

韦延兰, 李文莉, 黄晨晖, 等. 越南岩溶地质概况[J]. 中国岩溶, 2024, 43(2): 392-405.

DOI: 10.11932/karst20240206

越南岩溶地质概况

韦延兰^{1,2}, 李文莉^{1,2}, 黄晨晖^{1,2}, 周立新^{1,2}, 杨象鹏^{1,2}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西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, 广西 桂林 541004; 2. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 广西 平果 531406)

摘要: 越南岩溶发育面积大, 岩溶地质有关研究比较广泛, 为了更全面地掌握越南岩溶地质的研究成果, 本文综合分析前人研究成果, 结合遥感资料、地质图、洞穴图集等有关资料, 编制越南岩溶地质分布图, 结合地质构造、岩性组合、水文气候、生物活动等特征分析岩溶作用的背景条件, 总结越南岩溶地质、地貌特征和岩溶分布规律, 为“全球岩溶地质”数据库提供基础支持。越南岩溶分布面积 60 000 km², 占国土面积的 20%, 主要分布在越南的北部和中部, 南部有零星分布, 发育峰丛、峰林、岩溶盆地、洞穴等岩溶景观。多期构造运动、厚层石炭系—二叠系、三叠系纯石灰岩、湿润多雨的热带季风气候、活跃的生物活动均有利于岩溶作用的发生。越南岩溶属于典型的热带岩溶, 与中国南部岩溶具相似的起源。

关键词: 越南; 岩溶地质; 岩溶景观; 岩溶资源

创新点: 在充分分析遥感、地质、洞穴等最新研究成果在基础上, 从区域地质视角, 结合气候水文和生物条件、岩溶地貌组合类型分析越南岩溶发育的作用条件, 对越南岩溶发育演化的过程和分布规律进行深入论述。

中图分类号: P642.25 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)02-0392-14

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

越南岩溶分布面积 6 万 km², 约占国土总面积的五分之一, 全国范围内 30 个省份均有岩溶分布, 集中分布在越南东北部的河江省(Hà Giang)、谅山省(Lang Son)等, 西北部的莱州省(Lai Chau)、罗山省、和平省(Hòa Bình), 越南中部的义安省(Nghệ An)、广平省(Quang Bình)、广治省(Quảng Trị)和下龙湾滨海岛屿。越南岩溶作用非常强烈, 岩性、构造、水文、生物等都有利于岩溶发育, 越南与老挝、泰国、中国南方同属于热带岩溶区^[1-2], 发育峰丛洼地、峰

林岩溶地貌以及壮观的岩溶洞穴景观。

越南地质学研究起步较晚, 岩溶地质、洞穴学研究基础相对薄弱, 专门的岩溶、洞穴的资料较少, 最早的有关岩溶、洞穴的资料是 20 世纪早期, 在区域地质^[3-4]、地貌学^[5-11]、考古学^[12-13]、洞穴生物学^[14-16]的研究资料中有所提及。20 世纪 90 年代开始, 越南壮观的岩溶地貌、奇妙的洞穴景观引起了科学家的广泛关注, 众多科学家纷纷从岩溶地貌类型^[17-20]、岩溶生态^[21-24]、岩溶水文地质^[25-32]、洞穴学^[33-48]、洞穴生物^[49-56]、洞穴考古^[57-58]等开展详细研究; 1990—2009 年, 英国和越南合作开展越南岩

资助项目: 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费(2002372017001)

第一作者简介: 韦延兰(1987—), 女, 工程师, 研究方向: 岩溶地质。E-mail: weiyatlan@mail.cgs.gov.cn.

通信作者: 李文莉(1987—), 男, 副研究员, 研究方向: 岩溶地质。E-mail: liwenli@mail.cgs.gov.cn.

收稿日期: 2022-11-20

溶洞穴勘探研究工作, 1998—2003年越南和比利时联合对越南西北岩溶山区岩溶水文地质、岩溶生态环境、岩溶景观开发与保护开展研究, 近几年越南在岩溶区的水文地质、岩溶含水层、古气候、岩溶洞穴探测方面部署了一系列项目, 取得了系列成果。本文在此基础上, 结合遥感资料、地质图、洞穴图集等有关资料, 从地质构造、岩性组合、水文气候、生物活动等特征分析岩溶作用的背景条件, 从区域角度, 总结越南岩溶地质、地貌特征、岩溶资源现状和岩溶分布规律, 以期“全球岩溶地质”数据库提供基础支持。

1 地质背景

1.1 地形

越南位于印度支那半岛东部, 国土面积为 331 688 km², 海岸线从南部的泰国湾延伸到北部湾, 全长约 3 260 km。越南为山形地貌, 除北部的红河三角洲和南部的湄公河三角洲, 越南大部分地区都是山地, 最高的山脉位于越南西北部, Fan Si Pan 海拔超过 3 124 m, 南部最高山脉海拔大概 2 500 m。

1.2 大地构造背景

越南大地构造属于欧亚板块, 地处环太平洋和地中海—特提斯活跃构造带的接触带^[59], 太古界到第四系均有出露(图 1a)^[60]。寒武系是越南最古老的碳酸盐岩地层, 分布在越南东北部的西北角大部分地区, 岩石组合从薄层灰岩夹泥灰岩、硅质岩到厚层的纯碳酸盐岩, 地层断裂和岩石裂隙发育, 部分岩石出现变质。奥陶系厚度超过 3 000 m, 含部分碳酸盐岩, 奥陶系与下志留统整合接触, 与上志留统不整合接触。奥陶系—志留系主要分布在红河北岸, 义安省(Nghê An)与河静省(Hà Tĩnh)的交界处, 广平省(Quang Binh)与广治省(Quảng Trị)的交界处, 岩性主要为砂岩、砾岩, 在巴卡波(Bac bo)山脉西部岩性主要为白云岩、石灰岩。泥盆系主要分布在越南的东北部大部分地区、山罗省(Son La)与富寿省(Phú Thọ)交界处、和平省(Hòa Bình), 在越南的中部也有零星分布, 岩性以砂岩、石灰岩为主, 其中, 中泥盆统发育纯的石灰岩。石炭系—二叠系发育厚层纯石灰岩, 厚度大约 1 500 m, 主要分布在高平省(Cao Bang)、广平省(Quang Binh)、谅山省(Lang Son)。二叠系主

要为石灰岩, 集中分布在清化省(Thanh Hóa)东北部, 在越南北部的地区也有零星分布, 在南博(Nam bo)西部发育纯的石灰岩地层。中生界在越南广泛分布, 主要分布在越南的东北部、西北部, 越南中南部。三叠系分布在越南北部的大部分地区和越南中部, 岩性以砂岩、砾岩、石灰岩、流纹岩为主, 厚度最大超过 4 000 m, 三叠系发育越南最大的连续厚、纯石灰岩, 厚超过 1 000 m, 长 400 km, 从莱州省(Lai Chau)的封土(Phong Tho), 呈 NW-SE 向延伸至清化省(Thanh Hóa)的河中(Ha Trung)海岸。侏罗系主要分布在越南的西北部和南部, 在东北部、中部有零星发育, 中—下侏罗统主要分布在越南的西北部, 为陆相沉积, 以砂岩为主。第四系广泛分布于北部的红河三角洲、南部的湄公河三角洲以及沿海地区, 以砾岩、砂岩、松散冲、洪积物为主。更新世—全新世火山岩、玄武熔岩广泛分布在越南的中南部^[60]。

越南地处我国华南板块与印度板块的交接部位(图 1b), 该区域经历了连续的谷裂和碰撞运动^[61-63]:

(1) 加里东期: 华南板块与印支板块碰撞、拼贴, 形成马江缝合带, 马江断裂带是一组 NW-SE 向的断裂, 该断裂横穿越南的北部。加里东运动导致区域广泛发育韧性冲断层及等斜褶皱, 使得碳酸盐岩地层显著的构造迁移、加厚、重复和分割^[64-65]。

(2) 泥盆纪—中三叠世运动: 泥盆纪, 地壳下降, 发生海侵作用, 越南大部分地区被海水淹没, 包括昆嵩(Kontum)地块。这一时期开始沉积大套海相页岩、碳酸盐岩; 石炭纪—二叠纪, 越南北部海侵作用加强, 导致该地区几乎全部被海水覆盖, 并接收了海洋沉积, 造就越南北部厚 1 000~2 000 m 的纯石灰岩地层, 石灰岩形成岩溶后被中生代砂岩、页岩覆盖^[66]; 中三叠世, 印支造山运动引起了印度板块与华南板块之间的强烈挤压, 导致北越南边缘地区抬升, 碳酸盐岩地层因此暴露并遭受侵蚀作用^[67-68]。

(3) 晚三叠世运动: 在晚三叠世, 地壳变形从之前的挤压转变为伸展阶段, 形成半地堑, 这些半地堑, 内部被湖相石灰岩填充, 部分石灰岩厚度超过 50 m^[52]。晚三叠世花岗岩侵入导致区域发生强烈的大理岩化, 削弱了区域岩溶作用。

