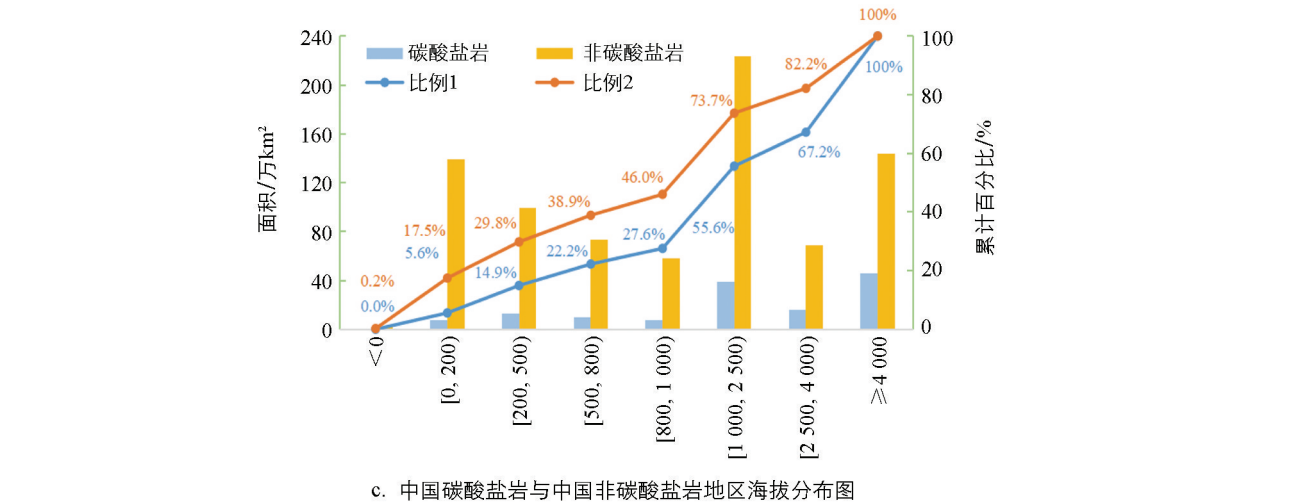
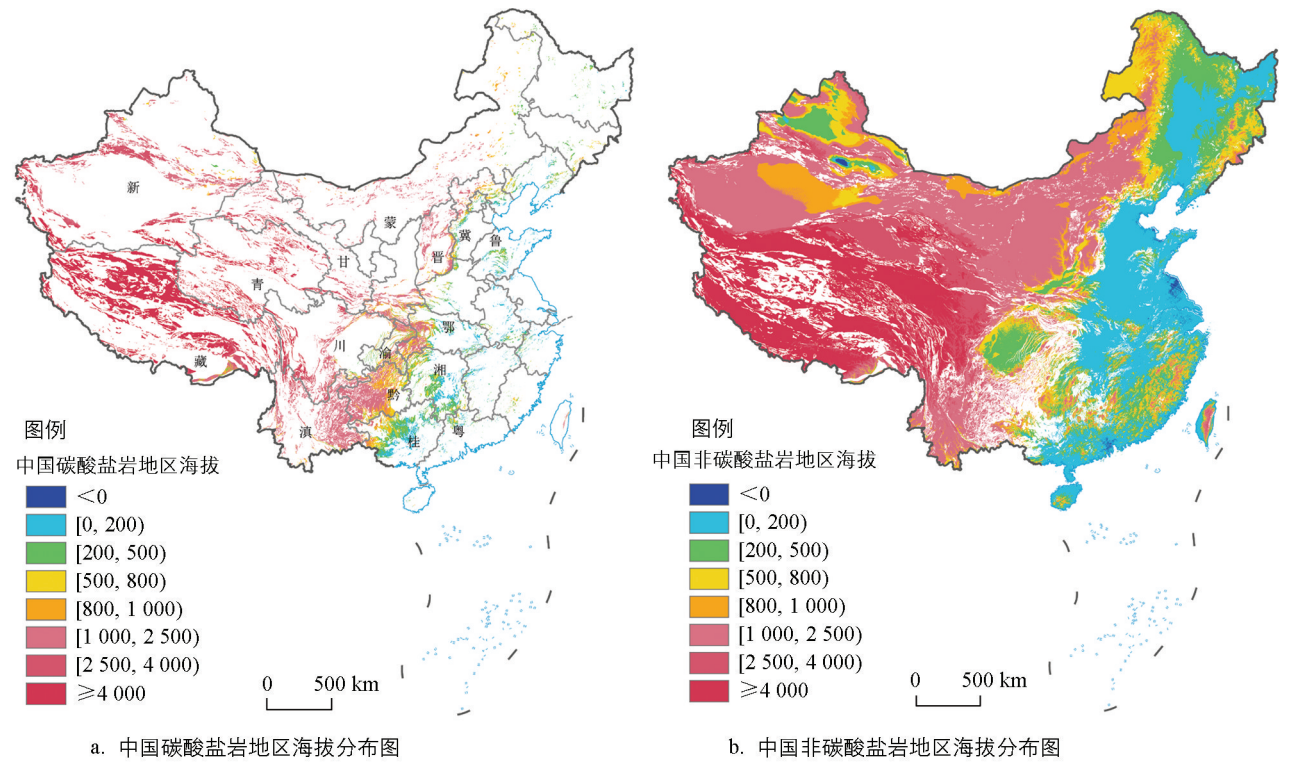
从累计百分比角度分析,碳酸盐岩地区在各级海拔的累计占比均小于非碳酸盐岩地区(>4 000 m 除外),即碳酸盐岩高海拔区域占比较大,海拔偏高.由于高原碳酸盐岩广泛分布于黔、云、藏地区,高山碳酸盐岩也多分布在川、云和藏等高海拔地区,因此碳酸盐岩区域海拔偏高.非碳酸盐岩地区呈阶梯状逐级下降的地势特点十分明显,丘陵、低山和平原在低海拔区域分布广阔,因此非碳酸盐岩区域海拔偏低.

2.2.3 年均气温对比分析

气温是反映气候变化最基本、最直接的因素之一,对人类的生产和生活具有非常重要的指导作用^[40].中国年平均气温图反映各地年均气温的分布状况,大致呈现出一些规律:一是气温南高北低,由南向北逐渐降低(其中,青藏高原地区年平均气温总体态势明显比同纬度地区低很多,主要是由于高海拔导致温度呈现出垂直地带性的分布规律;二是东部平原暖,受纬度影响显著,呈现出纬度地带分布规律^[41-42].

中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区年均气温如图 4 所示.在碳酸盐岩地区中,西南地区年平均气温高,

主要为 15~20 ℃ 和 >20 ℃; 冀北、晋西北、陕南和鲁中的年平均气温较高, 主要为 5~10 ℃, 10~15 ℃; 蒙、甘、青、新和藏的年平均气温偏低, 主要为 0~5 ℃, -5~0 ℃, -10~-5 ℃, -15~-10 ℃. 中国非碳酸盐岩地区除青藏高原、东北等地, 年平均气温较低, 南北年均气温差异大, 南方温暖. 将中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区的年平均气温进行对比分析, 碳酸盐岩地区年均气温主要在 -5~0 ℃, 0~5 ℃, 5~10 ℃, 10~15 ℃, 15~20 ℃ 这 5 个范围内, 各级面积占碳酸盐岩区总面积的 26.1%, 14.1%, 11.9%, 14.8%, 21.9%. 其中, 碳酸盐岩小部分地区年均气温 >20 ℃, 主要集中在黔、桂, 占比 5.9%; 西南地区 和北方地区年均气温为 10~20 ℃, 占比 36.7%; 大部分区域年均气温 <10 ℃, 主要位于面积辽阔的西部 地区, 占比 57.4%. 非碳酸盐岩地区年均气温为 >20 ℃, 10~20 ℃, <10 ℃, 分别占非碳酸盐岩地区总面 积的 4.7%, 28.6%, 66.7%.

