

岩溶成景过程与地层、构造等稳定要素及 水、空气等变化要素间关系的研究

韦跃龙, 李成展, 罗劭侃

中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西桂林 541004;
自然资源部、广西壮族自治区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;
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: 某一岩溶区的成景过程与地层、构造等稳定要素及水、空气、气候等变化要素之间相互作用构成一个复杂、动态、多期循环、彼此相似却又差异明显的岩溶成景系统, 并通过不同的成景过程(即成景响应子系统)分别形成既表现出共同的区域、时期、类型等特征, 又具有不同发育特征的各种景观单体(即输出子系统)。其中: (1)地层和构造要素分别构成了成景系统的物质和内动力子系统, 共同从宏观上控制着成景过程的格局、特征(包括方式、强度、幅度等)、极限等。(2)水、空气、气候、生物、土壤等是成景系统相对活跃的外驱动要素, 分别直接或间接为成景过程提供不同的外动力条件, 共同构成成景系统的外部输入和外动力子系统, 对系统的运行、演变起着关键的引导和调节作用, 直接或间接控制着成景过程和特征。(3)以某一次区域地壳隆升影响程度由强渐弱为时间界限和主线, 将某一成景周期划分为“可溶岩出露和分割(一期区域间歇性构造运动时期)→雏形(区域构造平稳前期)→重要发育和成型(区域构造平稳中期)→继承性改造和发育(区域构造平稳后期)”4个阶段, 分别对应着差异明显的成景特征。(4)区域岩溶作用继续按这4个阶段进行多期周期性循环发育, 期间岩溶区的不同部位(即地表、地下及地表与地下之间)分别进行着不同的成景过程, 并分别形成对应三大类景观, 而它们之间的关系则由各向分散、彼此独立→彼此制约、协同共生演替。

关键词: 岩溶景观; 稳定要素; 变化要素; 岩溶成景过程

中图分类号: P931.2 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2024.072501

Factors Influencing the Process for Karst Landscape Formation: Stable (Strata and Structure, etc.) and Changing (Water and Air, etc.) Factors

WEI Yuelong, LI Chengzhan, LUO Qukan

*Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004;
Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Natural Resources & Guangxi Zhuang Autonomous Region/International Research
Center on Karst under the Auspices of United Nations Education, Scientific and Cultural Organization, Guilin, Guangxi 541004;
Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi 531406*

Abstract: Interactions among landscape formation processes, stable factors such as strata and structure, and dynamic factors such as water, air, and climate in a specific karst area, form a complex, dynamic, multi-period cyclic system for karst landscape formation (SKLF). These periods exhibit similarities and differences, contributing to the unique characteristics of each cycle. Different processes for karst landscape formation (PKLF), represent the response subsystem of landscape formation, resulting in the formation of various landscape elements (i.e., output subsystems). These elements exhibit characteristics of certain regions, periods, and types, while also

本文由广西-东盟岩溶景观资源可持续利用研发示范平台项目(广西科技基地和人才专项)(编号: 桂科 AD21196001)、山东泰山产业
领军人才项目(编号: tscy20200416)和国家自然科学基金面上项目(编号: 42172287)联合资助。

收稿日期: 2024-01-09; 改回日期: 2024-06-22; 网络首发日期: 2024-07-29。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 韦跃龙, 男, 1973 年生。博士, 正高级工程师。长期从事岩溶景观的探测、研究、开发和保护。E-mail: 49100541@qq.com。

displaying distinct development attributes. Among them: (1) strata and structural factors constitute a material and endogenetic force subsystem impacting SKLF, jointly controlling the pattern, characteristics (e.g., mode, intensity, and amplitude), and limits of the PKLF at a macroscopic level. (2) Water, air, climate, biology, soil, and other factors are relatively active external SKLF driving factors that directly or indirectly provide various external dynamic conditions for the PKLF. These factors constitute an external input and exogenous force subsystem of the SKLF. They critically guide and adjust SKLF operation and evolution by directly or indirectly controlling PKLF features. (3) Considering the degree of influence of regional crustal uplift (ranging from strong to weak) as the time limit and the main line, a single cycle of karst landscape formation can be divided into four stages: soluble rock exposure and segmentation stage (phase-I intermittent regional tectonic movement period), embryonic stage (early stage of stable regional geologic structure), important development and formation stage (middle stage of stable regional geologic structure), and inherited transformation and development stage (late stage of stable regional geologic structure). These features correspond to the distinct characteristics of karst landscape formations. (4) Regional karstification continues to develop in multi-stage cycles incorporating these four stages. During this process, different parts of the karst area (surface, underground, and between surface and underground) undergo various PKLF activities, leading to the formation of three corresponding landscape types. Over time, the relationships between these landscape types from being dispersed and independent to interdependent, where they restrict and support each other in synergistic symbiotic succession.

Key words: karst landscape; stable factors; changing factors; the process for karst landscape formation (PKLF)

岩溶成景过程, 以特征相似却又差异明显的可溶性岩层(本文仅限于碳酸盐岩)为物质基础, 以总体由强渐弱的区域地壳隆升为内动力, 以复杂多样、因地而异、适时变化的地表水和地下水为最主要的外动力, 通过内(如隆升、下降等)、外动力(如侵蚀、溶蚀、风化、沉积、搬运、崩塌等)两大成景过程, 形成千姿百态的景观; 期间, 成景过程和特征与所处区域的地层、构造等稳定要素及水、空气、气候等变化要素息息相关, 并随着时间和空间的不同而呈现出广泛的差异性和多样性。

长期以来, 国内外众多研究者从各种不同的角度对岩溶成景过程进行了广泛研究: (1)运用地层学、沉积学、构造地质学、水文地质学等传统地质理论, 重点探讨岩溶地貌形成演化的基础理论, 取得了如溶蚀理论(任美鄂等, 1983)、岩溶旋回(幼年期→青年期→中年期→老年期)、8个岩溶演化模式(卢耀如, 1986)、岩溶动力学(袁道先, 2006)、同时态演化(朱学稳, 2009)、表层岩溶带(蒋忠诚等, 1999)、岩溶垂直分带、岩溶孤岛和岛链式成景模式(韦跃龙, 2009; 韦跃龙等, 2010, 2016, 2018a, b, c, d, 2020)等成果。(2)从区域地质背景, 如地层、构造、水文地质、沉积环境(张美良等, 2013)及同位素、微量和痕量元素等(Finch et al., 2001; Johnson et al., 2006; 刘戡等, 2013; Krajcarz et al., 2014; Onac et al., 2014)角度, 区域自然地理环境, 如古气候、古环境及现代土壤(王明达等, 2010; Baker et al., 2016)、植被(Li et al., 2014)、气候变化(Dorale et al., 1998)、季节变化(阮骄杨等, 2010)等各种不同的角度, 对各种不同类型岩溶景观(如洞穴及其次生化学沉积物、峡谷等)

或不同区域岩溶景观(如广西、山东等省/区级区域, 以及广西乐业、都安, 重庆奉节, 贵州织金、绥阳等县级/公园/景区区域)的形成演化(韦跃龙, 2009, 2020, 2022; 韦跃龙等, 2010, 2018a, b, c, 2019, 2020)进行了广泛的研究。(3)运用同位素、测年、微量和痕量元素、X射线等试验和测试技术, 结合成景过程中(主要是洞穴沉积物)同位素、微量元素、X射线等的变化, 探讨或重建成景过程中记录的较小时间尺度(多是十万年之内)的区域古气候和古环境的变迁(薛治国等, 2014; Campmas et al., 2015; González-Lemos et al., 2015)。以往研究多注重探讨单一要素(或地层岩性、或构造活动、或水文地质条件、或古气候环境, 或现代气候, 或某同位素、元素等)对不同类型或不同区域岩溶景观成景的影响研究, 而对不同地质时期或不同区域岩溶景观成景过程与各成景要素之间复杂多变的响应关系、过程和特征等则研究较少。