(4) 侏罗纪—晚白垩世运动: 由于板块间的再次碰撞, 地壳经历了显著的抬升。到了晚白垩世, 越南地区整体抬升成为陆地。这一过程中, 形成了越南中部的长山山脉(Truong Son Range)。长山山脉的

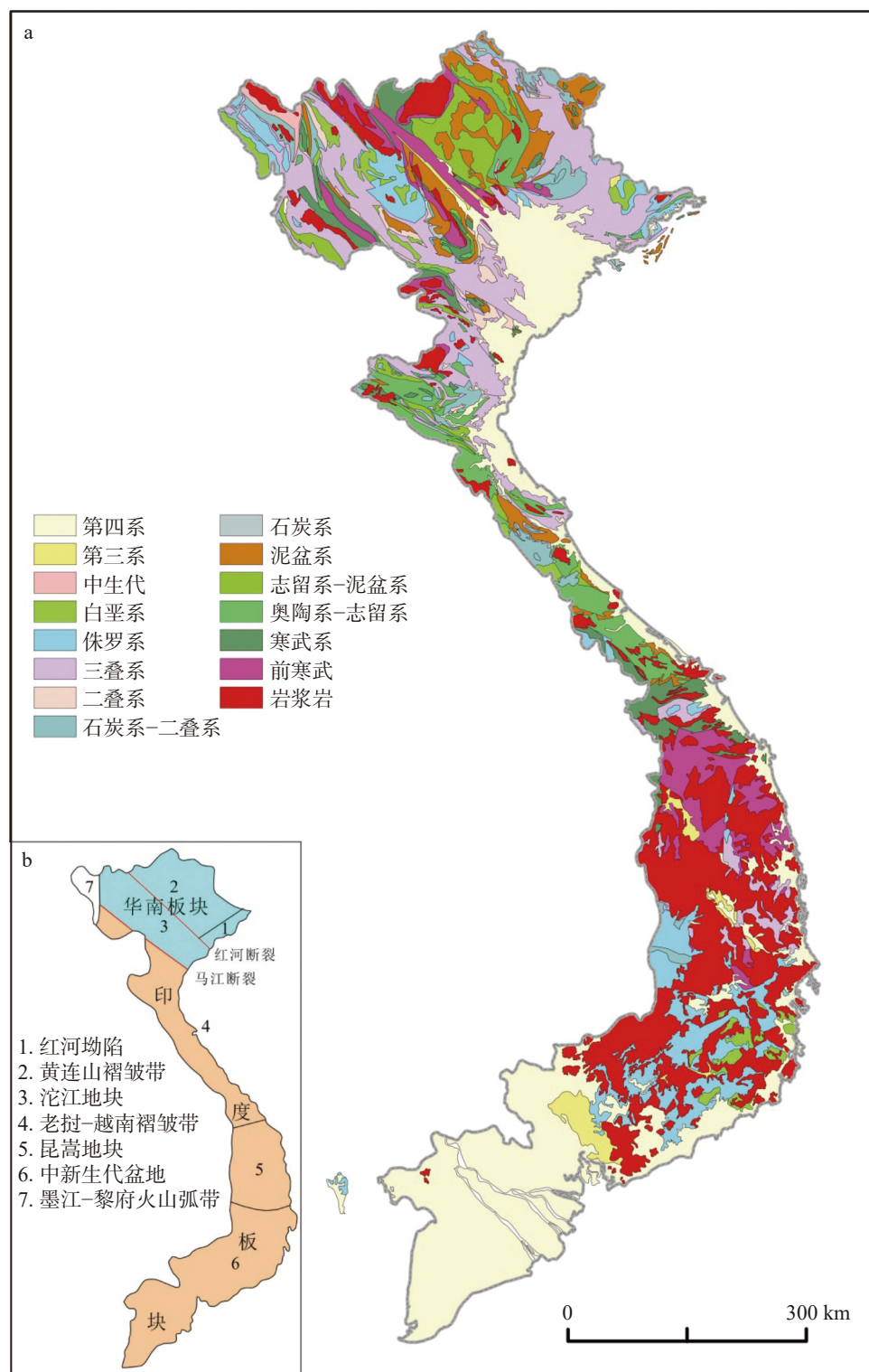


图 1 越南地质简图(a)和越南构造单元划分图(b)^[70-73]

Fig. 1 Geological sketch map (a) and structure map (b) of Vietnam

地层中发育了巨厚的碳酸盐岩。随着地壳的隆升,地层遭受挤压和变形,形成了褶皱。这些构造活动加剧了地层中的裂隙发育,并促进了岩溶作用的形成^[69]。

(5)喜山期:越南发生第二阶段较强烈的区域隆

升,侵蚀作用加强,碳酸盐岩遭受强烈的风化作用,长期的隆升使得基准面加深,石灰岩地层被抬升数百至数千米,加剧垂向岩溶作用,形成石林、峰丛、峰林岩溶地貌。在沿海地区,构造沉降使得部分岩溶地貌被海水淹没,形成了诸如下龙湾这样的著名

岩溶群岛地貌^[52]。

2 岩溶作用条件

越南岩溶地貌的演化受到地层岩性、地质构造以及气候环境等多种地质因素的共同控制。特别是, 区域隆升变形事件对岩溶地貌的形成和发展起到了关键作用。NNW-SSE 向的断层不仅控制了碳酸盐岩地层的层序和岩性格架, 还影响了地下水流向和洞穴的方位。此外, 越南的热带季风气候和生物活

动等外生因素也加速了岩溶作用的过程。影响越南岩溶作用的主要因素如下:

2.1 地层岩性

越南碳酸盐岩的沉积时间跨度大, 从太古宇一直延续到新生界, 甚至现在的珊瑚礁也有碳酸盐岩的沉积(表1), 岩溶作用主要在前寒武纪至全新世的石灰岩地层中(图2), 前寒武系和早古生代发育薄层、不纯的石灰岩, 岩溶作用较弱; 石炭系—二叠系、三叠系发育厚层、纯的石灰岩, 石灰岩厚度可达1 000~2 000 m。石炭系—二叠系石灰岩的 CaCO_3 含量约

表1 越南碳酸盐岩地层表^[20, 60]

Table 1 Carbonate formation of Vietnam

序号	地层名称	地层年代	厚度/m	分布区域	特点
1	Banhhat Tule	白垩系	70~100	莱州省(Lai Chau)河江省(Hà Giang)与安沛省(Yên Bái)交界处	石灰岩透镜体
2	Suoibe	侏罗系	150	莱州省(Lai Chau)	角砾状—块状石灰岩
3	Muongtraï	三叠系	200~500	山罗省(Son La)	浅灰色—灰色层状、透镜状石灰岩
4	Dong Giao	三叠系	1 000~2 000	莱州省(Lai Chau)、山罗省(Son La)和平省(Hòa Bình)、清化省(Thanh Hóa)	石灰岩, 细粒结构
5	Nam Tham	三叠系	600	河江省(Hà Giang)、高平省(Cao Bang)	石灰岩
6	Yenduyet Vienam	二叠系	100~150	清化省(Thanh Hóa)、莱州省(Lai Chau)山罗省(Son La)、河江省(Hà Giang)高平省(Cao Bang)	石灰岩透镜体
7	Bac son	石炭系—二叠系	1 000~1 500	河江省(Hà Giang)、高平省(Cao Bang)谅山省(Lang Son)、莱州省(Lai Chau)义安省(Nghệ An)、广平省(Quang Binh)	厚层, 块状石灰岩
8	Bancai	泥盆系	700~1 300	河静省(Hà Tĩnh)、广平省(Quang Binh)广治省(Quảng Trị)	石灰岩、燧石石灰岩
9	Banpap	泥盆系	700~900	河江省(Hà Giang)、高平省(Cao Bang)	细粒石灰岩夹白云质灰岩
10	Banguon	泥盆系	320~600	莱州省(Lai Chau)	石灰岩
11	Suoitra	泥盆系	400~600	河江省(Hà Giang)、高平省(Cao Bang)宣光省(Tuyen Quang)、山罗省(Son La)	石灰岩透镜体
12	Bohieng	志留系—泥盆系	200~500	莱州省(Lai Chau)西部和北部、河江省(Hà Giang)宣光省(Tuyen Quang)和义安省(Nghệ An)	薄层石灰岩、石灰岩透镜体
13	Paham	奥陶系—泥盆系	100	莱州省(Lai Chau)	石灰岩
14	Sinhvinh	奥陶系—志留系	100~500	河江省(Hà Giang)、宣光省(Tuyen Quang)北部太原省(Thái Nguyên), 义安省(Nghệ An)至广治省(Quảng Trị)一带	石灰岩
15	Langvac	寒武系	80	义安省(Nghệ An)、广治省(Quảng Trị)	细粒薄层石灰岩、石灰岩透镜体
16	Dienlu Changpung	寒武系	600~750	高平省(Cao Bang)、谅山省(Lang Son)	石灰岩
17	Modong Sonma Ha Giang	寒武系	100~200	河江省(Hà Giang)	石灰岩
18	Sapa, Deosen	前寒武	200~300	老街省(Lào Cai)北部和莱州省(Lai Chau)	白云质灰岩