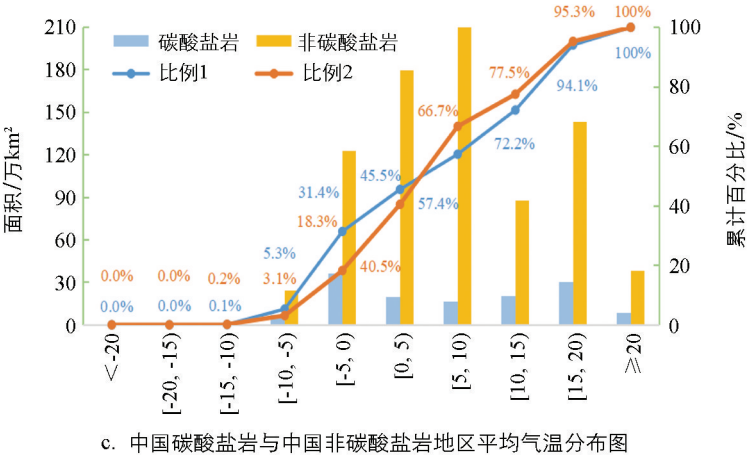
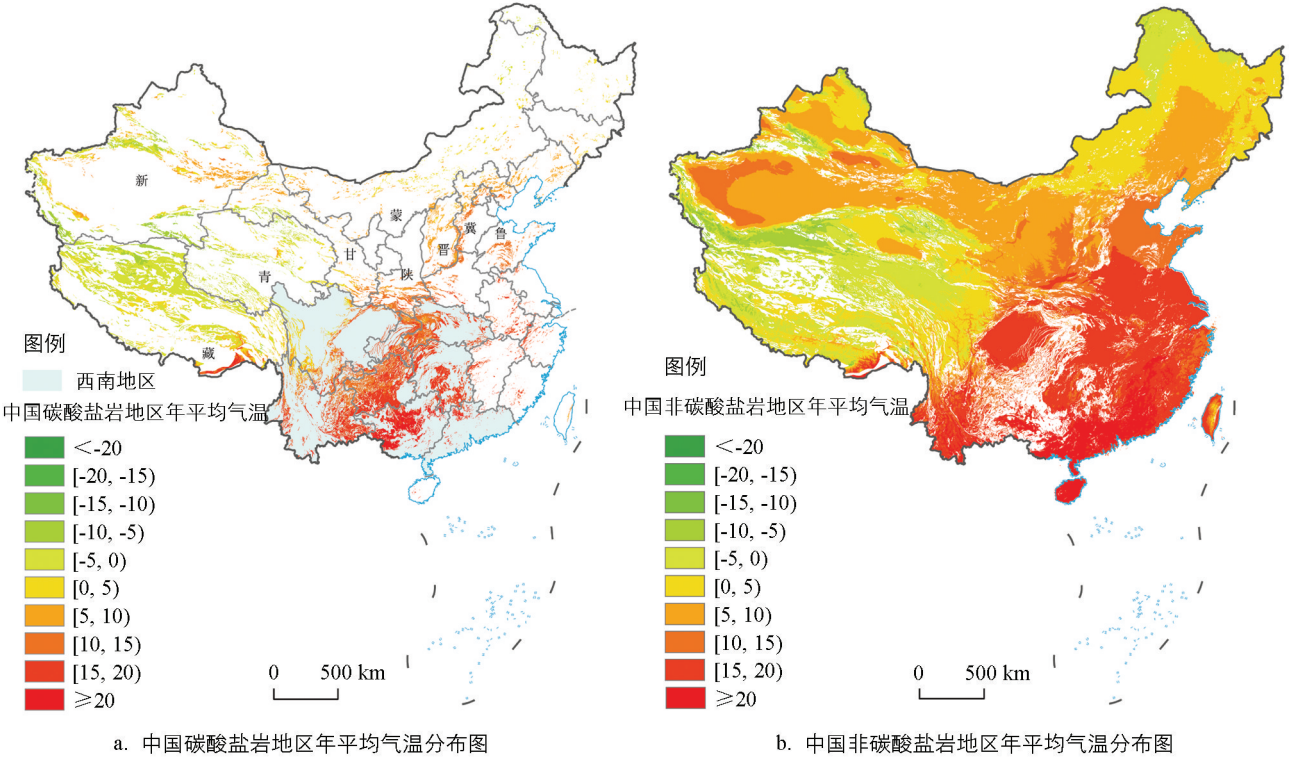


该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2023)2763 号的标准地图制作, 底图无修改.

图 3 中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区海拔对比图

从累计百分比角度分析, 碳酸盐岩地区年均气温在 10~15 ℃ 和 15~20 ℃ 的占比明显增加, 即碳酸盐

岩地区的面积占比明显大于非碳酸盐岩地区, 年均气温偏高。西部和北方的碳酸盐岩地区年均气温偏低, 而西南地区年均气温偏高, 促进碳酸盐岩发育。受亚热带山地气候特征的影响, 西南部和东部碳酸盐岩地区年均气温比非碳酸盐岩地区高, 受纬度和海拔的综合影响, 西部和北方地区年均气温偏低; 非碳酸盐岩地区主要受高原气候和纬度的影响, 年均气温相对偏低。



该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2023)2763 号的标准地图制作, 底图无修改。

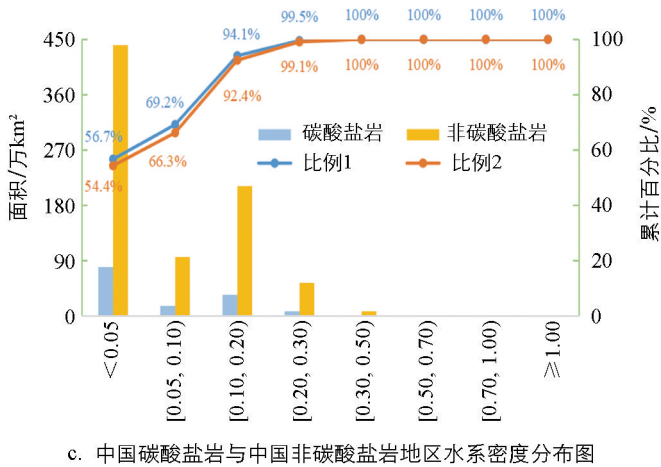
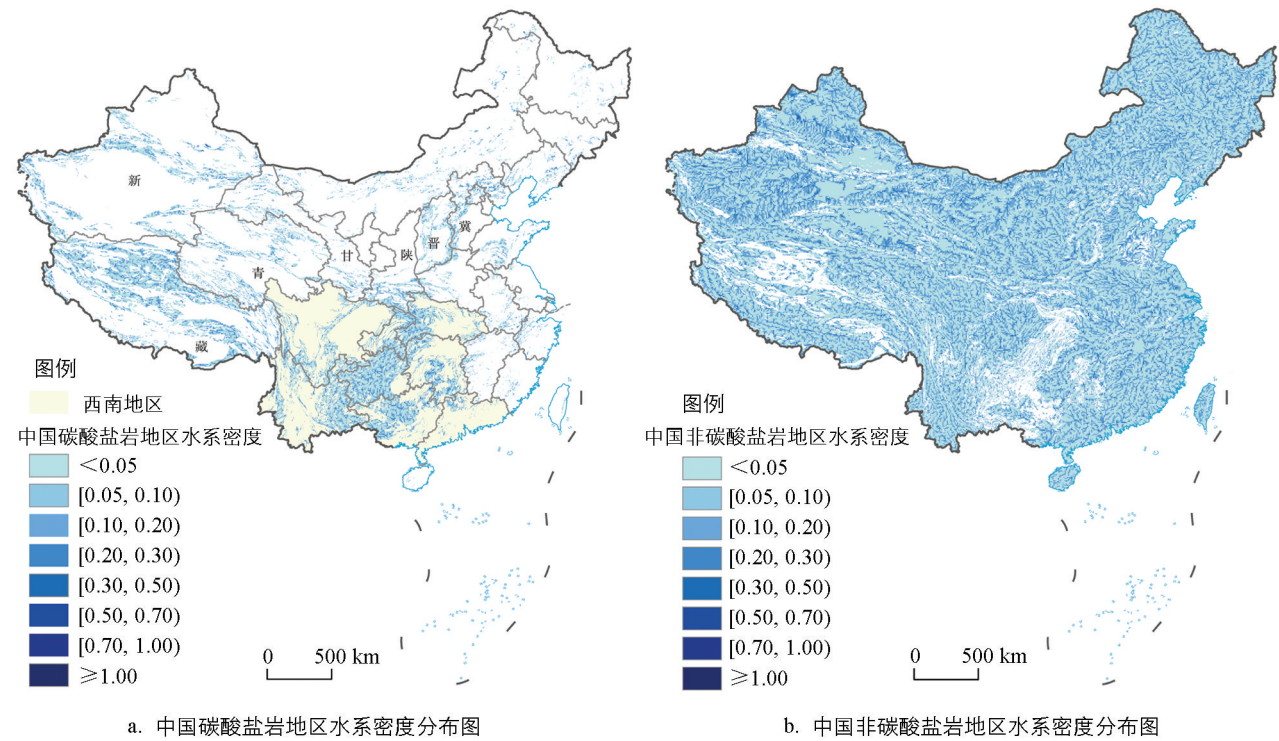
图 4 中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区年均气温对比图