本文运用岩溶地貌形成演化的机制和原理, 结合动态响应的方法和系统的观点, 创立并概括岩溶成景系统及其构成、特征和成景机理, 分析岩溶成景过程与地层、构造等稳定要素及水、空气、气候等变化要素间的响应关系, 反演模拟分析不同岩溶成景阶段的特征, 以期对岩溶成景过程研究提供一种新的视角、思路和模式。

1 岩溶成景系统的构成和特征

某一岩溶区的成景系统由稳定要素(即物质和内动力子系统)、变化要素(即外部输入和外动力子系统)、成景过程(即成景响应子系统)、岩溶景观(即

输出子系统)等四大部分(即四大子系统)构成(图 1, 图 2), 既具有复杂性(即各构成部分的复杂多变, 既有区域、类型、规模等之间的差异, 还有成景周期、动态变化等之别)、动态性(即各构成部分间的关系总在不断变化、相互响应之中)、非线性(即各构成部分之间的非线性关系)、渐变性(指溶蚀、侵蚀、

钟乳石形成等缓慢发生的渐变过程)、突变性(指地壳隆升、地震等急剧变化的突变过程)、非感知性(指溶蚀、风化、钟乳石形成等很难被人类察觉的过程)、差异和多样性(指在区域和时序上的差异性和多样性原理, 即不同区域不同时期、同一区域不同时期、同一时期不同区域的岩溶成景系统是不同且适时

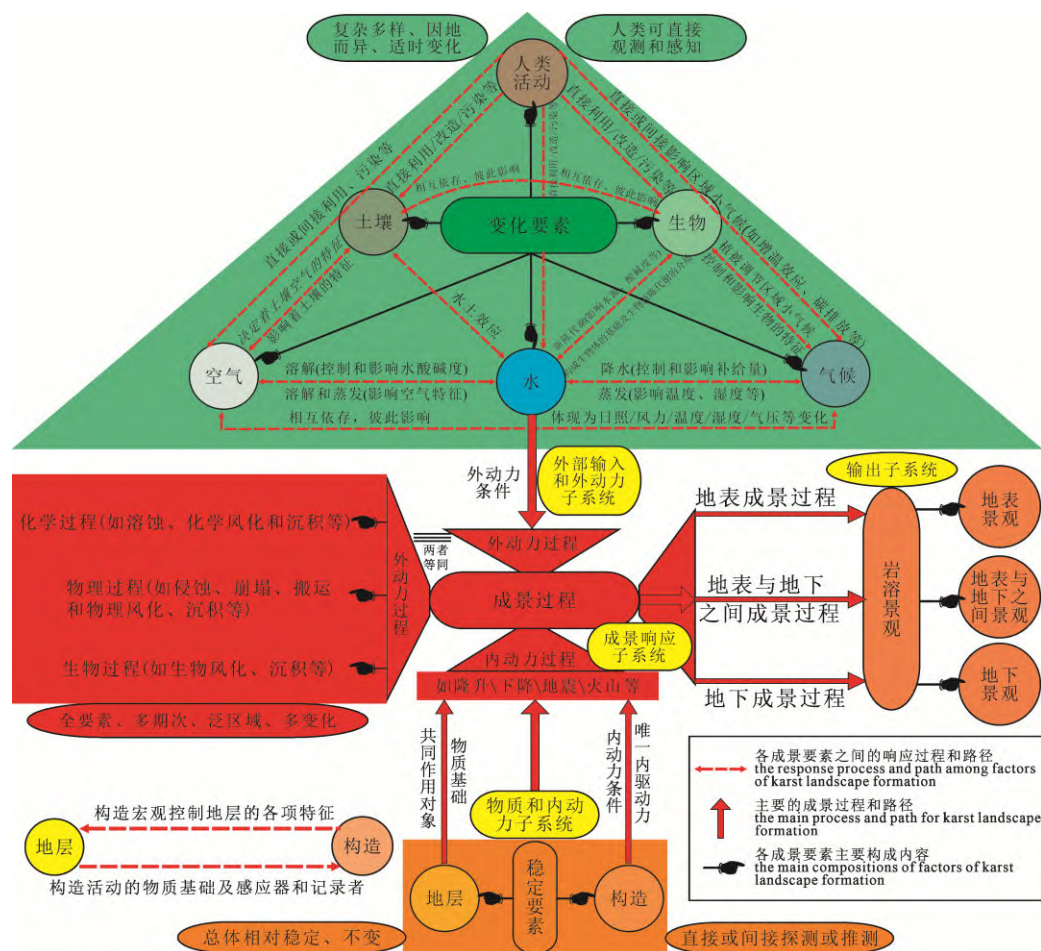


图 1 岩溶成景系统各构成部分相互关系示意图

Fig. 1 Sketch map of the interrelationship of various components of the system for karst landscape formation

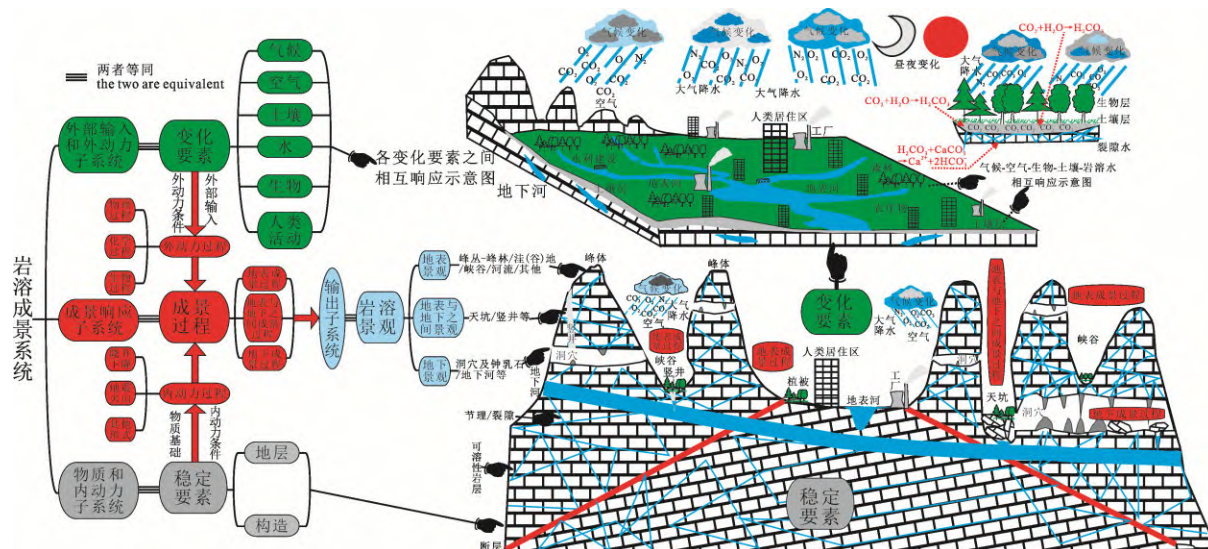


图 2 岩溶成景系统构成示意图

Fig. 2 Sketch map of the constitution of the system for karst landscape formation