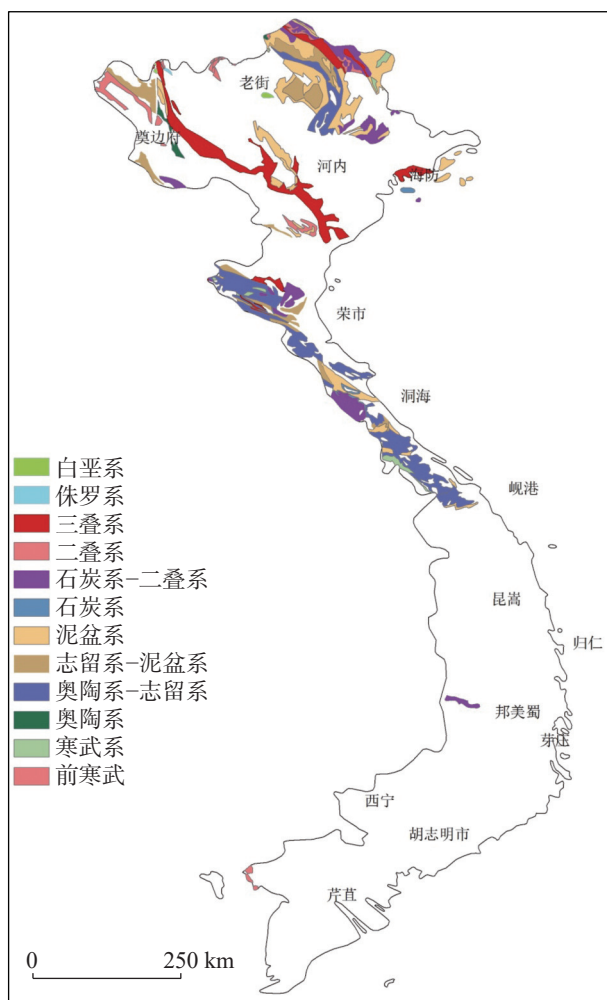


图2 越南岩溶地质分布图^[9-10, 20, 70-71]

Fig. 2 Karst areas in strata of Vietnam

为98%，三叠系石灰岩的 CaCO_3 含量96.7%，有利于岩溶作用的发生^[65]。

2.2 构造运动

越南地处环太平洋和特提斯活跃构造带的交汇处，经历了多期连续的抬升和剥蚀作用，区域构造是控制越南地区碳酸盐岩单元空间产状、水文地质系统行为、岩溶地貌形态、景观形态的重要因素^[64-65]。地层碳酸盐岩在多期的区域性韧性-脆性逆冲剪切和褶皱变形事件中发生倾斜、断裂、增厚和解体，晚期脆性构造与早期断层、褶皱叠加，形成破碎、复杂的构造格架，为岩溶景观的形成创作有利条件。在越南北部形成NW-SE的褶皱和呈NW-SE, NE-SW 300°的断层组合，褶皱地层多呈大约30°倾斜，甚至近于垂直。褶皱和断层束的活动，导致石灰岩地层强烈发育裂隙，甚至有些地层被切割成密集的网格

状，特别是在北干省(Bac Kan)地层网格密度最高可达 $2\sim 2.5 \text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$ ，这些断裂形成密集的排水网格，促进了岩溶作用过程。晚新生代热带气候条件下，水溶蚀、生物侵蚀等地表过程，形成越南独特的喀斯特地貌。

2.3 气候

越南地处北回归线以南，属于热带季风气候，全国范围内空气湿润，降雨充沛，年平均气温 $22\sim 27 \text{ }^\circ\text{C}$ ，年平均降雨量为 $1\ 500\sim 2\ 400 \text{ mm}$ ，年平均湿度 $82\%\sim 85\%$ ^[74]。由于纬度跨度大，南北气候也存在差异。北部为副热带季风气候，四季分明，年平均气温在 $23\sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间；南部为热带气候，分为旱季和雨季，每年的3月到9月是雨季，10月至次年的4月为旱季，南部平均气温 $26.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (表2)，湿润多雨的气候，加速石灰岩溶蚀，加强了岩溶作用。

表2 越南主要岩溶区年平均降雨量和湿度 (2009—2019年)^[74]：

Table 2 Annual average rainfall (mm/a) and average moisture (%) in karst areas of Vietnam (2009—2019)

序号	地区	降雨量/ $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$	湿度/%
1	莱州省(Lai Chau)	2 408.37	81.91
2	山罗省(Son La)	1 359.35	79.09
3	宣光省(Tuyen Quang)	1 653.85	80.99
4	河内(Ha Noi)	1 641.75	76.91
5	下龙湾(Bai Chay)	2 090.96	82.37
6	南定省(Nam Dinh)	1 679.01	82.74
7	义安省(Nghê An)	2 120.94	82.38
8	广治省(Quảng Trị)	3 014.76	86.48
9	Da Nang	2 425.03	80.55
10	广平省(Quang Binh)	2 250.00	84.00

2.4 生物作用

越南的岩溶区拥有独特的岩溶生态系统，这些区域大多被常绿热带雨林所覆盖，形成了丰富的生物圈，有助于加速岩溶作用。岩溶区的植物多样性极为丰富，大约包含7门、86目、224科、908属和2 000种不同的植物。动物群同样多样化，包括原生动物、蠕类、软体动物和节肢动物等门类^[22-23]。峰衙—克榜(Phong Nha-Ke Bang)、Ba Be国家公园和下龙湾的吉婆岛等岩溶区以其丰富的生物多样性被列入

表 3 峰衙—克榜 (Phong Nha—Ke Bang)
自然遗产区植物群^[75-76]

Table 3 List of flora at Phong Nha-Ke Bang Natural Heritage

Taxon分类	Family科	Genus属	Species种
<i>Psilotophyta</i>	1	1	1
<i>Lycopodiophyta</i>	2	4	16
<i>Equisetophyta</i>	1	1	2
<i>Polypodiophyta</i>	23	73	176
<i>Pinophyta</i>	6	10	19
<i>Magnoliophyta</i>	160	817	2 437
- <i>Magnoliopsida</i>	131	638	1 909
- <i>Liliopsida</i>	29	179	528
Total总量	193	906	2 651

表 4 峰衙—克榜 (Phong Nha—Ke Bang)
自然遗产区动物群^[76]

Table 4 List of fauna at Phong Nha-Ke Bang Natural Heritage

分类Taxon	目Orders	Families科	Species种
哺乳动物 <i>Mammal</i>	11	32	154
鸟类 <i>Bird</i>	18	57	338
爬行动物 <i>Reptile</i>	2	17	100
两栖动物 <i>Amphibian</i>	2	08	51
鱼类 <i>Fish</i>	10	38	215
总量 Total	43	152	858

世界生物圈保护区。特别是峰衙—克榜国家公园,它包含了岩溶森林、岩溶山地森林、岩溶洞穴、岩溶地下水、岩溶湖泊和岩溶峡谷等 6 种生态系统,是越南生物多样性最丰富的地区之一(表 3, 表 4)。

3 越南岩溶分布特征

越南岩溶分布面积 60 000 km², 占国土总面积的 20%, 分布在莱州省(Lai Chau)、老街省(Lào Cai)、河江省(Hà Giang)、高平省(Cao Bang)、山罗省(Son La)、和平省(Hòa Bình)、广平省(Quang Binh)等 30 个省, 分东北、西北、中部和下龙湾四大集中岩溶区^[77]; 在越南西南海岸, 与柬埔寨边境接壤地区, 零星分布二叠纪石灰岩, 发育峰林岩溶地貌和岩溶洞穴, 是柬埔寨南部 Kampot-Kampong Trach 岩溶地貌的延伸^[78]。这些地区发育了典型的峰丛、峰林岩溶地貌, 山峰直径从几十米到几百米不等, 高从几百米到一公里不等。

3.1 东北岩溶区

东北岩溶区主要分布在高平省(Cao Bang)、河江省(Hà Giang)、宣光省(Tuyen Quang)和太原省(Thái Nguyên), 分布面积超过 18 000 km², 是中国南方岩溶的延伸, 其起源与中国云南岩溶起源相似^[79], 发育典型的峰林、峰丛洼地、较大的溶沟、石灰岩盆地、岩溶漏斗、大的落水洞、岩溶洞穴等景观。岩溶主要发育在古生代地层中, 以奥陶系、泥盆系、石炭系—二叠系为主; 岩溶发育的地层自西向东逐渐年轻, 依次为寒武系 Bac Ha 石灰岩高原, 泥盆系 Ba Be 和 Pu Ta Ca 石灰岩高原, 石炭系—二叠系 Dong Van 石灰岩高原。Dong Van 岩溶高原以其 1 000~1 200 m 厚的纯石灰岩和独特的岩溶山峰与峡谷形态组合而著称, 于 2010 年被认定为世界地质公园。该地区还发育了 1 261 个大落水洞, 平均密度为 1.4 个·km⁻²^[80], 这些落水洞发育在海拔 300~600 m 处, 其发育是导致当地干旱主要原因之一。