2.2.4 水系密度对比分析

中国水系分布极不均匀, 河流众多而绵长, 河网密度总体趋势为南方大北方小, 东部大西部小^[43]。内流河主要分布于西北内陆区域, 河流少且小, 大部分为季节性河流。

中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区水系密度如图 5 所示。在碳酸盐岩地区中, 青、甘、晋、陕南和冀北水系密度 $<0.05\text{ km/km}^2$, 新、藏和西南地区的水系密度偏高, 主要为 $0.05\sim0.10\text{ km/km}^2$ 和 $0.10\sim0.20\text{ km/km}^2$ 。非碳酸盐岩地区水系密度呈现出东部和南部地区大, 西部和北部地区小的特征。将中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区的水系密度进行对比分析, 碳酸盐岩地区水系密度主要为 <0.05 , $0.05\sim0.10$,

0.10~0.20 km/km², 分别占碳酸盐岩地区总面积的 56.7%, 12.5%, 24.9%. 非碳酸盐岩地区水系密度主要也在上述 3 个范围内, 分别占非碳酸盐岩地区总面积的 54.4%, 11.9%, 26.2%.



该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2023)2763 号的标准地图制作, 底图无修改.

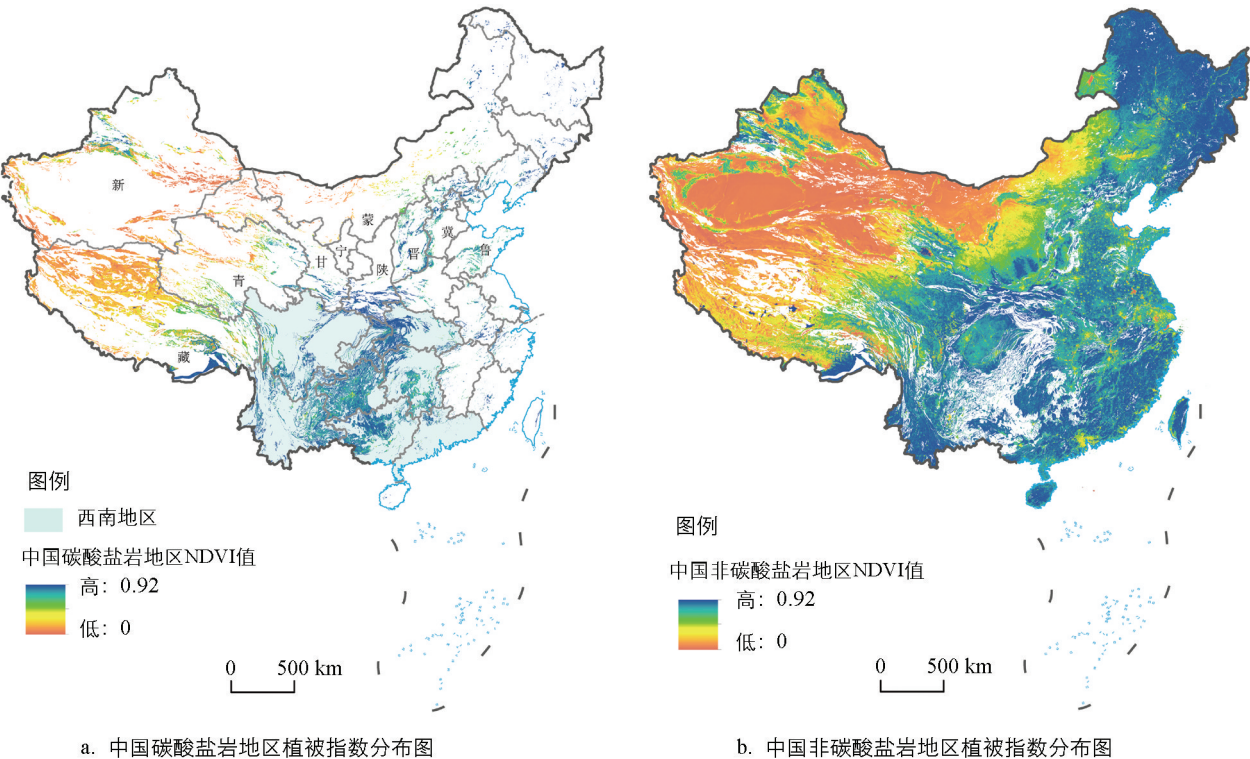
图 5 中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区水系密度对比图

从累计百分比角度分析, 碳酸盐岩地区水系密度 $<0.30\text{ km/km}^2$ 的累计占比均大于非碳酸盐岩地区, 即碳酸盐岩地区的水系密度偏小, 多为稀疏水系. 从水系结构分析, 碳酸盐岩地区地表水系网络形态多样, 但地区平均水系较长, 水系密度偏小, 反映出水系密度与岩性具有明显的相关性. 这主要和喀斯特特殊的水土流失方式——水土漏失有关, 地表水快速漏失至地下, 导致地表水资源匮乏. 非碳酸盐岩地区土壤稳定性高, 水土流失敏感性较小, 水系密度偏高.

2.2.5 NDVI 值对比分析

归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)是能够反映植被生长情况的重要参数, 也能实时地反映地表植被生长和发展的生物量指标变化, 可对植被进行有效监测^[44], 但植被季相变化对地表特征识别的影响也需纳入考虑^[45].