变化的,表现出广泛的差异性和多样性)等特征,又表现出一般性(指不同时期、区域、类型、规模岩溶景观的成景要素和形成机理往往是相同或是相似的)、感知性(指地震、崩塌等人类能直接感知的过程)等特征。

某一岩溶区的地层、构造等稳定要素与水、空气、气候等变化要素之间并不相互独立、割裂,彼此之间存在着复杂的“网”式反馈关系,它们共同交叉融合于岩溶成景过程,相互构成一个复杂、动态、多期循环、彼此相似却又差异明显(如形态特征、各要素影响权数变化等)的岩溶成景系统,并通过不同的成景过程分别形成千姿百态的岩溶景观(图 1, 图 2),其中:成景地层是前提和物质基础;构造运动从内部控制和影响成景过程,是必要的内动力条件;变化要素从外部直接或间接影响成景过程,是必要的外动力条件;各种成景要素相互响应并形成具有相同机理却又千变万化的成景过程,既有缓慢渐变、规模/强度相对弱却无时不在的外动力过程:不同的物理(如侵蚀、崩塌、搬运等)、化学(如溶蚀等)、生物(如生物风化等)过程;又有急剧突变、规模/强度极大却无法预知的内动力过程(如隆升、下降、地震等),分别形成(即输出,文中各处相同)既表现出共同的区域、时期、类型等特征,又具有不同发育特征的各种景观单体,即同一区域、时期、类型的岩溶景观均具有共同的特征,但每个岩溶景观的规模、形态等发育特征都是独一无二的。

而目前的岩溶景观,是其动态成景过程中某一短暂时期内形态的呈现。

2 岩溶成景过程与地层、构造等稳定要素间关系的分析

地层和构造,总体相对稳定、不变,统称为稳定要素,分别构成了岩溶成景系统的物质和内动力子系统(图 1~图 4)。

2.1 岩溶成景过程与地层要素的关系

地层要素,主要包括可溶岩和岩溶水赋存条件 2 大子要素(图 1~图 3),其中:前者包括分布形式(如片状、条带状、厚薄、夹层等)、分布面积、岩性、埋藏、厚度、产状、可溶性、破碎程度等内容和特征,并决定着后者的根本特征;后者包括岩溶水赋存条件(如节理/裂隙发育率、储水空间、汇集条件、富水性等)、含水岩组(如碳酸盐岩类等)等内容和特征,它是前者与构造、水等其他要素相互响应的具体产物。它们两者在成景过程中各自扮演着不同的角色:(1)可溶岩,为构造、水等其他要素和成景过程提供共同的物质基础,并与构造共同从宏观上控制着成景过程的格局、特征(包括方式、强度和幅度等)、极限等,如纵向上,岩性、厚度等的差异,从物质基础上限定了发育的强度和幅度:厚度越大,岩溶纵向发育规模、强度相对越强,如广西红水河上中游流域的各岩溶区发育着众多大型洞穴、地下河系统、高峰丛深洼地、天坑、天窗等;反之,厚度较小,岩溶纵向发育规模、强度相对越弱,如柳州、桂林等岩溶区的峰丛洼地、洞穴、地下河等的规模远小于前者(韦跃龙, 2009, 2020, 2021, 2022; 韦跃龙等, 2010, 2016, 2018a, b, c, d, 2020);又如贵州绥阳白云岩景观与中国各地灰岩景观之间的相似和差异(韦跃龙等, 2018c; 韦跃龙, 2021);再如中国北方和南方岩溶景观的差异(韦跃龙等, 2020)。(2)岩溶水赋存条件通过其特征宏观上控制着水要素的动力特征(包括类型、水量、流向、渗透、循环、分带等特征)及相应的成景特征。

2.2 岩溶成景过程与构造要素的关系

构造要素,主要包括地史期间构造运动及现存的地质构造和构造势能等 3 个子要素(图 1, 图 2, 图 4),其中:前者包括类型(如隆起或凹陷等)、区域、强度、持续时间、间歇性等内容和特征,

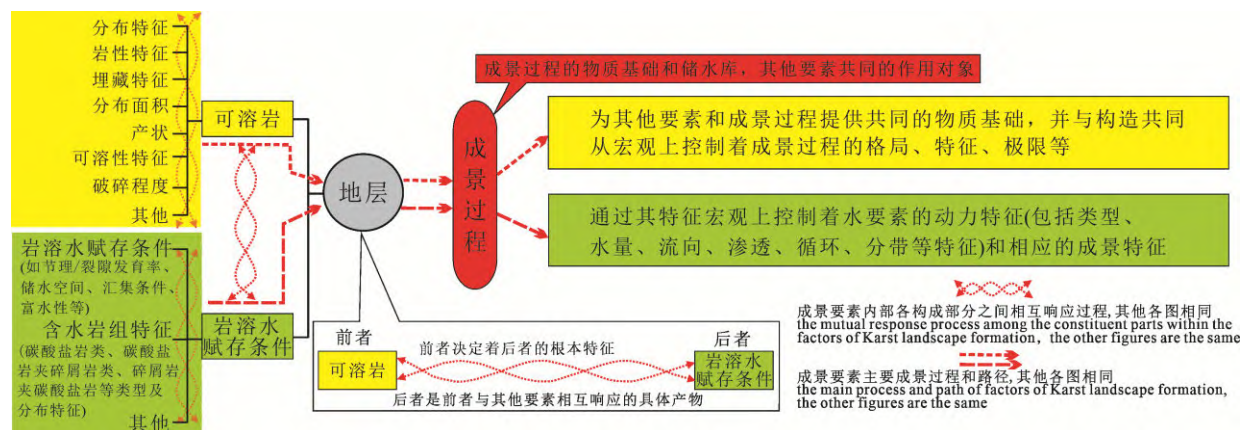


图 3 岩溶成景过程与地层要素关系示意图

Fig. 3 Sketch map of the interrelationship between the karst landscape forming process and strata

它能引起后两者的间歇性反复活化,是根本,通过间歇性隆起为成景过程提供延续时间漫长(几万年至几十万年,取决于间歇期长短)但总体逐渐减弱且惟一的内动力条件,直接控制着成景过程的期次及每期持续时间的长短等,并和地层共同宏观控制着成景过程的格局、特征、极限等,是成景过程宏观演变的主轴;中者包括断裂、褶皱、节理、裂隙、孔隙、接触面、构造应力等内容和特征;后者包括地形、地势、比降、侵蚀基准面等内容和特征;后两者,则是前者在不同时间和空间的感应器和记录者,并宏观上控制着区域水要素的补给、径流、排泄及地表水与地下水关联等特征和相应的成景特征:如大型洞穴/地下河系统大多分布于“构造空白区”——即没有大断裂、褶皱穿过,但节理、裂隙十分发育的区域,如贵州绥阳双河洞洞穴系统(韦跃龙等, 2018c)、广西乐业百朗和都安地苏地下河系(韦跃龙等, 2018a, d)等。

3 岩溶成景过程与水、空气等变化要素间关系的分析

水、空气、气候、生物、土壤等要素(图 1~图 2 及图 5~图 9), 变化时间相对短暂(多为几分钟至几天(如水、空气、风等), 或几年至几十年(如气候、土壤、生物等)), 人类可直接观测和感知, 总体具有复杂、多样、因地制宜、适时变化的特征, 故统称为变化要素, 是成景系统相对活跃的外驱动要素(水、空气、气候、生物、土壤的活跃和驱动

程度总体依次降低), 分别直接或间接为成景过程提供不同的外动力条件, 共同构成成景系统的外部输入和外动力子系统, 对成景系统的运行、演变起着关键的引导和调节作用, 直接或间接控制着成景过程和特征。