3.2 西北岩溶区

西北岩溶区主要沿马江缝合带分布, 分布在莱州省(Lai Chau)、山罗省(Son La)、和平省(Hòa Bình)和清化省(Thanh Hóa)等地区, 岩溶主要发育在元古代至三叠纪的地层中, 特别是三叠世 Dong Giao 组大型石灰岩地层, 岩溶作用最强^[81], 该石灰岩地层形成以山罗为中心轴的 NW-SE 向的大型石灰岩褶皱, 长约 400 km, 平均宽度 10~40 km, 厚 1 000~2 000 m, 从莱州省(Lai Chau)一直延伸到清化省(Thanh Hóa)(Ha Trung)的海岸线^[17,48,81], 西北岩溶区地表岩溶作用比地下强烈, 发育岩溶高原(木州岩溶高原(Moc Chau, Son La))、峰丛、峰林、落水洞、灰岩盆地、洞穴等岩溶地貌, 从西北到东南, 岩溶地貌呈现出岩溶高原—洼地—平原的变化趋势^[82]。莱州省至山罗省一带以岩溶高原为主, 石灰岩山峰高度在 800~900 m; 山罗省至和平省一带则以峰丛洼地为主; 和平省往东南海岸则以峰林和峰林平原为主, 石灰岩山峰高度在 100~200 m。宁平省的 Than Hoa 地区拥有被称为“陆上下龙湾”的古海上峰林地貌, 这是由于地壳抬升, 原本被海水淹没的峰林岩溶地貌露出水面形成的。

3.3 下龙湾岩溶区

越南的下龙湾是世界著名的岩溶区, 由海防市延伸至中国边境, 是中国南方峰林型岩溶地貌的延

伸。岩溶分布面积约 2 400 km², 占全岛面积的 90%, 发育超过 3 000 座石灰岩岛屿, 138 个海湖; 岩溶主要发育在三叠系、石炭系—二叠系、中泥盆系灰岩中, 石灰岩地层厚度超过 1 000 m; 发育峰丛、峰林地貌、岩溶洞穴系统和水平凹槽, 石灰岩山峰近于垂直, 山峰平均海拔 150 m, 最高 320 m, 由西北至东南逐渐降低。这些峰林地貌最初由陆地淡水溶蚀形成, 后来因海水淹没而形成。下龙湾处于广宁复背斜和下龙湾向斜拗陷接触带上, 早期的构造运动导致地层发生褶皱, 并衍生 NW-SE、NE-SW 的断层组合, 这些断层的演化促进了石灰岩地层中明显裂隙的发育, 为地表水向下侵蚀、形成陡峭山峰提供了条件。更新世, 受构造沉降的影响, 海平面上升, 山峰底部被海水淹没, 后期接受海水横向侵蚀, 导致石灰岩山峰发生崩塌, 使得山峰变得陡峭, 在山脚形成横向凹槽和活跃的海侵洞穴。

3.4 中部岩溶区

越南的长山山脉沿线分布着壮观的岩溶地貌, 这些地貌主要分布在义安省(Nghê An) 、河静省(Hà Tĩnh)、广平省(Quang Binh)和广治省(Quảng Trị), 并且延伸至老挝边界。岩溶分布面积超过 7 000 km², 与老挝的坎温(khamouane)岩溶相似。呈现出典型的岩溶高原特征, 石灰岩山峰高度在 1 500~200 m 之间, 随着从北向南的地势逐渐降低。岩溶地貌主要发育在奥陶系—志留系、石炭系—二叠系石灰岩中, 其中碳酸盐岩层序厚度可达 1 100 m, 岩性以白云质灰岩为主, 此外该地区还发育了总长 86 km 的水平岩溶洞穴和地下河景观, 其中就包括了已探明的最长洞穴 Phong Nha。由于其独特的地质和生态价值, 峰衙—克榜(Phong Nha-Ke Bang)岩溶区在 2003 年被联合国教科文组织列入世界自然遗产名录。

4 洞穴

洞穴系统在越南岩溶区广泛发育, 特别在莱州省(Lai Chau)、山罗省(Son La)、高平省(Cao Bang)、广平省(Quang Binh)等地区, 中部的峰衙—克榜(Phong Nha-Ke Bang)岩溶区, 水平洞穴极其发育, 被称为“洞穴王国”。洞穴走向受断层控制, 大部分洞穴沿着 NNW—SSE 向发育^[83]。

越南洞穴探测起步较晚, 目前越南洞穴调查研究仍然处于较慢的发展阶段, 主要是由法国、波兰、保加利亚、比利时等国家的洞穴学家与越南联合开展洞穴探测, 系统的洞穴勘探开始于 1990 年, 由英国与越南洞穴学家合作开展, 并建立了记录越南洞穴勘探成果的网站(www.vietnamcaves.org), 该网站记录了 1999—2010 年以来越南洞穴勘探成果。截止 2010 年, 越南已探明的洞穴长度超过 3 km 的有 27 条(表 5), 洞穴垂直高度超过 300 m 的 11 条(表 6); 已探明最长的洞穴是 Phong Nha 洞穴系统, 总长超过 60 km, 洞穴通道最大的洞穴是 Hang Son Dong, 洞穴长 7 km, 宽大于 200 m, 洞厅高 150 m, 最大的洞室高 250 m; 最深的洞穴是 Cong Nuoc, 地面向下垂直距离 600 m^[84]。

表 5 越南已知长度超过 4 km 的洞穴^[83]

Table 5 The longest cave of Vietnam

序号	洞穴名称	位置	长度/m
1	Hang Khe Rhy	Quang Binh	18 902
2	Hang Vom	Quang Binh	15 760
3	Hang Co Ban	Son La	8 500
4	Hang Phong Nha	Quang Binh	8 329
5	Hang Son Doong	Quang Binh	7 678
6	Nguon Ban San	Lang Son	5 416
7	Ngoum Sap	Cao Bang	5 379
8	Hang Toi	Quang Binh	5 258
9	Khpang Cave	Hoa Binh	5 000
10	Hang Cha Lo	Quang Binh	4 483
11	Ban Chang-Rang Kieo-Ban Ngam System	Cao Bang Province	4 100

Phong Nha 洞穴系统: Phong Nha 洞穴系统位于越南广平省(Quang Binh)的峰衙-克榜(Phong Nha-Ke Bang)世界自然遗产地。总长 60 km, 由 20 个洞穴组成(表 7), 是世界上最长的河洞, 也是最庞大的地下河系统, 在这里, 地表河流通过落水洞转入地下, 形成复杂的地下河网络。特别是 Hang En 洞, 河流流入地下后再次出现于地表, 与地表河流汇集, 然后再次转入地下, 流经 Hang Son Doong、Hang Thung、Phong Nha 等洞穴, 最终流入松河^[85-87]。Hang Khe Rhy 洞是 Phong Nha 洞穴系统最长的地下河洞穴, 长 18 902 m, 该河洞具有多个斗淋式入口, 地表溪流经漏斗流向在地下, 汇聚成 Hang Khe Ry 河洞。

表 6 越南最深洞穴^[83]

Table 6 The deepest cave of Vietnam

序号	洞穴名称	位置	垂直深度/m
1	Cong Nuoc	Lai Chau	-600
2	Basta Noodles	Ha Giang	-528
3	Hang Son Doong	Quang Binh	-449
4	Ta Chinh	Lai Chau	-402
5	Hang Ong	Quang Binh	-368
6	Hang Lau	Quang Binh	-354
7	Xa Lung 2	Ha Giang	-340
8	Hang Vuc Tang	Quang Binh	-325
9	Meo Vong 1	Ha Giang	-306
10	Yen Chow Do	Lai Chau	-301
11	Mu Cai Shaft	Cao Bang	-300

表 7 Phong Nha 洞穴系统^[86]

Table 7 Cave system of Phong Nha

序号	洞穴名称	位置	长度/m
1	Hang Phong Nha cave	Son Trach	8 329
2	Hang Toi cave	Son Trach	5 258
3	Hang E cave cave	Thuong Trach	845
4	Hang Cha An cave	Thuong Trach	667
5	Hang Thung cave	Thuong Trach	3 351
6	Hang En cave	Thuong Trach	2 490
7	Hang Khe tien cave	Thuong Trach	520
8	Hang Khe Ry cave	Thuong Trach	18 902
9	Hang Khe Thi cave	Thuong Trach	35
10	Dry Phong Nha cave	Thuong Trach	981
11	Hang Lanh cave	Thuong Trach	3 753
12	Hang Doi cave	Thuong Trach	539
13	Hang Nuoc Nut cave	Thuong Trach	2 205
14	Hang So Doi cave	Thuong Trach	1 124
15	Hang Ca cave	Thuong Trach	361
16	Hang Cay Nghien cave	Thuong Trach	162
17	Hang Lau cave	Thuong Trach	481
18	Hang Moi cave	Thuong Trach	408.2
19	Hang Va	Thuong Trach	1 686
20	Hang Son Soong	Thuong Trach	7 680