中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区 NDVI 值如图 6 所示。碳酸盐岩 NDVI 高值区域主要位于陕、鲁、晋、冀北和西南地区, 这些地区具有良好的水热条件, 表现出植被分布的空间特征和地域分异特征。碳酸盐岩 NDVI 低值区域主要位于蒙、甘、青、新和藏, 这主要是因为西部地区水土流失和沙化问题严重, 以及人类活动影响, 导致植被覆盖度低。非碳酸盐岩地区中东北的 NDVI 值较高, 即地表植被覆盖程度高且植被生长状况良好, 区域气候环境适宜。西部非碳酸盐岩地区 NDVI 值较低, 主要是因为这些地区干旱程度高, 不利于植被生长。



该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2023)2763 号的标准地图制作, 底图无修改。

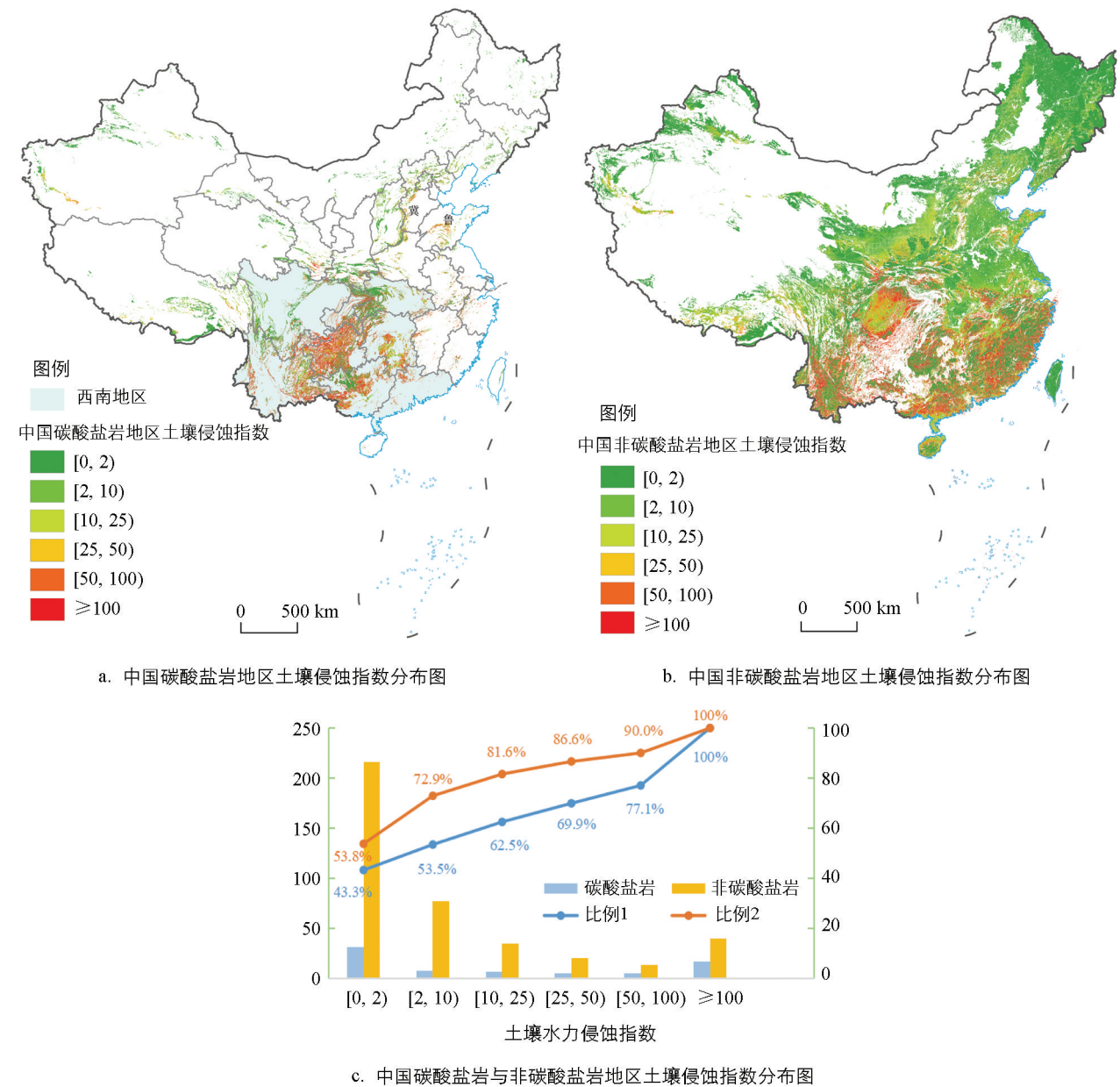
图 6 中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区 NDVI 值对比图

2.2.6 土壤水力侵蚀对比分析

土壤侵蚀按照侵蚀营力可分为水力侵蚀、风力侵蚀和重力侵蚀 3 种主要形式, 中国是土壤侵蚀最严重的国家之一^[46]。根据第 3 次水土流失普查, 中国年土壤流失量约 50 亿 t, 水蚀区平均侵蚀强度约为 3 800 t/(km² · a)^[47]。

中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区土壤水力侵蚀指数如图 7 所示。在碳酸盐岩地区中, 西南地区、鲁中和冀西土壤侵蚀程度较为严重, 土壤水力侵蚀指数偏大, 其余各地土壤水力侵蚀指数较小。非碳酸盐岩地区总体呈现南部地区土壤水力侵蚀指数大, 北部地区较小的特征。将中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区的土壤水力侵蚀指数(基于 RUSLE 模型)进行对比分析, 碳酸盐岩地区土壤水力侵蚀指数主要为 0~2 和 >100, 分别占碳酸盐岩区总面积的 43.3% 和 22.9%。其中, 部分地区土壤侵蚀指数 >100, 主要是西南地区, 占比约 22.9%。非碳酸盐岩地区土壤水力侵蚀指数主要为 0~2, 2~10, 10~25, >100, 分别占非碳酸盐岩地区总面积的 53.8%, 19.2%, 8.7%, 10%。

从累计百分比角度分析, 土壤水力侵蚀指数 >100 时, 碳酸盐岩地区的面积占比明显大于非碳酸盐岩地区, 土壤水力侵蚀指数偏大。碳酸盐岩部分地区水力侵蚀强度大, 主要表现在水土流失比例大的西南地区, 特别是四川盆地周边和云贵高原北部, 其余地区水土保持情况良好, 土壤水力侵蚀指数较小。非碳酸盐岩东北地区土壤母质层较厚, 土壤水力侵蚀程度较弱; 东南部丘陵区降水丰富, 坡度也较大, 人为干扰严重, 水力侵蚀剧烈区分布较广。



该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2023)2763 号的标准地图制作, 底图无修改.