3.1 岩溶成景过程与水要素的关系

水要素(图 1, 图 2, 图 5), 分为地表水和地下水两大要素, 对其他要素的变化极为敏感, 直接为成景过程提供复杂、多样、因地制宜、适时变化的水动力条件, 是成景系统最为活跃的要素和最重要的外驱动力, 起着关键的引导和调节作用, 直接控制着成景过程、特征及不同岩溶区之间的差异和关联程度。

3.1.1 地表水

地表水子要素, 主要包括地表水类型(如暂时性、季节性、常年性等流动类型, 或河流、湖泊等水体类型)和特征、水动力(包括水道、流向、水深、流动方式、水量、水动力、水温及季节变化、动态变化等)、水化学(如 Ca^{2+} 型或 Mg^{2+} 型、矿化度、pH 值等)、补-径-排、与地下水相连特征等内容, 其水量多寡直接受控于所处区域的降水量。

通过类型及水动力、水化学、补-径-排等特征的变化, 地表水为地表岩溶成景过程提供直接的外动力条件, 并直接控制和影响地表岩溶的成景特征; 其次还通过物理、化学、生物等方式转换为地下水, 为地下岩溶成景过程提供间接的外动力条件, 并从宏观上控制地下岩溶的成景特征(图 5);

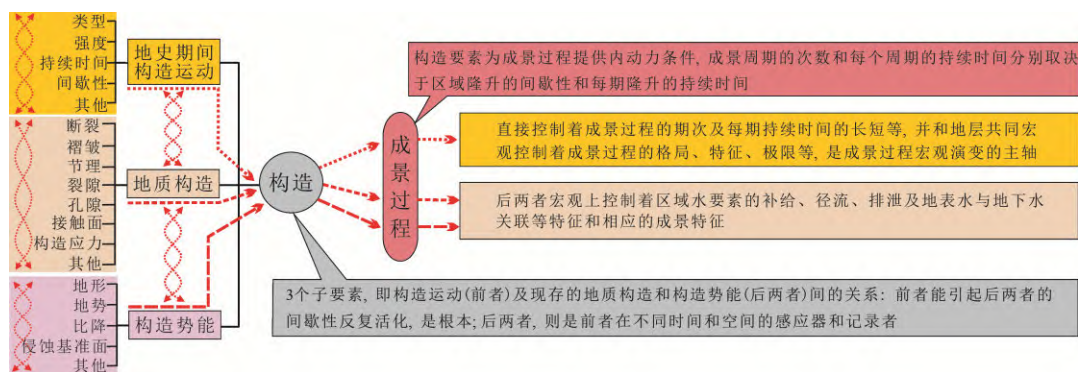


图 4 岩溶成景过程与构造要素关系示意图

Fig. 4 Sketch map of the interrelationship between the karst landscape forming process and geologic structure elements

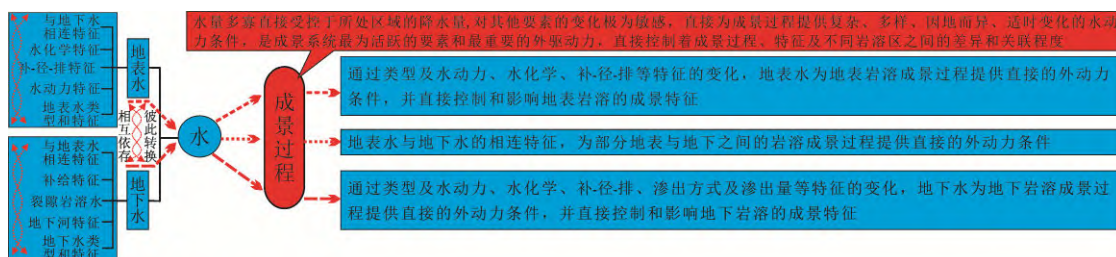


图 5 岩溶成景过程与水要素关系示意图

Fig. 5 Sketch map of the interrelationship between the karst landscape forming process and water activity

期间,气候变化和陆地表面各要素(包括地层、构造、空气、土壤、植被、人类活动等)的任何变化,都将会引起地表水直接、及时或间接/直接、长期的响应,如暴雨过程总是伴随着各类地表水水量、水动力的暴涨(直接、及时),不同覆盖率的植被对地表水具有不同的再分配(或调蓄)作用(间接、长期,几十至几百年),人类拦河建坝、排污等行为直接引起地表水/地下水水动力、水化学等特征的变化(直接、及时),地表水/地下水的类型、流向、水道等与区域构造和地层的分布特征密切相关(直接、漫长,至少一个成景周期)等。

3.1.2 地下水

地下水水量多寡直接受控于所处区域的降水量,主要包括地下水类型和特征(如裂隙水、管道水等类型及相互转换关系、构成比例等特征)、地下河特征(如构成、流向、水道、水深、流动方式、水量、水动力、水温、水化学、季节变化、动态变化和补-径-排等)、裂隙岩溶水(如渗出方式及渗出量等)、地下水补给特征、与地表水相连特征等内容。

成景期间,通过类型及水动力、水化学、补-径-排、渗出方式及渗出量等特征的变化,地下水为地下岩溶成景过程提供直接的外动力条件,并直接控制和影响地下岩溶的成景特征(图 5);期间,地表水和陆地内部各要素(包括地层、构造、空气、土壤、生物等)的任何变化,都将会引起地下水直接、及时或间接、相对滞后的响应:如土壤、植被变化将导致裂隙岩溶水水化学特征、渗出量等的直接变化(直接、及时);绝大部分地下河的洪峰、枯水期往往分别滞后于对应地表暴雨期或干枯期 3~10 d、月余甚至更长(达半年以上)(间接、相对滞后);洞壁裂隙水的渗出量往往滞后地表降水 3~10 d,甚至更长(间接、相对滞后);由地表水、空气、植被、人类等短暂引起(如排污等)的地下水水质变化往往持续几年至几十年的时间(长期);地下水的流向、水道、水动力等及裂隙水渗出方式等与区域构造和地层的分布特征密切相关(漫长,至少一个成景周期)等。

同时地表水与地下水的相连特征(如相互交换的位置、方式、水量等)(韦跃龙等, 2010, 2018a, 2019),为部分地表与地下之间的岩溶成景过程提供直接的外动力条件,并具体控制着相应景观(如竖井等)的成景特征;还宏观控制着天坑、天窗等的出露位置,其往往与地表水与地下水交换的位置一致;也与天坑、天窗等的退化过程密切相关。

3.2 岩溶成景过程与空气要素的关系

空气要素(图 1, 图 2, 图 6),分为地表空气(指自由流动于地表的空气)和地下空气(指自由流动

或贮存于地下的空气,含洞穴/地下河空气、土壤空气和裂隙空气 3 种亚类)两大子要素,主要包括含量、污染、位置、溶解、交换等内容和特征,具有复杂、多样、因地制宜、适时变化的特征,主要通过与水之间的溶液反应参与成景过程,并为其提供间接的外动力条件(主要是水酸碱性),对系统的运行、演变起着关键的调节作用,间接控制着系统的成景特征及相应岩溶景观的发育特征。

3.2.1 地表空气

地表空气(图 6),主要通过溶解(主要是降雨过程中不断溶解于雨水,其次是各类地表流水在流动过程中因温度、气压等的变化不断溶解或析出空气)于各类地表流水为不同地表岩溶过程直接提供因地制宜、适时变化的物理、化学条件(主要有 CO_2 溶解度、pH 值等),是地表岩溶水中 CO_2 的初始来源和主要来源,间接影响地表岩溶过程中水的酸碱性。