Hang Son Doong 是 Phong Nha 洞穴系统的一部分，是世界上已知洞穴通道最大的洞穴之一，洞穴总长 7.68 km，深 449 m，宽大于 200 m，通道平均高 150 m，最大的洞室高 250 m，洞内钟乳石高达 70 m。Hang Son Doong 洞是由于岩溶落水洞引发塌陷形成的，洞穴沿 N-S 断层方向发展。洞穴有 2 处大的由落水洞塌陷形成的大厅，1 号大厅面积更大，宽 163 m，塌陷

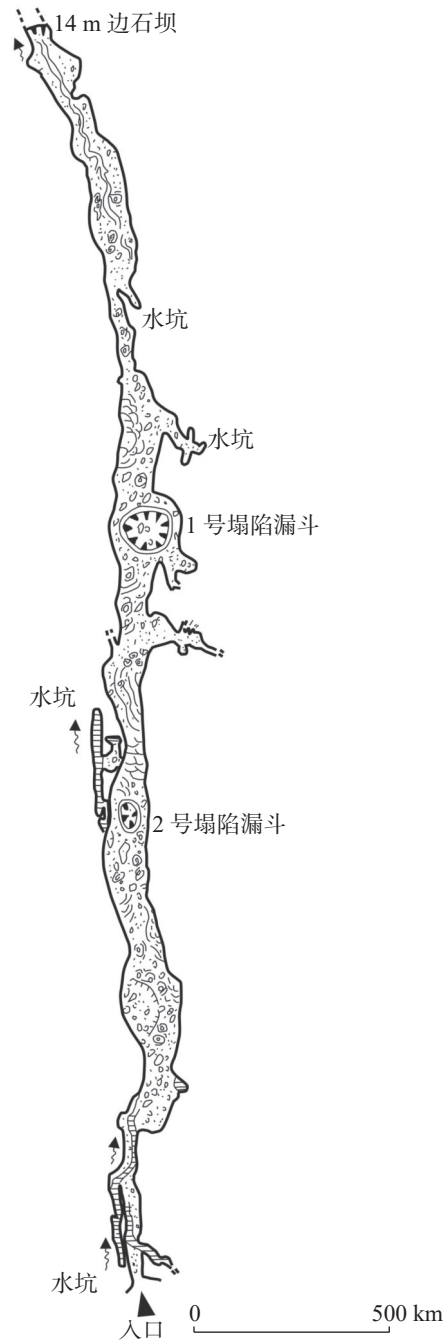


图 3 Hang Son Doong 洞穴^[89]

Fig. 3 Side view of Hang Son Doong cave

区被茂密的森林覆盖；2号大厅底部宽 110 m 的，洞壁出露薄层含燧石石灰岩(图 3)^[86]。洞穴被崩塌的岩石分成两部分，崩塌处的上游堆积了约 100 m 厚的平流沉积物，沉积物被流石覆盖^[89]。

Cong Nuoc: Conh Nuoc 洞穴位于越南莱州省 (Lai Chau) 坦东区 (Tam Duong)，是越南最深洞穴，也是目前东南亚最深的洞穴，2001 年，由比利时和越南洞穴探险家联合调查勘探。洞穴向下垂直深度 600 m，

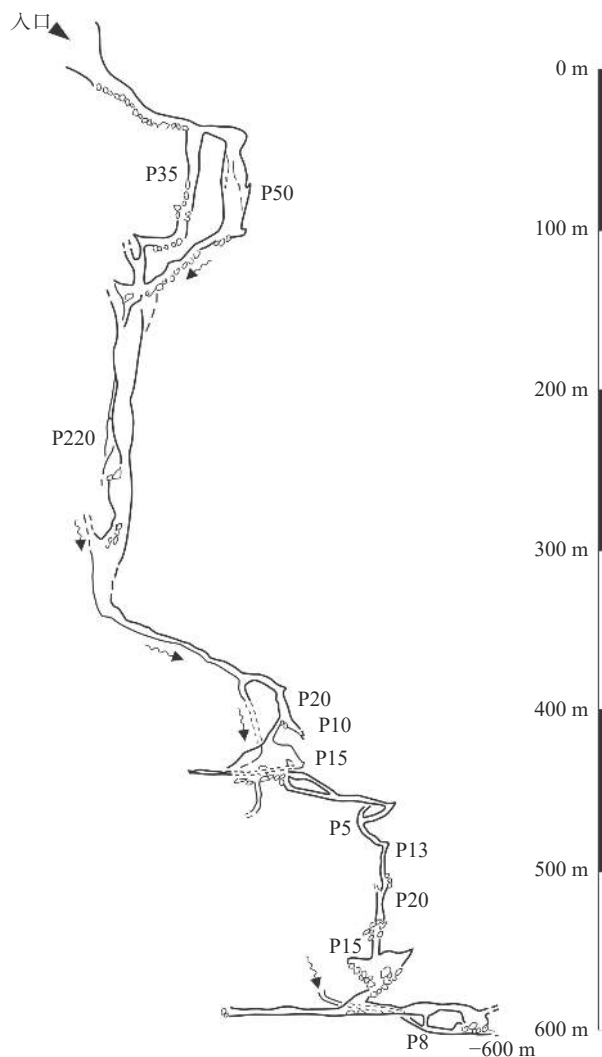


图4 Cong Nuoc 洞穴^[87]

Fig. 4 Side view of Cong Nuoc cave

长 1 882 m, 洞内最高直接落差 220 m。洞穴入口大于 20 m 宽, 20 m 高, 洞壁有大量岩浆岩脉(图 4)^[88-89]。

5 岩溶区资源

5.1 岩溶区水资源

越南拥有丰富的地下水资源, 每年可再生地下水资源总量约 630 亿 m^3 ^[90], 主要分布在越南东北部、湄公河三角洲、红河三角洲。岩溶水是越南工业、农业、生活主要供水来源, 特别是河内, 由于地表河流污染, 地下水已经成为最重要的供水水源。越南东北部岩溶区受地质构造、地形特征和气候因素影响, 岩溶地下水分布格局极不均匀, 目前查明的岩溶地下河系统有 6 处, 石炭系—二叠系、泥盆系是主要的岩溶含水层, 深度 40~50 m 处岩溶水最丰富, 地下

水水质总体较好, 主要为重碳酸盐水, 部分石炭系、二叠系岩溶水矿物总量超过 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[91]。

下龙湾岩溶区岩溶含水层主要赋存在石炭—二叠系、中泥盆系中, 地下流量大于 $7\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, 地下水由雨水补给, 由于海水入侵, 该区岩溶地下水含盐量较高。目前主岛上有 6 口钻井, 每日最大开采量为 $1\,000\text{ m}^3$ ^[92]。

越南西北部岩溶区, 岩溶水主要赋存在 Donggiao 超大石灰岩层中, 该区发育较多的落水洞、溶洞和岩溶泉, 地表水只在雨季短暂出现, 并且很快经落水洞补给深层岩溶含水层, 再以岩溶泉形式恢复到地表, 这些岩溶泉补给量大, 流速最大可达 $1\,050\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[93]。

5.2 旅游资源

地质公园模式是越南在推动地区经济发展与生态保护之间实现平衡的优选策略。越南在地质公园建设和地质环境保护规划方面取得了显著成就^[94], 以岩溶地貌著称的世界地质遗产地 3 处, 世界地质公园 2 处, 国家地质公园 3 处。

下龙湾(Ha Long Bay)世界自然遗产区, 位于越南东北海岸, 紧靠红河三角洲以东, 由超过 3 000 座石灰岩岛屿组成, 石灰岩岛屿陡峭或垂直立于海面, 以峰林、峰丛岩溶地貌著称, 有“海上桂林”的美誉, 2000 年被列入世界自然遗产。2004 年, 吉婆岛正式被确认为世界生物圈保护区, 2011 年被评为“世界新七大自然奇观”之一^[95]。

长安名胜群位于越南北部宁平省, 由华间古都和三谷-碧洞风景区组成, 是文化与自然的综合遗产地。该遗产地是石灰岩岩溶地貌景观区, 以峰林地貌而著称, 展示了典型的潮湿热带区峰林岩溶景观演化的最后阶段^[96]。

峰衙-克榜国家公园位于广平省, 2000 年确定为国家地质公园, 2003 年, 以典型的岩溶地貌特征被列入世界自然遗产名录; 2015 年, 作为陆地生态系统进化和发展过程中的生态过程的典范, 是生物多样性保护具有重要意义的自然栖息地, 第二次被认定为世界地质遗产, 是越南面积最大的世界遗产地, 为典型的石灰岩山脉, 发育超过 300 个岩溶洞穴, 洞穴全长 86.84 km(2005 年), 大部分洞穴是水平延伸, 发育巨大的地下河, 常见地下河穿越整个洞穴。该区岩溶地貌形成于 400 Ma 年^[97]。