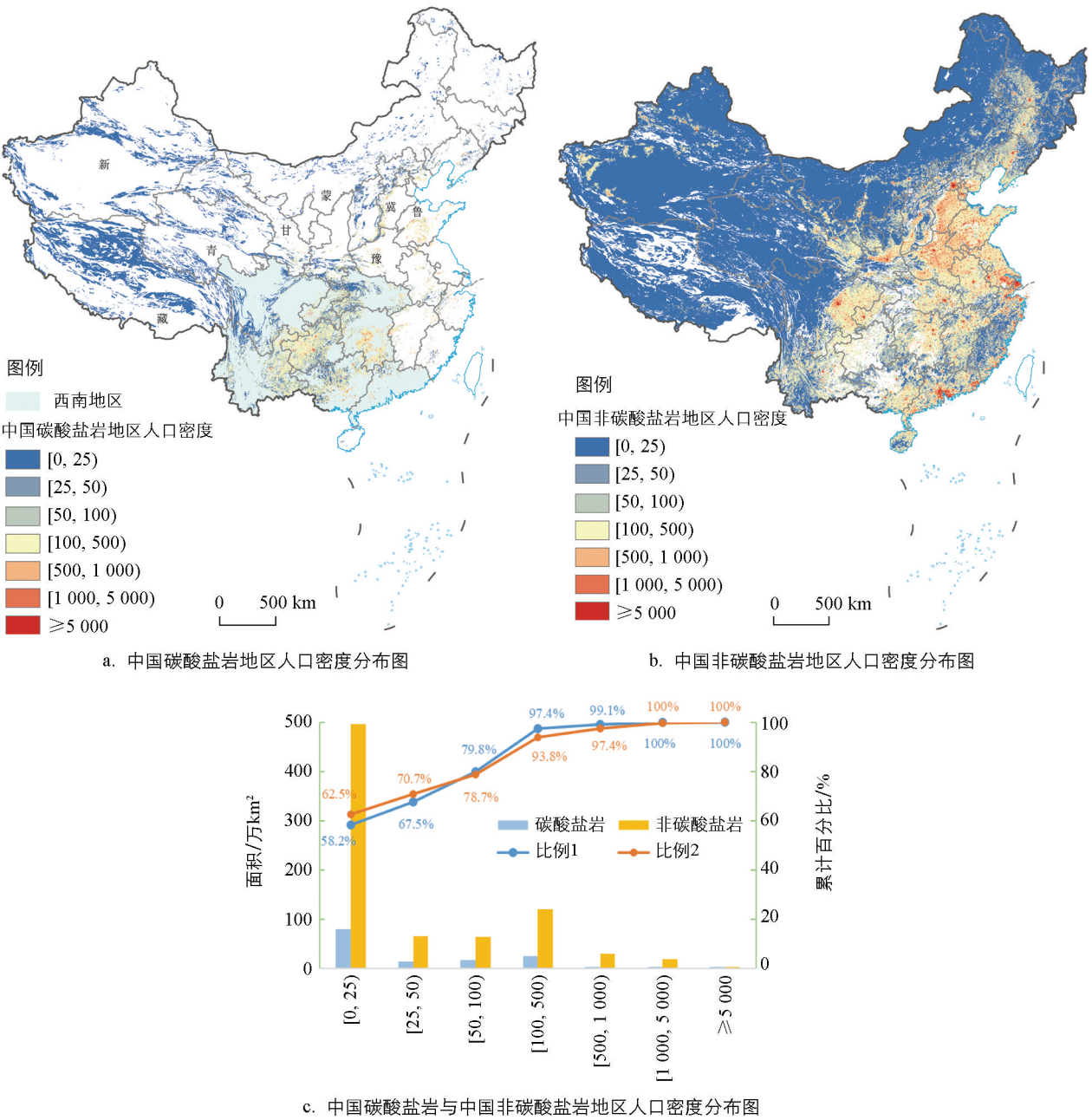
图 7 中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区土壤水力侵蚀对比图

2.3 区域人文地理要素研究

2.3.1 人口密度对比分析

中国人口基数大, 以中国人口地理界线(或称胡焕庸线)——黑河—腾冲一线为界, 线东面人口稠密, 线西面人口稀疏, 人口分布不均匀^[48]. 中国碳酸盐岩区域主要分布的西南山区人口较多, 其中少数民族类别众多, 区域人口密度分布呈现西北向东南递增的趋势^[49].

中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区人口密度如图 8 所示. 藏、新、青、甘和蒙等碳酸盐岩地区人口密度主要为 0~25 人/km² 和 25~50 人/km², 人口密度偏小; 冀北、鲁中、豫中和西南地区主要为 50~100 人/km² 和 100~500 人/km², 人口密度较大. 非碳酸盐岩地区, 东部沿海地区人口密度大, 中西部地区人口密度相对较小, 人口密度分布大致呈现出东高西低的特点. 将中国碳酸盐岩地区和非碳酸盐岩地区的人口密度进行对比分析, 碳酸盐岩地区人口密度主要为 0~25, 25~50, 50~100, 100~500 人/km², 分别占碳酸盐岩区总面积的 58.2%, 9.3%, 12.3%, 17.6%. 非碳酸盐岩地区人口密度主要也在如上范围内, 分别占非碳酸盐岩地区总面积的 62.5%, 8.2%, 8.0%, 15.1%.



该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2023)2763 号的标准地图制作，底图无修改。

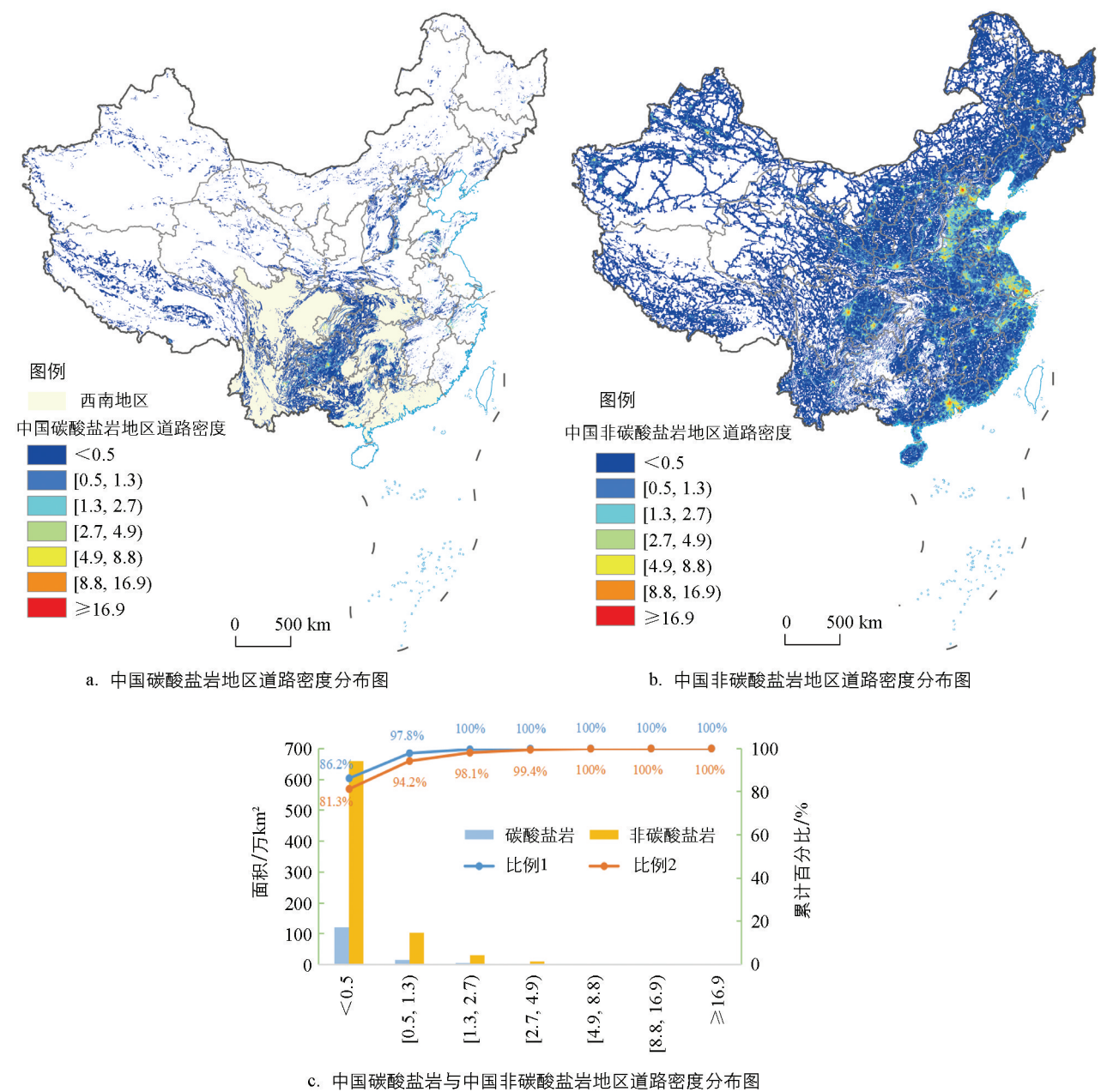
图 8 中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区人口密度对比图