同时,地表空气通过与各类地下空气之间的交换,直接控制和影响各类地下空气的含量、多寡等,是各类地下空气和地下水中 CO_2 的初始来源和主要来源。

3.2.2 地下空气

(1)洞穴/地下河空气(图 6),指自由流动于洞穴、地下河道内的空气,主要通过天窗、洞口、围岩裂隙等进行交换,其含量、多寡等取决于它与地表空气的交换量,并与围岩特征及其所处区域的土壤、生物等密切相关,不具有明显的季节、昼夜变化,其 CO_2 的含量略高于地表空气,易受外界干扰(韦跃龙等, 2017)。洞穴/地下河空气主要通过溶解于各类地下流水(如地下河、洞穴池水等)为不同地下岩溶过程直接提供因地制宜、适时变化的物理、化学条件(主要有 CO_2 溶解度、pH 值等),间接影响部分地下岩溶过程(如洞穴次生化学沉积物等)中水的酸碱性等(韦跃龙等, 2016, 2017)。

(2)土壤空气(图 6),指贮存或流动于土壤中的空气,主要源于其与地表空气的直接交换,具有明显的季节、昼夜变化,其 CO_2 含量略高于大气,其形态、多寡及变化、污染等特征取决于土壤的特征,并与生物、人类生产活动等密切相关,详见后面 3.4 至 3.6 所述。当地表流水渗入土壤中,与土壤进行全方位接触时,土壤空气中部分 CO_2 溶于水转变成岩溶水中的 CO_2 ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3$),岩溶水中 CO_2 含量大幅升高,一般比未接触前 CO_2 含量大十几倍以上,最高可达几百倍;在沿地表、浅层、中部、深部循环带继续流动、或潜蚀、下渗 ($\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+ + \text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$) 补给地表岩溶水或裂隙、管道岩溶水的过程中, CO_2 含量仍不断得到增加,远远大于降水过程中吸

收的 CO_2 含量(韦跃龙等, 2017)。因此, 它是各类岩溶水中 CO_2 的主要来源, 并对此 CO_2 含量有着明显的“放大”作用。

(3)裂隙空气(图 6), 指自由流动于围岩各类裂隙中的空气, 其主要源于它与土壤空气(位于其表层)和地表空气(通过裸露基岩的裂隙、节理等)的交换。它主要通过溶解于裂隙岩溶水为洞穴次生化学沉积物的发育过程直接提供因地而异、适时变化的物理化学条件(主要有 CO_2 溶解度、pH 值等), 并直接影响其成景特征(韦跃龙等, 2016, 2017)。

3.3 岩溶成景过程与气候要素的关系

气候要素, 主要包括气候类型、降水特征、蒸发特征、气温特征、湿度特征、气压特征、日照特征、风特征等内容, 既具有复杂多样、因地/因时而异、月/季节/年际变化等区域差异特征: 如县/市/省等不同区域间某月/某季/某年平均降水量/气温/气压/日照率/湿度等的差异, 又具有趋于某一平均值的区域共同特征: 如某地多年平均降水量/气温/气压/日照率/湿度等, 或如亚热带降水量、气温等。

气候首先主要通过水(如降水对地表水/地下水的直接补给)和空气(如气候对空气的直接控制和影响)两大要素直接参与成景过程(图 1, 图 2, 图 7), 详见前面 3.1 和 3.2 所述; 其次是通过气温、气压、风力等自身特征的变化及对土壤、生物等要素的影响直接或间接参与成景过程, 并为其提供直接(如风化作用中日照、风力、温度/湿度/气压的昼夜变化等)或间接(如气温、气压等对水中 CO_2 溶解度的影响, 又如气候对土壤类型、质地和植被类型、分布、形态等特征的影响)的外动力条件, 对系统的运行、演变起着关键的调节作用, 表现出明显的区域成景特征(韦跃龙, 2020, 2021, 2022): 如亚热带、温带、寒带等岩溶区。

气候分为地表气候和地下气候(图 7)。其中: (1)前者的内涵、特征等如前面所述。(2)后者, 指与地下河、洞穴等地下空间相对应的气候, 是岩溶区特有的气候类型, 与前者具有大致相似的内容和特征(除降水、日照等之外); 同时, 它具有恒温、恒湿、恒压等相对稳定的特征, 且保持时间较长(多为几十年, 甚至更长), 但容易受外界干扰(韦跃龙等, 2017)。地下气候为不同的地下河、洞穴直接提供因地而异、适时变化的物理条件, 直接(如气温、气压、湿度、风速等的变化, 是导致钟乳石发生风化、表面逐渐发黑的直接因素; 如气压的变化, 是钟乳石形成的前提和必要条件之一)或间接(如气温、气压等的变化对地下水中 CO_2 溶解度的影响等)参与地下岩溶过程(韦跃龙等, 2016, 2017)。

3.4 岩溶成景过程与土壤要素的关系

土壤(图 1, 图 2, 图 8), 厚度多介于 60~120 cm, 具有复杂多样、因地制宜的特征(主要受控于母岩、气候、地形和生物等要素), 主要通过土壤空气间接参与成景过程, 而其物理、化学特征决定着土壤空气的形态、含量、污染等特征, 主要表现为: 类型(如钙土、已耕作土等对应着不同的孔隙度, 而土壤空气的含量、流动等与孔隙度正相关)、厚度(土壤 CO_2 含量与厚度正相关)、质地(即土壤矿物颗粒的组合状态, 与 CO_2 的流动密切相关)、结构(指土壤中土粒的存在方式, 与空气流通性、附着性等密切相关, 如粒状、块状、核状、柱状、片状等的流通性和附着性总体分别逐渐减少和增加)、含水性(随含水性增高, 原始态和附着态的空气含量降低, 液态空气含量增高)、通气性(空气含量与其正相关)、有机质含量(CO_2 含量与其总体呈正相关)及土壤利用、改良、污染等对土壤空气的控制和影响。

3.5 岩溶成景过程与生物要素的关系

生物, 具有新陈代谢功能的生命个体的总称, 可分为动物、植物、微生物三大子要素, 具有复杂、多样、因地制宜、适时变化的特征, 往往通过其生长、繁育、腐化、分解及进化等新陈代谢行为参与成景过程, 并提供间接的外动力条件(通过与土壤、空气和水的融合影响岩溶水酸碱度的变化等)(图 1, 图 2, 图 9)。

(1)动物子要素(图 9), 主要包括类型、分布特征(如稀疏、点群、密集等)、形态特征、行为特征(如觅食、社群等行为)等内容, 是生物要素中最为活跃的子要素, 具有高度流动性, 主要通过各自不同的行为特征(如植食性动物的觅食行为, 陆生动物的穴居、挖掘等行为, 各类动物的排泄行为等)直接或间接地对植物、土壤、地层、空气、水等要素产生影响, 并最终间接影响成景特征, 当中尤其以动物的觅食、社群(如蚁群、猴群等)、穴居等活动对成景过程的影响最为明显和重要。

(2)植物子要素(图 9), 主要包括类型、分布特征、形态特征等内容, 是生物要素中相对稳定的子要素, 主要通过类型和特征的不同变化直接或间接地对土壤(如不同的植被组合类型对土壤的结构、含水性、质地、有机质含量、通气性等有不同的影响, 乔灌木组合类型 > 草灌组合类型 > 草本组合类型对土壤上述特征的影响逐渐趋弱; 植被覆盖率越高越利于土壤的保持, 并与土壤的结构、含水性、质地、有机质含量、通气性等正相关等)、地层(如根劈作用对裸露基岩的破坏等)、空气(如光合、呼吸作用对空气的影响, 植物根系呼吸作用与土壤空气中 CO_2 含量的正相关等)、水(如植被涵养水源、降低地下水位等)、