董凡(Dong Van)喀斯特高原世界地质公园, 2010年成为世界地质公园, 是越南第一个世界地质公园; 位于越南北部山区河江省, 面积2 356 km², 公园内60%面积为喀斯特地貌, 发育峰丛洼地、深大溶沟、石灰岩盆地、漏斗、落水洞、洞穴等^[98]。董凡喀斯特世界地质公园得到了世界各地游客的青睐, 截至2020年, 游客总达80万人, 带动了当地旅游业的高速发展^[99]。

高平山水世界地质公园(Non nuoc Cao Bang UGGP), 以其岩石组合、地貌等地质多样性特点, 2018年评为世界地质公园, 是越南第二大世界地质公园, 位于越南东北部的高平省, 东边与中国广西崇左接壤, 发育世界第四大的跨国瀑布—德天瀑布(板约瀑布)。公园被南北向Cao Bang-Tien Yen断裂分隔成东西两部分, 东部主要有石灰岩组成, 发育峰丛洼地、峰丛、峰林岩溶, 岩溶洞穴系统、地下河等岩溶景观, 展示了完整了热带岩溶地貌演化过程; 西边有沉积岩、玄武岩、花岗岩等组成^[100]。

巴贝国家公园, 1992年确定为国家公园(Ba Be National Park), 位于北干省(Bac Kan)东北部的Ba Be岩溶高原, 是越南第八大国家公园, 发育岩溶夷平面地貌, 揭示地质过程与气候间的相互作用, 被东盟遗产公园组织(ASEAN Heritage Parks Organization)认定为越南生物系统最密集的地区之一^[101]。

吉婆国家公园, 位于越南北部海防市猫海区(Cat Hai), 北部与下龙湾接壤, 发育典型峰丛、峰林岩溶地貌。1986年成立国家公园, 是越南建立的第一个国家公园, 2004年被联合国教科文组织认定为世界生物圈保护区。Cat Ba国家公园据6种典型的热带石灰岩岛屿生态系统^[102-103]。

5.3 矿产资源

越南岩溶区的矿产资源丰富, 石灰岩通常被用于建筑行业, 越南是全球第八大水泥生产国, 水泥工业装机容量平均4 Mt·a⁻¹, 大部分的寺庙和宝塔建筑材料均为石灰岩, 最具代表性的是宁平省的Phat Diem教堂用天然的石灰岩和大理岩建造。除了石灰岩, 越南岩溶地层中还富存着铝土矿、铁矿、锰、锡砂矿、磷酸盐和稀土等矿产资源。石炭系—二叠系石灰岩中发育沉积型铝土矿、稀土矿、磷酸盐等矿产, 沉积型铝土矿形成与岩溶作用过程密切相关, 产于谅山省到董凡一带, 总储量达1 000 Mt, 例如高

平省(Cao Bang)的Bo Phun铝土矿床, 储量10 Mt, 品位50%; 稀土矿主要产于黄连山(Hoang Lien Son)山脉, 矿床储量7~8 Mt; 磷酸盐矿床主要产于谅山省(Lang Son)、清化省(Thanh Hóa)^[104]。泥盆系石灰岩地层发育铁矿和沉积型锰矿, 黄连山省(Hoang Lien Son)大型铁矿Qui Xa铁矿, 总储量118 Mt, 品位54%~60%, 形成于泥盆系石灰岩的大溶洞中^[105]; 泥盆系石灰岩中的锰矿主要位于高平省的Toc Tac, Ban Khuong地区。此外, 越南的铅锌矿主要产于河内北部的古生代石灰岩和岩溶洞穴中, 这些地区的矿产资源对越南的经济发展具有重要意义^[105]。

6 结 论

越南岩溶发育强烈, 具较大的岩溶资源潜力, 岩溶作用具以下特点:

(1)越南岩溶的分布受到地层岩性和构造运动的显著控制。从太古宙至全新世的地层中均有岩溶发育, 尤其是石炭系—二叠系和三叠系的厚层、纯石灰岩地层, 是岩溶作用的主要发育层位。越南的岩溶区与中国南方岩溶区相似, 同属于热带岩溶区, 具有相似的起源特征。温润多雨的气候条件和生物多样性的丰富性, 进一步加速了岩溶作用的过程。

(2)越南的岩溶区主要分为四大集中区域: 东北岩溶区作为中国南方岩溶的延伸, 与云南岩溶有着相似的起源; 西北岩溶区的地貌从西北向东南呈现出从岩溶高山到岩溶洼地丘陵再到平原的变化; 下龙湾岩溶区, 作为中国南方峰林型岩溶的延伸, 以海水峰林地貌著称, 被誉为“海上桂林”; 中部长山山脉岩溶区则以典型的石灰岩高原和庞大的洞穴系统而闻名。

(3)越南的岩溶水资源、矿产资源和景观资源均十分丰富。岩溶水已成为越南工农业和日常生活的主要用水来源。然而, 岩溶区人口众多, 尤其在旱季, 供水面临较大压力。在矿产资源开发方面, 越南处于较先进的水平, 是全球第八大水泥生产国之一。此外, 越南在平衡区域经济发展与生态保护方面取得了显著成效, 建立了包括世界地质遗产保护区和国家生态保护区在内的一系列保护区域。

参考文献

- [1] 韦延兰, 李文莉, 杨象鹏, 周立新. 泰国岩溶地质概述[J]. 中国

- 岩溶, 2021, 40(6): 1077-1091.
- WEI Yanlan, LI Wenli, YANG Xiangpeng, Zhou Lixin. Overview on karst geological of Thailand[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(6): 1077-1091.
- [2] 何师意, 袁道先, Do Tuyet. 越南北部岩溶特征及其相关问题[J]. *中国岩溶*, 1999, 18(1): 89-94.
- HE Shiyi, YUAN Daoxian, Do Tuyet. Characteristics of karst in Northern Vietnam and its relevant environmental problems[J]. *Carsologica Sinica*, 1999, 18(1): 89-94.
- [3] Fromaget J. L'Indochine française, sa structure géologique, ses roches, ses mines et leurs relations possibles avec la tectonique[J]. *Bull. Serv. Géol. Indochine*, XXVI, fasc, 1941, 2: 140.
- [4] Hoang Thieu Son. General geography, Vol. II -Karst[M]. Education Pub., 1965.
- [5] Birot P. Problems of karst morphology of Annam[J]. *Ann. Géogr.*, LXIII, 1954: 337.
- [6] Zubashenko M A. Vaprosy razvitya karsta servernego Vietnam (Problems of the development of karst in Vietnam)[J]. *Gidrogeologia I karstovyyedenye*, 1964, 2: 157-168.
- [7] Fridland V M. Nature of the soils in North Vietnam[M]. Vietnam: Science-Technology Publishing House, 1961.
- [8] Glazek J. On the karst phenomena in North Vietnam[J]. *Academ. Polon. Sci., Ser. Sci. Geol. Geogr*, 1966, 14(1): 45-51.
- [9] Nang D T. Karstic landforms in Vietnam[M]. Vietnam: Science-Technology Publishing House, 1979.
- [10] Khang P. The development of karst landscapes in Vietnam[J]. *Acta Geologica Polonica*, 1985, 35: 305-324.
- [11] Cilek V. Some remarks on the karst in Vietnam, especially in Thanh Hoa Province[J]. *Speleoforum*, 1988: 78-80.
- [12] Van 'Tan Ha. Nouvelles recherches préhistoriques et protohistoriques au Vietnam[J]. *Bulletin de l'École française d'Extrême-Orient*, 1980, 68: 113-154.
- [13] Joachim H, Herbert U. Menschwerdung-Biotischer und gesellschaftlicher Entwicklungsprozess[M]. Berlin: Akademie Verlag, 1985.
- [14] Simon E. Description d'un Arachnide cavernicole du Tonkin[J]. *Bulletin de la Société entomologique de France*, 1906, 11(2): 27.
- [15] Rehn J A G. Description of five new species of Orthoptera from Tonkin[J]. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 1906, 58 (2): 279-292.
- [16] Lindberg K. Revue des recherches biospéologiques en Asie moyenne et dans le sud du continent asiatique[J]. *Rassegna Speleol. Ital*, 1960, 12(2): 43-50.
- [17] Pham Khang. Présentation des régions karstiques du Vietnam[J]. *Karstologia*, 1991, 18(2): 1-12.
- [18] Dieu N T. Geography of Vietnam[M]. Gioi, Italy: Gioi Foreign Languages Publishing House, 1992: 182.
- [19] Do Tuyet. Characters of karst in north-west of Vietnam. In selected works on tropical karst study of Vietnam[M]. 1993: 41-44.
- [20] Do Tuyet. Overview on karst of Viet Nam. In: *Global karst correlation*[M]. Beijing: Science Press, 1998: 179-192.
- [21] Fénart P, Cat N N, Drogue C, Canh D V, Pistre S. Fracturation et karstification des formations calcaires de la baie d'Halong, Vietnam[J]. *Karst & Tectonics*, 1998: 75-78.
- [22] Do Tuyet. Characteristics of karst ecosystems of Vietnam and their vulnerability to human impact[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(3): 325-329.
- [23] Quan N V, Duc T T, Van H D. Landscapes and ecosystems of tropical limestone: Case study of the Cat Ba Islands, Vietnam [J]. *Journal of Ecology & Environment*, 2010, 33(1): 23-36.
- [24] Tao N D. Some data on diversity of aquatic plants and animals in karst area of Ninh Binh Province[C]//*Proceedings of the 4th National scientific conference on Ecology and Biological Resource*, Hanoi, 2011.
- [25] Cat N N. Carbonate rocks and karst waters in Vietnam[J]. *Cave & Karst Science*, 1994, 21(1): 7.
- [26] Masschelein J, Swennen R. Rural development in the mountain karst area of N. W. Vietnam by sustainable water and land management and social learning: Its conditions and facilitation[M]. *Project Proposal*, 1997: 40.
- [27] Tam V T, Vu T, Batelaan O. Hydrogeological characteristics of a karst mountainous catchment in the northwest of Vietnam[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001(3): 26-34.
- [28] Nguyet V, Goldscheider N. Tracer tests, hydrochemical and microbiological investigations as a basis for groundwater protection in a remote tropical mountainous karst area, Vietnam[J]. *Hydrogeology Journal*, 2006, 14(7): 1147-1159.
- [29] Vu T T, Batelaan O. A multi-analysis remote-sensing approach for mapping groundwater resources in the karstic Meo Vac Valley, Vietnam[J]. *Hydrogeology Journal*, 2011, 19: 275-287.
- [30] Lam N V, Ngoc N K, Hoang H V, Tuan N T, Nga N T. Characteristics of groundwater in karstic region in Northeastern Vietnam[J]. *Environ Earth Sciences*, 2013, 70: 501-510.
- [31] Nguyen N T, Pham N H, Pham X C, Nguyen T T H, Nguyen V L, Duong T T T. Application of multimedia methodology for investigation of karst water in highland regions of Ha Giang Province, Vietnam[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(2): 531-542.
- [32] Nguyet V, Thanh V P, Hai V D, Roi N D, Tra D. Hydrogeochemical characterization and groundwater quality of the dong giao karst aquifer in Tam Diep, Ninh Binh, Vietnam[J]. *Acta Carsologica*, 2016, 45(3): 233-242.
- [33] Limbert H. Caving in the nineties, Vietnam[J]. *Caves & Caving*, 1991, 52: 2-4.
- [34] Limbert H. The caves of Phong Nha & Hang Toi, Quang Binh Province, Vietnam[J]. *International Caver*, 1992, 2: 4-9.
- [35] Limbert H. Vietnam 1992: Return to the river caves of Quang Binh[J]. *International Caver*, 1992, 5: 19-25.
- [36] Limbert H. Vietnam—a caver's paradise[J]. *International Caver*, 1994, 12: 3-11.