从累计百分比角度分析，碳酸盐岩地区人口密度在 $50 \sim 100$ 人/ km^2 和 $100 \sim 500$ 人/ km^2 范围时占比明显增加，人口密度偏大。碳酸盐岩地区人口密度偏大，因为西南地区自古以来“易守难攻”的地势特点，吸引众多外来人口迁入，人口分布较集中；部分地区人口密度偏小，是由于区域面积辽阔，地理条件复杂，生产资料较为匮乏。非碳酸盐岩地区的人口密度东高西低，东部沿海地区人口分布集中，反映出城市发展水平较高，西部地区人口密度较小。

2.3.2 道路密度对比分析

道路是人们日常生活生产重要的地理要素，为交通规划、路径导航以及城市多尺度建模和制图综合等提供决策依据^[50]。2021 年，国家综合立体交通网主骨架实体线网里程 29 万 km 左右，国家高速铁路 5.6 万 km，普速铁路 7.1 万 km；国家高速公路 6.1 万 km，普速国道 7.2 万 km^[51]。道路网规模不断扩大，但总体道路密度仍较小^[52]。

中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区道路密度如图 9 所示。大部分碳酸盐岩地区的道路网密度较小, 主要为 $<0.5\text{ km/km}^2$; 鲁中、冀北、豫北和西南地区的道路密度偏大, 为 $0.5\sim1.3\text{ km/km}^2$ 。中国非碳酸盐岩地区东部道路密度普遍大于西部, 将中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区的道路密度进行对比分析, 碳酸盐岩地区道路密度主要为 $<0.5\text{ km/km}^2$ 和 $0.5\sim1.3\text{ km/km}^2$, 分别占碳酸盐岩区总面积的 86.2%和 11.6%。非碳酸盐岩地区道路密度主要也在如上范围内, 分别占非碳酸盐岩地区总面积的 81.3%和 12.9%。



该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2023)2763 号的标准地图制作, 底图无修改。

图 9 中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区道路密度对比图

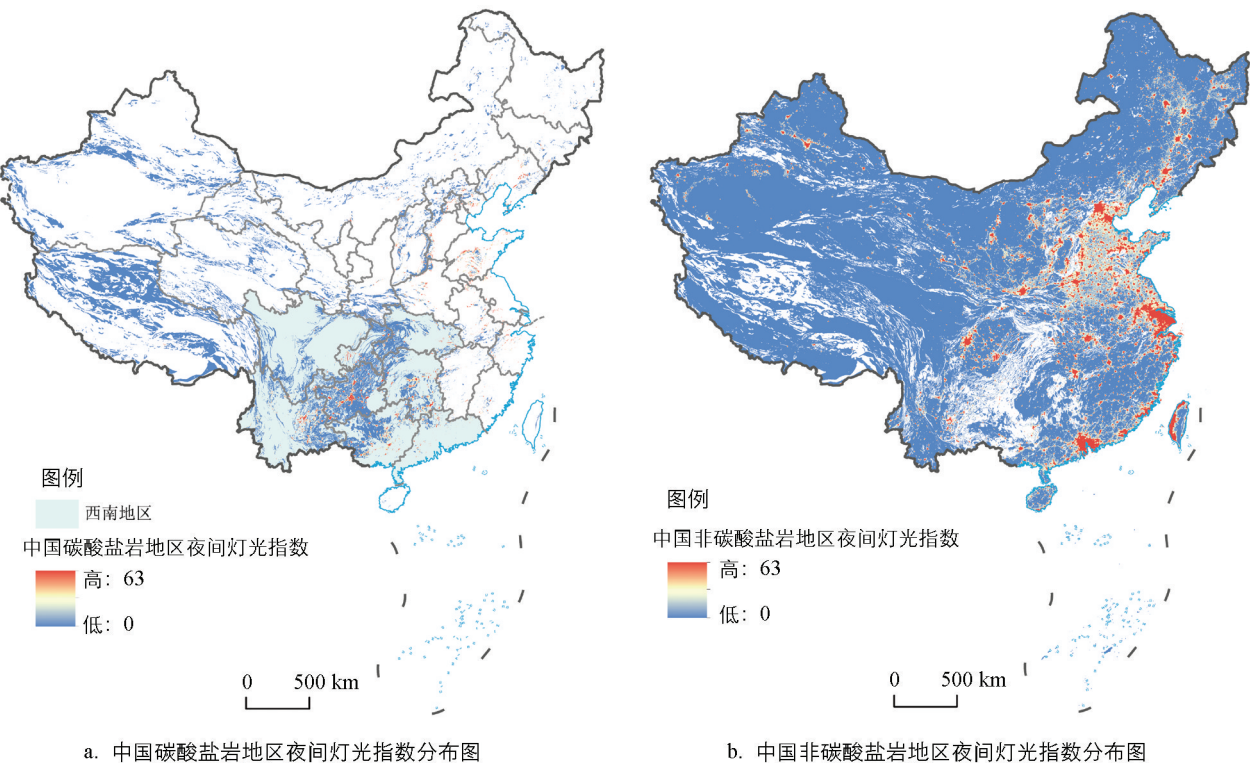
从累计百分比角度分析, 碳酸盐岩地区在各级道路密度等级的累计占比均大于非碳酸盐岩地区(4.9~8.8 km/km^2 除外), 即碳酸盐岩地区道路密度偏小, 而西南地区由于有民族政策支持, 交通电力等基础设施建设力度加大, 道路密度较大。大部分碳酸盐岩地区市政基础设施的建设相对薄弱, 城市建设相对落后, 受地貌条件复杂多变和人口密度因素影响, 道路网相对稀疏, 道路密度偏小, 还需进一步为城市道路设施

建设提供保障。而非碳酸盐岩地区城市交通基础设施建设相对完善,城市道路网通行效率和承载能力较高,道路密度较大。

2.3.3 夜间灯光指数对比分析

夜间灯光展示入夜后的城市灯火分布情况,也在一定程度上反映一座城市的发展水平和人类活动情况^[53]。中国近些年各产业发展迅速,经济发展水平得到很大提高。

中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区夜间灯光指数如图 10 所示。碳酸盐岩夜间灯光指数高值地区主要位于西南地区,表现出该地区城市发展水平较高。但大部分碳酸盐岩地区夜间灯光指数偏低,因西部内陆地区面积辽阔,人类活动频率较小,城市发展相对缓慢。非碳酸盐岩地区夜间灯光指数高值区域为东部沿海地区和北方城市群,这些地区地势较为平坦,城市群密集,人口集中分布反映出区域城市化水平高,但其西部内陆区域夜间灯光指数偏低。



该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2023)2763 号的标准地图制作,底图无修改。

图 10 中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区夜间灯光指数对比图

2.3.4 传统村落密度对比分析

中国传统村落,又名古村落,蕴藏着丰富的历史信息和文化景观,是中国农耕文明留下的最大遗产之一。根据国家住房和城乡建设部、文化和旅游部、财政部公布的传统村落名录,得到 5 批传统村落数据,共计 6 819 个空间分布点^[54]。

中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区传统村落密度如图 11 所示。碳酸盐岩传统村落密度高值地区,属西南地区的少数民族文化区最为集中,原因是在相对封闭且独立的地理环境中更有利于村落的形成与保存,其次是冀鲁豫交界集聚区以及部分皖南—浙西地区;而蒙、新、青、藏等地主要是游牧文化区,集中分布于农耕文化区的古村落数量较少,传统村落密度较小。非碳酸盐岩地区西部和北部古村落呈零星分布态势,传统村落密度较小;滇西北地区、中原文化区、黔东南地区以及皖南—浙西地区传统村落分布密度极大。