气候(如植被对区域小气候的调节等)等要素产生影响,并最终间接影响成景特征,当中尤其以植被覆盖率的增减对成景过程的影响最为明显和重要,如其增减与土壤空气、水源涵养、区域小气候调节等之间的正相关关系,但与水土流失率、石漠化率等之间的负相关关系等。

(3)微生物要素(图 9),主要包括细菌、真菌、病毒三大类型,主要通过水或土壤空气直接或间接参与成景过程:①通过裂隙水中的微生物直接参与岩溶过程,如洞口区域的向光性钟乳石,崖壁表面的溶蚀现象(如桂林的九马画山等)等。②通过污染、伴生等行为使地表水、地下水中微生物的含量增多,并直接或间接影响相应的成景过程。③通过微生物对土壤影响(如微生物分解有机物,改善土壤质地、有机质含量等,而土壤 CO_2 含量与它们密切负相关),间接影响相应的成景过程。

3.6 岩溶成景过程与人类活动的关系

人类活动对成景过程的影响主要有两种方式(图 1,图 2): (1)对各类岩溶景观的直接利用和破坏,如现代

对洞穴、瀑布、河流、湿地、峰丛峰林、天坑等的旅游开发及拦河建坝、抽取地下水、工程建设、农业生产、矿山开采、森林砍伐、工业生产和城镇化建设等对所在区域景观的直接破坏、史前人类的穴居行为等。(2)通过改变局部区域成景要素的特征,直接或间接影响现代岩溶过程,如城市和公路建设(如地基开挖对所处区域地层、构造的直接或间接破坏,路面硬化改变地表汇水路径、面积等)、农业生产(如农业对土壤特征、景观构成、生态敏感性、水化学性质等的直接或间接影响)、燃料燃烧、工业生产和交通排放(如“三废”排放等)、森林砍伐、旅游开发等。

同时,虽然人类活动的影响时间相对短暂,但影响强度、规模等却是前所未有的巨大,尤其是近现代人类活动,往往极大加速(如酸雨、废水、废气等促使溶蚀增快,工程和城镇化建设、森林砍伐、矿山开采、水坝建设等促使可溶岩突然大面积裸露、各类岩溶景观的直接破坏、植被覆盖率和土壤短期内大幅减小、地表河/地下河水量剧减并严重受污等)或减缓(如河水的截流减缓了侵蚀、

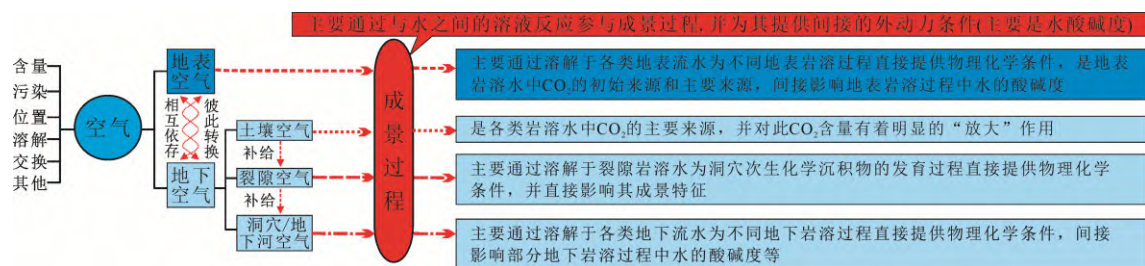


图 6 岩溶成景过程与空气要素关系示意图

Fig. 6 Sketch map of the interrelationship between the karst landscape forming process and air

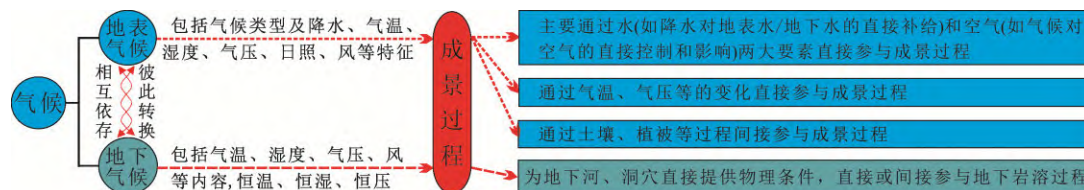


图 7 岩溶成景过程与气候要素关系示意图

Fig. 7 Sketch map of the interrelationship between the karst landscape forming process and climate



图 8 岩溶成景过程与土壤要素关系示意图

Fig. 8 Sketch map of the interrelationship between the karst landscape forming process and soil

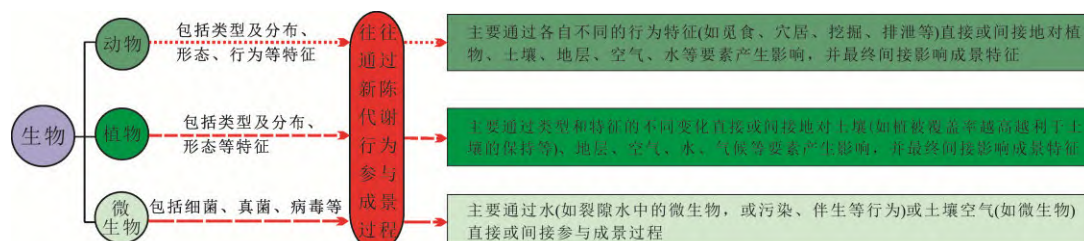


图 9 岩溶成景过程与生物要素关系示意图

Fig. 9 Sketch map of the interrelationship between the karst landscape forming process and biological elements

沉积、搬运等)相应区域的现代岩溶成景过程,或致使现代岩溶过程朝不利的方向演变,如湿地、洼(谷)地等面积大幅减少、山体大面积裸露、景观格局变动大、钟乳石风化变黑、洞穴灯光植物大面积生长、地表/地下水量减少并受污、土壤稳定性降低并受染、森林蓄水量大幅降低、生物多样性减少、生态敏感性变高、侵蚀/水土流失/石漠化加剧、局部小气候改变等。

4 不同成景阶段岩溶成景过程分析

4.1 不同岩溶成景阶段的划分及各阶段的成景特征

首先以某一次区域地壳的间歇性隆升为时间界限和主线,成景周期的次数和每个周期的持续时

间分别取决于区域隆升的间歇性和每期隆升的持续时间,每一周期的成景强度、幅度等取决于本期隆升的类型、区域、强度及地质构造和构造势能等。绝大多数岩溶区域经历过 3~4 个成景周期,而每一期的成景特征有着明显差异。

然后,以某一次区域地壳隆升影响程度由强渐弱为时间界限和主线,将某一成景周期划分为“可溶岩出露和分割→雏形→重要发育和成型→继承性改造和发育”4 个阶段,分别对应着差异明显的成景特征,如响应关系、影响程度(分为无(得分=0 分)、次要(0<得分≤5 分)、较主要(5<得分≤10 分)、主要(10<得分≤15)、重要(得分>15)等 5 种)、景观特征等,详见表 1 至表 4。

表 1 可溶岩出露和分割阶段(处于区域间歇性隆升时期)成景特征
Table 1 Characteristics of karst landscape formation in the stage of exposure and division of soluble rock