- [37] Limbert H. The 1994 British/Vietnamese speleological expedition report[M]. 1995.
- [38] Limbert H. Vietnam' 97[J]. *International Caver*, 1997, 20: 11-18.
- [39] Limbert H. Vietnam 99[J]. *Caves and Caving*, 1999, 85: 24-27.
- [40] Limbert H, Limbert D. A caving reconnaissance to Vietnam & Laos[J]. *International Caver*, 1996, 16: 27-32.
- [41] Limbert H, Limbert D. Vietnam' 99. Cao Bang & Quang Binh[J]. *International Caver*, 1999, 25: 3-12.
- [42] Carrieri G. Cao Bang 94. La prima spedizione speleo italiana in Vietnam[J]. *Speleologia*, 1995, 32: 92-100.
- [43] Carrieri G. Cao Bang '95. II. spedizione speleo in Vietnam[J]. *Grotte*, 1995, 119: 34-52.
- [44] Cholin A. Explorations franco-italienne dans la province de Cao Bang, Vietnam[M]. *Actes 11^{ème} colloque de la spéléologie d'expédition, Spelunca Mémoires*, 1997, 22: 97-100.
- [45] Layton C, Jeffries H, Warild A. Caving in Vietnam[J]. *Australian Caver*, 1998, 143: 3-6.
- [46] Clucas D, Laumanns M. Vietnam. Cave documentation project [M]. *Descent*, 2010, 214: 27.
- [47] Laumanns M. Vietnam. Explorations spéléologiques dans le Sud du Vietnam[M]. *Spelunca*, 2010, 119: 5.
- [48] Masschelein J, Coessens V, Lagrou D, Duser M, Van T T. Northern Vietnam 1993–2006 Belgian-Vietnamese speleological projects in the provinces of Bac Kan, Ha Giang, Hoa Binh, Lai Chau and SonLa[M]. *Berliner Höhlenkundliche Berichte*, 2007, 22: 212.
- [49] Long V T, Du H V. Zoological species belonging to the Pleistocene and the geochronology of sedimentscontaining them in caves and grottoes in Northern Viet Nam[J]. *Khao Co Hoc*, 1981, 1: 16-19.
- [50] Long V T, de Vos J, Ciochon R S. The fossil mammal fauna of the Lang Trang caves, Vietnam, compared with Southeast Asian fossil and recent mammal faunas: The geographical implications[J]. *Bulletin of the Indo-Pacific Prehistory Association*, 1996, 14: 101-109.
- [51] Shear W A. A new genus and specis of callipodidan milliped from Vietnam (Callipodida, Schizopetalidae)[J]. *Virginia Mus, of Nat. History*, 2000, 6(11): 95-100.
- [52] Gurm J. *Encyclopedia of caves and karst science*[M]. London: Routledge, 2004.
- [53] Juberthie Chr, Decu V. *Encyclopaedia Biospelologica*[M]. Moulis: Société de Biospéologie, 2001.
- [54] Deharveng L, Le Cong Kiet, Man L C. Hot issues in karst conservation: The biodiversity of Hon Chong hills (Southern Vietnam), with emphasis on invertebrate endemism[C]//International Transdisciplinary Conference on Development and Conservation of Karst Regions, Hanoi Vietnam, 2004: 40.
- [55] Vermeulen J J, Phung L C, Truong Q T. New species of terrestrial mollusces (Caenogastropoda, Pupinidae & Pulmonata, Vertiginidae) of the Hon Chong–Ha Tien limestone hills, Southern Vietnam[J]. *Basteria*, 2007, 71: 81-92.
- [56] Bacon A M, Demeter F, Schuster M, Long V T, Thuy N K, Antoine P O, Sen S, Nga H H, Huong N M. The Pleistocene of Ma U'O'i cave, Northern Vietnam: Palaeontology sedimentology and palaeoenvironments[J]. *Geobios*, 2004, 37: 305-314.
- [57] Demeter F, Bacon A M, Thuy N K, Long V T, Matsumura H, Nga H H, Schuster M, Huong N M, Coppens Y. An archaic Homo molar from Northern Vietnam[J]. *Current Anthropology*, 2004, 45(4): 535-541.
- [58] Demeter F, Bacon A M, Thuy N K, Long V T, Durringer P, Roussé S, Coppens Y, Matsumura H, Dodo Y, Mai H N. Discovery of a second human molar and cranium fragment in the Late Pleistocene cave of Ma U'O'i (Northern Vietnam) [J]. *Journal of Human Evolution*, 2005, 48: 393-402.
- [59] Hutchison C. *Geological evolution of Southeast Asia*[M]. New York: Oxford University Press, 1989.
- [60] Tong Dzuy Thanh, Vu Khuc. *The stratigraphy of Vietnam*[M]. Netherlands: Verenigde Nederlandse Uitgeversbedrijven, 2006.
- [61] Le Van De. Outline of plate-tectonic evolution of continental crust of Vietnam[C]//Dheeradilok P. *Proceedings of the International Conferences on Stratigraphy and Tectoinc Evolution of Southeast Asia and the South Pacific*, 1997: 832-847.
- [62] Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia. In: Coward MP, Ries AC (eds). *Collision tectonics*[M]. 1986: 115-157.
- [63] Cai J X, Zhang K J. A new model for the Indochina and South China collision during the Late Permian to the Middle Triassic[J]. *Tectonophysics*, 2009, 467: 35-43.
- [64] Tran Thanh Hai. Deformational features of Northeastern Vietnam. In: Tran Van Tri, Vu Khuc (eds). *Geology and natural resources of Vietnam*[M]. Natural Sciences and Technology Publishing House, 2009: 408–415.
- [65] Hai T T, Dang B V, Chi K N, Que D H, Nguyen Q M. Structural controls on the occurrence and morphology of karstified assemblages in Northeastern Vietnam: A regional perspective[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 70(2): 511-520.
- [66] Metcalfe I. Permian tectonic framework and paleogeography of SE Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 20(6): 551-566.
- [67] Carter A, Roques D, Bristow C, Kinny P. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic thermotectonism (Indosinian orogeny) in Vietnam[J]. *Geology*, 2001, 29: 211-214.
- [68] Lepvrier C, Vuong N V, Maluski H, Thi P T, Vu T V. Indosinian tectonics in Vietnam[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2008, 340: 9211.
- [69] Nakano N, Osanai Y, Owada M, Nam T N, Toyoshima T, Binh P, Tsunogae T, Kagami H. Geologic and metamorphic evolution of the basement complexes in the Kontum Massif, central Vietnam[J]. *Gondwana Research*, 2007, 12: 438-453.
- [70] Tran Duc Luong, Nguyen Xuan Bao. Geological map of continental part of Vietnam, 1:1,500,000[Z]. Socialist Republic of