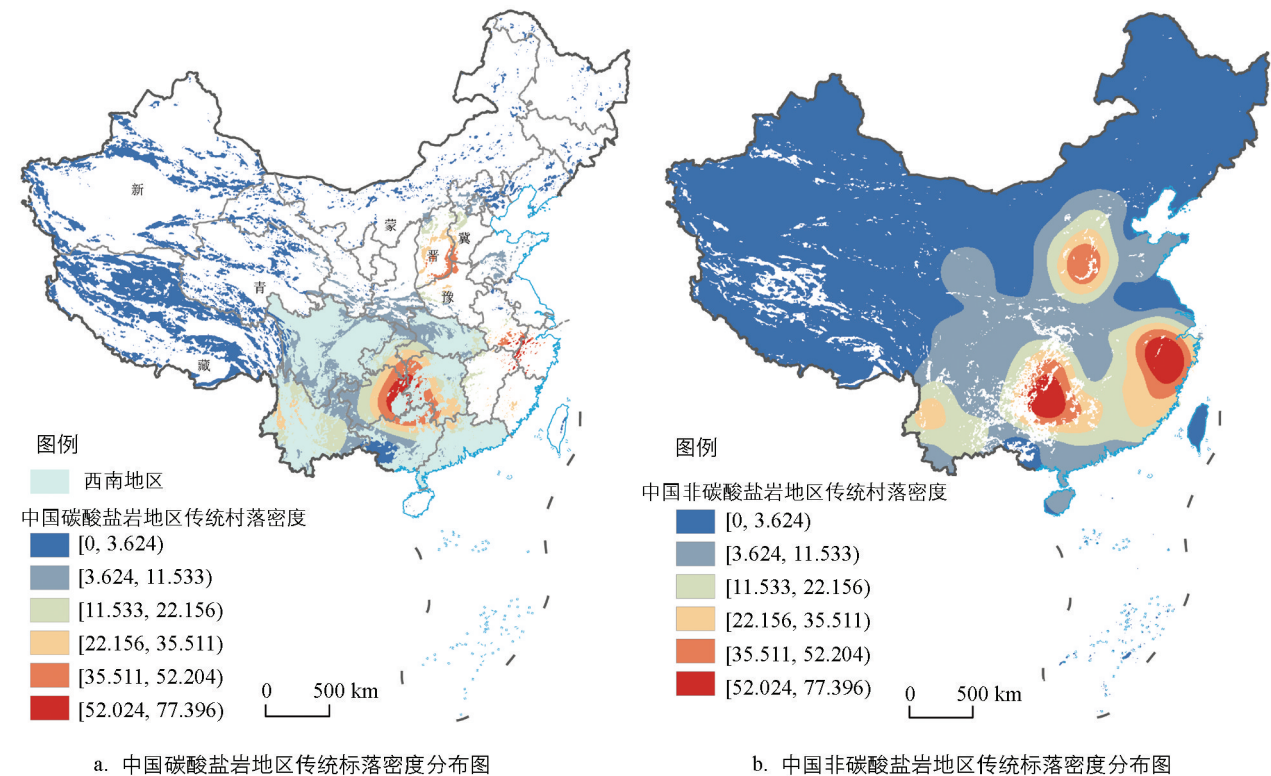


图 11 中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区传统村落密度对比图

3 结论

本研究统计了中国碳酸盐岩的分布特征,并基于密度函数和分级统计,对比分析中国碳酸盐岩与非碳酸盐岩地区在自然和人文地理要素两个方面的差异,结果表明:

1) 中国裸露型碳酸盐岩主要分布于西藏、新疆、贵州、云南、四川、重庆、广西、湖南、湖北,面积约 139.68 万 km^2 . 按裸露型碳酸盐岩占各省级行政区划面积比例情况统计,贵州、重庆、广西、西藏、湖北、湖南、云南、山西、陕西、四川、河北、青海、新疆、甘肃和内蒙古的碳酸盐岩出露面积的比例为 64.0%, 39.7%, 34.1%, 31.2%, 30.3%, 28.0%, 26.5%, 17.7%, 15.1%, 14.8%, 14.1%, 11.6%, 10.5%, 8.8%, 3.6%.

2) 在自然地理要素方面,碳酸盐岩地区的湿润区占比 38.7%,降水充沛;因高原碳酸盐岩发育广泛,碳酸盐岩地区高海拔区占比 32.8%,海拔偏高;受西南地区亚热带山地气候影响,碳酸盐岩地区年均气温高值区占比 21.9%,年均气温偏高;因西南地区水热条件好,地表植被覆盖度较高,碳酸盐岩地区 NDVI 高值区占比大,植被覆盖率高. 非碳酸盐岩地区由于地表较为平坦,河网水系较密集,水系密度高值区占比 24.9%,水系密度偏大;因非碳酸盐岩地区土壤稳定性较高,水力侵蚀指数低值区占比 53.8%,土壤水力侵蚀指数偏小.

3) 在人文地理要素方面,碳酸盐岩地区因西南地区独特的地势,吸引了众多人口迁入,人口密度高值区占比 29.9%,人口密度较大;由于西南地区的少数民族文化区和冀鲁豫交界集聚区,碳酸盐岩地区传统村落更集中,传统村落密度偏大. 非碳酸盐岩地区由于市政建设更完善,地貌条件和人口密度多种因素综合影响,道路网相对密集,道路密度高值区占比大,道路密度偏大;受东部发展迅速的经济影响,非碳酸盐岩地区夜间灯光指数高值区占比大,夜间灯光指数偏高.

针对差异研究,可以从更多不同的角度进行挖掘分析. 建立模型来辅助评价,各种影响因素(即所选的地理特征和指标)对区域影响程度不同,通过层次分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)分析各个影响因子的作用,能更好地探究区域间的差异.

参考文献:

- [1] JIANG Z C, LIAN Y, QIN X. Rocky Desertification in Southwest China: Impacts, Causes and Restoration [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132: 1-12.
- [2] XIAO H L, WENG Q H. The Impact of Land Use and Land Cover Changes on Land Surface Temperature in a Karst Area of China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(1): 245-257.
- [3] YUAN D. Sensitivity of Karst Process to Environmental Change along the PEP II Transect [J]. *Quaternary International*, 1997, 37: 105-113.
- [4] 袁道先. 岩溶地区的地质环境和水文生态问题 [J]. *南方国土资源*, 2003(1): 22-25.
- [5] 白晓永, 冉晨, 陈敬安, 等. 中国喀斯特生态系统健康诊断的方法、进展与展望 [J]. *科学通报*, 2023, 68(19): 2550-2568.
- [6] 马芊红, 张科利. 西南喀斯特地区土壤侵蚀研究进展与展望 [J]. *地球科学进展*, 2018, 33(11): 1130-1141.
- [7] 王德炉, 喻理飞. 喀斯特环境生态脆弱性数量评价 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2005, 29(6): 23-26.
- [8] 宋振华, 袁希平, 甘淑, 等. 滇东南岩溶山区生态环境的脆弱性分析及预防措施 [J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(26): 259-260, 300.
- [9] 王正雄, 蒋勇军, 张远喆, 等. 基于 GIS 与地理探测器的岩溶槽谷石漠化空间分布及驱动因素分析 [J]. *地理学报*, 2019, 74(5): 1025-1039.
- [10] PARISE M, PASCALI V. Surface and Subsurface Environmental Degradation in the Karst of Apulia (Southern Italy) [J]. *Environmental Geology*, 2003, 44(3): 247-256.
- [11] 王书敏, 郭树刚, 何强, 等. 城市流域降雨径流水质特性及初期冲刷现象 [J]. *环境科学研究*, 2015, 28(4): 532-539.
- [12] 林家元, 程亚男. 基于无人机遥感影像的裸岩识别及早期石漠化评价 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(12): 125-135.
- [13] VAN BEYNEN P, BRINKMANN R, VAN BEYNEN K. A Sustainability Index for Karst Environments [J]. *Journal of Cave and Karst Studies*, 2012, 74(2): 221-234.
- [14] 何鑫, 钟九生, 林双双, 等. 西南喀斯特地区耕地破碎化与石漠化空间格局及耦合关系研究 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(6): 160-170.
- [15] PENG J, JIANG H, LIU Q H, et al. Human Activity Vs. Climate Change: Distinguishing Dominant Drivers on LAI Dynamics in Karst Region of Southwest China [J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 769: 144297.
- [16] 周玮, 高渐飞. 喀斯特石漠化区植被恢复研究综述 [J]. *绿色科技*, 2013(7): 4-7.
- [17] 邵红娟, 杨广斌, 罗绪强, 等. 岩溶山区林地景观梯度变化分析 [J]. *水土保持研究*, 2015, 22(1): 224-228.
- [18] 魏小芳, 赵宇鸾, 朱昌丽, 等. 岩溶山地城市建设用地扩展的地形梯度特征——以贵阳市为例 [J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2020, 43(1): 22-29, 81.
- [19] 王世杰, 张信宝, 白晓永. 中国南方喀斯特地貌分区纲要 [J]. *山地学报*, 2015, 33(6): 641-648.
- [20] 于维莲, 董丹, 倪健. 中国西南山地喀斯特与非喀斯特森林的生物量与生产力比较 [J]. *亚热带资源与环境学报*, 2010, 5(2): 25-30.
- [21] 王世杰. 喀斯特石漠化——中国西南最严重的生态地质环境问题 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22(2): 120-126.
- [22] 翁金桃. 碳酸盐岩在全球碳循环过程中的作用 [J]. *地球科学进展*, 1995, 10(2): 154-158.
- [23] 吴华英, 覃小群, 黄奇波, 等. 石漠化: 地球的癌症 [J]. *中国矿业*, 2019, 28(S1): 371-372, 375.
- [24] GOLDSCHIEDER N, CHEN Z, AULER A S, et al. Global Distribution of Carbonate Rocks and Karst Water Resources [J]. *Hydrogeology Journal*, 2020, 28(5): 1661-1677.
- [25] 宋林华. 喀斯特地貌研究进展与趋势 [J]. *地理科学进展*, 2000, 19(3): 193-202.
- [26] 王跃跃, 陈蓉, 申朝永, 等. 基于 RS 与 GIS 的碳酸盐岩遥感影像特征研究——以黔南地区为例 [J]. *中国岩溶*, 2020, 39(5): 762-774.
- [27] 李雨夕, 杨君笑. 中国是世界历史中唯一文化没有中断的国家——基于四大文明古国的比较 [J]. *才智*, 2016(6): 280.
- [28] 程维明, 周成虎, 申元村, 等. 中国近 40 年来地貌学研究的回顾与展望 [J]. *地理学报*, 2017, 72(5): 755-775.
- [29] 杨庆媛. 西南丘陵山区土地整理与区域生态安全研究 [J]. *地理研究*, 2003, 22(6): 698-708.

[30] 中华人民共和国自然资源部网站. 2023 年中国自然资源公报 [EB/OL]. (2024-02-29) [2024-05-02]. https://gi.mnr.gov.cn/202402/t20240229_2838490.html?ddtab=true.

[31] 中华人民共和国中央人民政府网站. 国务院新闻办就 2023 年国民经济运行情况举行发布会 [EB/OL]. (2024-01-17) [2024-05-02]. https://www.gov.cn/zhengce/202401/content_6926623.htm.

[32] 蒲俊兵, 袁道先, 覃政教, 等. 我国西南岩溶区水环境问题 [J]. 科学, 2020, 62(2): 32-36.

[33] 张宏, 杨洋, 钟贤洪. 基于 GIS 的赣州市城区道路可达性研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(11): 20-22.

[34] 郑佳玮, 陈兴伟, 李孝成, 等. 水系提取的集水面积阈值确定方法比较研究 [J]. 人民珠江, 2023, 44(1): 109-115.

[35] 王雯雯, 谷优阳, 张驰, 等. 基于 POI 及核密度分析的咸丰县城乡交错带分布研究 [J]. 资源环境与工程, 2022, 36(1): 117-123.

[36] 曲畅, 任玉环, 刘亚岚, 等. POI 辅助下的高分辨率遥感影像城市建筑物功能分类研究 [J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(6): 831-837.

[37] 姬世保, 杜军凯, 仇亚琴, 等. 基于星地融合数据的黔桂喀斯特山地降水时空分布 [J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(6): 28-36.

[38] 王艳姣, 闫峰. 1960—2010 年中国降水区域分异及年代际变化特征 [J]. 地理科学进展, 2014, 33(10): 1354-1363.

[39] 李炳元, 潘保田, 韩嘉福. 中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨 [J]. 第四纪研究, 2008, 28(4): 535-543.

[40] 刘凯, 聂格格, 张森. 中国 1951—2018 年气温和降水的时空演变特征研究 [J]. 地球科学进展, 2020, 35(11): 1113-1126.

[41] 平措次旺, 索南才吉, 格桑次旺, 等. 中国气温和降水局地同期相关的季节差异及年代际变化 [J]. 安徽农学通报, 2020, 26(16): 179-184, 193.

[42] 舒守娟, 王元, 储惠芸. 地理和地形影响下我国区域的气温空间分布 [J]. 南京大学学报(自然科学版), 2009, 45(3): 334-342.

[43] 齐泓玮, 尚松浩, 李江. 中国水资源空间不均匀性定量评价 [J]. 水力发电学报, 2020, 39(6): 28-38.

[44] 宋超, 余琦殷, 邢韶华, 等. 近 30 年河北大海陀自然保护区山地草甸植被 (NDVI) 变化及其对气候的响应 [J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2547-2556.

[45] 孙凡, 徐圣旺, 姚小华. 黔中典型喀斯特地区季节性石漠化动态研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2012, 34(2): 9-16.

[46] 张宇婷, 肖海兵, 聂小东, 等. 基于文献计量分析的近 30 年国内外土壤侵蚀研究进展 [J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 797-810.

[47] 李佳蕾, 孙然好, 熊木齐, 等. 基于 RUSLE 模型的中国土壤水蚀时空规律研究 [J]. 生态学报, 2020, 40(10): 3473-3485.

[48] 刘泰洪. 从瑗瑛-腾冲线的形成看人口迁移对我国人口分布的影响 [J]. 市场与人口分析, 2001, 7(4): 30-35.

[49] 钟静, 卢涛. 基于地形起伏度的中国西南地区人口格局分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(11): 93-98.

[50] 王庆国. 城市道路重要性评价方法的综合分析 [J]. 测绘通报, 2018(8): 124-127.

[51] 陈楠枰, 汪场, 杨雅舒. 图说:《国家综合立体交通网规划纲要》[J]. 交通建设与管理, 2021(1): 28-35.

[52] 张英佳, 韩会庆, 王喆, 等. 基于 Open Street Map 的中国道路密度及多样性空间格局研究 [J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2017, 35(5): 24-29.

[53] 徐知宇, 胡寻寻, 李佳慧, 等. 基于夜间灯光数据的城市化水平动态评价 [J]. 绿色科技, 2018(8): 200-202, 208.

[54] 卢嘉浩, 安永刚, 张立生. 基于 GIS 的中国传统村落空间分布与旅游发展要素关联性研究 [J]. 东北农业大学学报(社会科学版), 2022, 20(1): 83-96.

责任编辑 包颖