成景要素	不同区域的成景特征			影响程度	对应成景方式	
	上游 (或高地)	中游 (或较高地)	下游 (或低地)			
地层	可溶岩	刚出露且相对平坦的岩溶地块被分割成众多大小不一、软硬不一、破碎不一的“豆腐块”(小地块)、破碎程度极高			重要	(1) 地表：暂时性、季节性地表流水(流程短)各向分散、彼此独立式成景； (2) 地下：横、纵裂隙水各向分散、彼此独立式成景
	岩溶水赋存条件	节理/裂隙最宽、连续性不强、表面最粗糙、完全没有被充填，地表流水由高地往周边低地汇集，少量沿裂隙下渗，但储水空间、含水岩组特征等尚未形成(仅指本周期内，表中各处相同)			次要	
构造	构造运动	处于区域间歇性隆升时期，整体大幅差异性抬升，强度最强，幅度最大，持续几年至几十年			重要	
	地质构造	早期形成的断裂、褶皱、节理、裂隙、孔隙等陡然活化，程度均极大，导致区域内岩石、地层陡然变形，并形成新的断层、褶皱、节理、裂隙、孔隙等，各构造应力间极不平衡			主要	
	构造势能	区域地形及各小地块内部和各自之间的地势、比降等陡变，程度极大，以周边低地为各自侵蚀基准面			主要	
水	地表水	大气降水沿各构造低地、构造破碎带、裂隙带、岩石脆弱带不断侵蚀、溶蚀、搬运，形成由各地形高地往周边低地各向分散流动、彼此独立、流程短，但水动力十分强劲的暂时性、季节性地表流水，以崩塌、搬运、侵蚀等为主，溶蚀、沉积等为辅			重要	
	地下水	期间少数降水沿纵张性裂隙下渗，并沿层间裂隙面、岩层层面等进行分散、独立的横向溶蚀、流动，形成发育程度不一、各向分散流动、彼此独立的横向裂隙岩溶水；水动力极弱，但总体处于全充水状态			次要	
空气	地表	空气含量特征变化大，尤其 CO ₂ 含量短期内可能剧增并造成程度最大的自然污染，最大程度的改变区域地表水/地下水的酸碱度			次要	次要
	地下					
	气候	均伴随着频繁且极强的气候变化，如强降水、大风、高温、干旱、洪涝、热浪、低温等，只是不同气候区分别具有不同的变化特征			次要	次要
	土壤	前期土壤层基本被破坏，新的土壤层尚在形成之中，基本没有影响			无	无
	生物	前期生物基本被破坏，新的生物尚在发育之中，基本没有影响			无	无
	人类活动	完全没有影响			无	无
各要素间的响应关系		极不平衡：地壳隆起，断裂、褶皱、裂隙、节理等陡然活化，程度均极大，并形成新的地质构造，构造势能陡变、陡增，各构造应力间极不平衡，可溶性岩层出露并被分割成规模不一的“豆腐块”，破碎程度极高；隆起也诱发水、空气、气候产生极强的变化；出于填平补齐和降低势能需要，产生强度、规模极强的地表过程，以大强度、大规模的重力崩塌(缓解陡增的势能、极不平衡的构造应力等)、搬运作用(清理破损的岩块)、侵蚀等为主，并伴随着相应的地表(强)和地下(极弱)岩溶作用				
主导性成景要素		区域构造和地层				
主要成景动力		以内动力(最强)和地表水动力(十分强劲)为主，地下水动力(极弱)为辅				
主要岩溶作用		强地表岩溶作用(崩塌、搬运、侵蚀等为主，溶蚀为辅)为主，极弱地下岩溶作用(溶蚀为主)为辅				
对应岩溶发育期和持续时间		总体处于萌芽阶段，相当于胚胎期与孕期-极为短暂(几年至几十年)				
对应景观特征		形成岩溶景观的初胚：以地表细沟、渠等为主，地下纵向、横向溶蚀裂隙为辅				

4.2 岩溶区不同部位成景过程

随后, 区域岩溶作用将继续以“下一期区域地壳隆升影响程度由强渐弱”为时间界限和主线, 并按“重塑阶段(二期区域间歇性隆升时期, 前期景观被破坏, 局部被破坏-产生“传承效应”或全部被破坏-产生“断层效应”)-二期雏形阶段(区域构造平稳前期)-二期重要发育和成型阶段(区域构造平稳中期)-二期继承性改造和发育阶段(区域构造

表 2 雏形阶段(处于区域构造平稳前期)成景特征
Table 2 Characteristics of karst landscape formation in the rudiment stage

成景要素	不同区域的成景特征			影响程度	对应岩溶成景方式
	上游 (或高地)	中游 (或较高地)	下游 (或低地)		
地层	可溶岩	破碎程度高; 但不同的分布、岩性、埋藏、厚度、产状、面积、可溶性等特征, 分别控制和影响着相应的成景过程, 总体程度较强		较主要	主要
	岩溶水赋存条件	节理/裂隙较宽、连续性不强、表面粗糙、基本没有被充填, 地表流水由高地往周边低地汇集, 沿纵向、横向裂隙下渗的量逐渐增多, 储水空间逐渐变大, 富水性逐渐变强, 较主要含水岩组特征明显, 分别影响着相应的成景过程, 总体程度较强		较主要	
构造	构造运动	处于区域构造平稳前期, 隆升影响仍很强, 持续几十年至百多年不等		次要	重要
	地质构造	各断裂、褶皱、节理、裂隙、孔隙等活化程度趋弱; 各构造应力间仍不平衡, 但逐渐趋于平衡; 区域构造趋于稳定		较主要	
	构造势能	前期形成的地势、比降等特征依然很大, 但由上游至下游地势、比降等逐渐降低, 侵蚀基准面由各自周边低地逐渐转为下游		主要	
水	地表水	原先汇聚于各沟渠中的地表水开始相互袭夺, 连接、汇聚成更长、流量更大、各向分散流动、彼此独立、数量众多、汇水面积较小的小型常年性地表河, 具有明显的上、中、下游, 水动力强劲, 且由上游至下游, 流量、汇水面积、循环条件、搬运力、水动力等逐渐变大、变好、变强, 而流速等则逐渐变小		主要	重要
	地下水	前期形成的纵向、横向裂隙岩溶水, 越聚越多, 水量、水动力及溶蚀力越大, 通道逐渐扩大, 并开始相互袭夺、逐渐演变为各向分散流动、彼此独立、数量众多、汇水面积较小的小型地下河, 具有明显的上、中、下游, 水动力弱, 且由上游至下游, 具有和地表水相似的特征。期间, 大多处于全充水状态, 开始出现半充水状态, 钟乳石开始发育		次要	
	地表与地下之间	小部分地下河开始袭夺各种形式的地表流水, 逐渐形成各向分散流动、彼此独立、数量和汇水面积小的小型地表地下水单元		次要	
	空气	空气含量特征的变化逐渐趋于平稳, 自然污染逐渐减弱至无, 其对区域地表水酸碱度的影响逐渐取决于所处区域的气候特征, 而对区域地下水酸碱度的影响则逐渐取决于所处区域气候、地下流水、土壤、围岩裂隙等的特征; 总体影响程度较弱		次要	
气候	气候	气候变化逐渐趋于平稳, 不同气候类型对应着不同的降水、蒸发、气温、湿度、气压等特征, 分别影响着相应的成景过程, 总体程度较强		重要	重要
	土壤	不同区域分别形成不同厚度的土壤, 自上游至下游厚度逐渐增大; 不同土壤的物理、化学特征产生不同的土壤空气特征, 并逐渐对成景过程产生不同程度的影响, 但总体程度极弱		次要	次要
	生物	不同区域分别形成不同类型的生物, 分别对成景过程产生不同程度的影响, 但总体程度极弱		次要	次要
人类活动		完全没有影响		无	无
各要素间的响应关系		趋于平衡: 地壳隆升影响仍很强, 但各断裂、褶皱、节理、裂隙、孔隙等活化程度趋弱; 各构造应力间仍不平衡, 但逐渐趋于平衡; 前期形成的地势、比降等特征依然很大, 区域构造趋于稳定; 可溶岩破碎程度依然高, 但各种特征逐渐形成并趋于稳定, 岩溶水赋存条件逐渐趋好, 逐渐形成各向独立、数量较多、汇水面积较小的小型地表河、地下河和地表地下水单元; 气候、空气含量特征的变化逐渐趋于平稳, 自然污染逐渐减弱至无, 不同区域分别形成不同类型的土壤、生物			
主导性成景要素		构造、水、气候和地层			
主要成景动力		以内动力(强)和地表水动力(十分强劲)为主, 地下水动力(弱)为辅			
主要岩溶作用		以强地表岩溶作用(侵蚀、溶蚀、搬运并重)为主, 弱地下岩溶作用(溶蚀为主)为辅, 而各自具体的强度、幅度取决于各成景要素的响应关系			
对应岩溶发育期和持续时间		总体处于雏形阶段, 相当于婴儿与少年期-相对短暂(几十年至百多年)			
对应景观特征		各类岩溶景观的雏形已初具, 且景观类型较齐全、形态初具、规模小、数量多			