- Vietnam General Department of Geology, 1986.
- [71] Tran Van Tri. Geological map of Vietnam, 1:1,000,000[Z]. General Department of Mines and Geology of the Democratic Republic of Vietnam, 1973.
- [72] 王宏, 林方成, 李兴振, 施美凤. 老挝及邻区构造单元划分与构造演化[J]. *中国地质*, 2015, 42(1): 71-84.
WANG Hong, LIN Fangcheng, LI Xingzhen, SHI Meifeng. The division of tectonic units and tectonic evolution in Laos and its adjacent regions[J]. *Geology in China*, 2015, 42(1): 71-84.
- [73] 吴良士. 越南社会主义共和国地质构造与区域成矿[J]. *矿床地质*, 2009, 28(5): 725-726.
- [74] Vietnam Meteorological and Hydrological Administration. National Center for Hydro-meteorological Forecasting. <https://nchmf.gov.vn/KttvsiteE/en-US/2/index.html>.
- [75] Averyanov L, Hiep N T, Loc P K. Flora and vegetation of areas allied to Phong Nha—Ke Bang[M]. Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012.
- [76] Phong Nha-Ke Bang national park. United Nations Environment Programme and World Conservation Monitoring Centre, Vietnam. 2011.
- [77] Nguyen Q M. Karst in Vietnam[R]. Department of Geography and Geology Internal Report, 1992.
- [78] Denneborg M, Laumanns M, Schnadwinkel M, Voigt S. German speleological campaign Cambodia 95/96[J]. *Berliner Höhlenkundliche Berichte*, 2002, 6: 87.
- [79] Dusar M, Zhang S Y. Geological and speleological reconnaissance of the east Yunnan karst (P.R.China)[M]. Brussels, Belgium: Ministerie van Economische Zaken, Belgische Geologische Dienst, 1991.
- [80] Ha P V, Van T T, Tin Q D, Ho H H, Nguyen D T, Nguyen Q H. Geoheritage values of the Dong Van Karst Plateau Geopark: A quantitative geomorphological and topographic analysis[J]. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 2013, 59: 13-17.
- [81] Huu N D, Huong D T. Outcrop of dolomite in lower part of Dong Giao Formation, NW Vietnam[J]. *Vietnam Journal of Geology*, 2012, 329: 46-55.
- [82] Tuyet D, Tuy P K, Ke T D. Karst geology research in the Northwest[M]. Archives Institute of Geosciences and Mineral Resources, 1998
- [83] Laumanns M, Piece L. Atlas of the Great Caves and the Karst of Southeast Asia, Part 2: Myanmar-Vietnam[M]. Berlin, Germany: Berliner Höhlenkundliche Berichte, 2010.
- [84] <https://www.vietnamcaves.org>.
- [85] Limbert H, Limbert D, Nguyen Hieu, Phái V V, Bac D K. Significant discoveries in the cave systems of Phong Nha—Ke Bang National park from 2003 to 2013[R]. Hanoi University of Science, VNU, 2013.
- [86] Limbert H, Limbert D, Hieu N, Phái V V, Bac D K, Phuong T H, Granger D. The discovery and exploration of Hang Son Doong[J]. *Boletín Geológico y Minero*, 2016, 127(1): 165-176.
- [87] Limbert H. Vietnam 2009: A joint British and Vietnamese caving expedition[R]. 2009.
- [88] Coessens V. Vietnam-Expedition logs Cong Nuoc as new deepest cave[J]. *Descent*, 2002, 165: 24-25.
- [89] Masschelein J. Expedition Belgo-vietnamienne: -600 m pour le Cong Nuoc. Le Vietnam, une couleur souterraine[J]. *Spéléo*, 2002, 41: 8.
- [90] A D Bank. Viet Nam-Environment and Climate Change Assessment[M]. Mandaluyong City, Philippines: Asian Development Bank, 2013.
- [91] Lam N V, Ngoc N K, Hoan H V, Tuan T Q, Nga N T. Characteristics of groundwater in karstic region in Northeastern Vietnam[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(2): 501-510.
- [92] Van Q N, Duc T T, Van H D. Landscapes and ecosystems of tropical limestone: Case study of the Cat Ba Islands, Vietnam[J]. *Journal of Ecology and Field Biology*, 2010, 33(1): 23-36.
- [93] Govers P D G. Rural development in mountain karst areas of NW Vietnam by sustainable water and land management and social learning: Its conditions and facilitations[R]. 1998.
- [94] Van T T, Trung N D, Tuat L T. Potential and progress of geopark development in Vietnam[C]//Proceedings of International Symposium on Geology, Natural Resources and Hazards in Karst Regions, 2009: 117-129.
- [95] <https://halongbay.com.vn/>.
- [96] <http://trangandanhthang.vn/>.
- [97] <https://phongnhakebang.vn/>.
- [98] An L D, Khanh U D. Karst geomorphologic heritage of Dong Van-Meo Vac plateau: Valuable tourism resources[C]//Proceedings of International Symposium on Geology, Natural Resources and Hazards in Karst Regions, 2009: 65-67.
- [99] <http://dongvangeopark.com/>.
- [100] <http://caobangeopark.com/>.
- [101] <http://www.babenationalpark.com.vn/>.
- [102] Phuong T H, Cu N H, Thanh T D, Dong B V. Geoheritage values in the Cat Ba islands, Vietnam[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(2): 543-548.
- [103] <https://catbanationalpark.vn>.
- [104] Imrich K. Mineral resources of Vietnam[J]. *Acta Montanistica Slovaca*, 2000, 2: 165-172.
- [105] Le T X. Geology and mineral resources of Vietnam[M]. Vietnam: Department of Geology and Minerals of Vietnam, 1988: 217.

Overview on karst geology of Vietnam

WEI Yanlan^{1,2}, LI Wenli^{1,2}, HUANG Chenhui^{1,2}, ZHOU Lixin^{1,2}, YANG Xiangpeng^{1,2}

(1. *Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR/International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin, Guangxi 541004, China*; 2. *Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi, 531406, China*)

Abstract Karst is widely distributed in Vietnam, covering almost 60,000 km², approximately 20% of the total area of Vietnam. Most karst rocks crop out in North and Central Vietnam. Karst developed with peak-clusters, peak-forests, caves, etc. is sparsely distributed in the south of Vietnam. Based on previous research, the geological map of karst distribution in Vietnam was drawn up, combined with remote sensing image, geological map, and cave atlas. In terms of geological structure, lithology combination, hydroclimate in Vietnam, conditions of karstification in this country were analyzed. From the perspective of regional geology, the characteristics of karst geology and geomorphology, karst distribution and the present situation of karst resources in Vietnam were investigated.

Karst in Vietnam is distributed in the tropical karst belt, with similar origins of karst in South China. The distribution law of karst in Vietnam is mainly controlled by stratigraphic lithology and tectonic movement. Karst is developed in all the pre-Cambrian and Holocene strata and the pure limestone strata of Carboniferous, Permian and Triassic with a thickness of 1,000–2,000 m are the main beds of karst development. The warm and rainy climate and rich biological diversity accelerate karstification.

There are four major karst zones in Vietnam, including peak-clusters and peak-forests in the northeast, peak-forests in Ha Long Bay and karst mountain along Truong Son Ra karst in the northwest. The karst area in northeast is an extension of the karst from South China, with the development of alpine karst landforms, peak-forests, peak-clusters, large drainage gullies and sinkholes. Sinkholes are extremely developed, with an average 1.4 sinkholes per square kilometer. The karst landforms vary from plateaus to depressions and hills and finally to plains from northwest to southeast, showing a complete evolution of tropical karst geomorphology. There are karst landforms such as large and deep poljes, deep gullies and caves. The vertical distance of Conh Nuoc cave, the deepest cave, is 600 m. The peak-forest along Ha Long Bay is an extension of the peak-forest of South China. In the central part, karst is distributed along the Truong Son Ra. Phong Nha Cave currently known as the longest cave in Vietnam is located in the famous karst area of Phong Nha-Ke Bang. The Phong Nha cave system is composed of 20 caves, more than 60 km in length, where is located the longest river cave and the cave with the largest passage in the world.

Vietnam is rich in karst water, karst mineral and karst landscape resources. At present, karst water has become the main water source for industry, agriculture and life in Vietnam, but water supply is in serious shortage, especially in the dry season. Vietnam is at an advanced level in the exploitation of karst mineral resources and is currently the eighth largest cement producer in the world. Remarkable achievements have been made in balancing regional economic development and ecological protection, and a series of world geological heritage reserves and national ecological reserves have been established in karst areas.

Key words Vietnam, karst geology, karst landscape, karst resources

(编辑 张玲)