表 3 重要发育和成型阶段(处于区域构造平稳中期)成景特征
Table 3 Characteristics of karst landscape formation in the important development and forming stage

成景要素		不同区域的成景特征			影响程度	对应岩溶成景方式
		上游 (或高地)	中游 (或较高地)	下游 (或低地)		
地 层	可溶岩	破碎程度由高趋低至无;不同的分布、岩性、埋藏、厚度、产状、面积、可溶性等特征,分别控制和影响着相应的成景过程,总体程度强			较主要	重要
	岩溶水赋存条件	节理/裂隙大、连续性逐渐增强、表面逐渐光滑、充填由少渐多,地表流水由高地往周边低地汇集,储水空间逐渐变大,富水性逐渐变强,含水岩组特征明显,分别影响着相应的成景过程,总体程度强				
构 造	构造运动	处于区域构造平稳中期,隆升影响由强趋弱,历时漫长(几万年至几十万年)			次要	(1)地表:小型地表河/局部区域统一地表水系各向分散、彼此独立式(早期)→多个区域或全区域统一地表水系各向分散流动,彼此制约、协调式(中期和后期)+暂时性、季节性流水和小型常年性地表河(流程较长)各向分散、彼此独立式成景(后期); (2)地下:小型地下河/局部区域统一地下河系各向分散、彼此独立式(早期)→多个区域或全区域统一地下河系各向分散流动,彼此制约、协调式成景(中期和后期); (3)地表与地下之间:小区域/局部区域(早期)→多个区域或全区域(中期和后期)彼此制约、协同共生式成景
	地质构造	各构造应力基本平衡,各地质构造总体稳定,区域构造总体稳定			较主要	
	构造势能	基本保持前期的构造势能特征,以下游为区域侵蚀基准面,且由上游至下游地势、比降等依次减弱;期间地表地势、比降等的降幅远大于地下			次要	
水	地表水	地表水系形成、相互袭夺、大规模发育、萎缩阶段:小型地表河→局部区域统一的地表水系(早期,形成并进入大规模发育阶段)→多个区域或全区域统一的地表水系(中期,仍处于大规模发育阶段;后期,处于萎缩阶段)。期间,由上游至下游各主流流量、汇水面积、循环条件、搬运力、水动力等逐渐变大、变好、变强,而流速等则逐渐变慢;但随着地下袭夺的持续增加,中、后期地表水系的众多支流逐渐被彼此断开的暂时性、季节性流水和小型常年性地表河替代,大部分河道干涸转为峡谷、洼(谷)地、干谷等,水动力总体由强→极强→强→趋弱			较主要	
	地下水	地下河系形成、相互袭夺、大规模发育阶段:众多小型地下河→局部区域统一的地下河系(早期,形成并进入大规模发育阶段)→多个区域或全区域统一的地下河系(中期和后期,仍处于大规模发育阶段,在下游经总出口汇入区域地表水系主流)。期间,由上游至下游,具有和地表水系相似的特征,水动力总体由弱→强→极强→趋强。期间,全充水和半充水状态往往互换			重要	
	地表与地下之间	地表与地下水单元大规模发育阶段:小型/中型地表地下水文单元(早期,彼此独立、数量少、汇水面积较大、局部区域统一)→大型地表地下水文单元(中、后期,彼此相连、数量更少、汇水面积更大、多区域或全区域统一)			较主要	
	空气	空气各项特征保持稳定,其对区域地表水酸碱度的影响取决于所处区域的气候特征,总体影响程度逐渐变强			次要	
空 气	地表	气候各项特征保持稳定,不同气候类型及其特征,分别影响着相应的成景过程,总体程度强			次要	较主要
	地下					
	气候				重要	重要
	土壤	土壤各项特征保持稳定,且自上游至下游厚度、类型逐渐增大、变多,分别对成景过程产生不同程度的影响,总体逐渐变强			次要	次要
	生物	不同区域分别形成不同类型、特征相对稳定的生物,分别对成景过程产生不同程度的影响,总体逐渐变强			次要	次要
	人类活动	完全没有影响			无	无
	各要素间的响应关系	相对平衡:地壳隆升影响由强趋弱,基本保持前期的构造势能特征,但规模弱于前期并继续减弱,各构造应力基本平衡,区域构造总体稳定;可溶岩破碎程度由高趋低至无,各种特征稳定,岩溶水赋存条件好,水动力沿“小区域小型/局部区域中型地表地下水文单元(早期)→多个区域或全区域大型地表地下水文单元(中期和后期)”演替,地表与地下之间彼此制约、协同共生的区域由小区域→局部区域→多个区域或全区域;空气、气候、土壤、生物等的各项特征保持稳定,对成景过程的影响程度逐渐变强				
	主导性成景要素	水、地层和气候				
	主要成景动力	以地表水动力(强→极强→强→趋弱)和地下水动力(弱→强→极强→趋强)为主,内动力(强→弱)为辅				
	主要岩溶作用	地表(强→极强→强→趋弱)和地下(弱→强→极强→趋强)岩溶作用并重,不同地质时期各自强度、幅度略有差异,而各自具体的强度、幅度取决于各成景要素的响应关系				
	对应岩溶发育期和持续时间	总体处于大规模发育阶段,相当于青壮年期-历时漫长(几万年至几十万年)				
	对应岩溶景观特征	各类岩溶景观逐渐演变形成,并奠定了各自的类型、规模、形态、数量和分布格局等,且类型齐全、形态丰富、规模多变、数量多				

平稳后期)→重塑阶段(三期区域间歇性构造运动时期)→三期雏形阶段……→现代岩溶阶段”进行多期周期性循环发育。期间,岩溶区的不同部位(即地表、地下及地表与地下之间)分别进行着不同的成景过程并分别形成对应三大类景观,它们之间的关系由各向分散、彼此独立→彼此制约、协同共生演替(韦跃龙等, 2010, 2018a, b, c, d, 2020)。

(1)地表:地表流水不断侵蚀、溶蚀、潜蚀、搬运,并按“地块分割→沟渠(区域间歇性构造运动时期)→峰丛洼地→地表河→地下河(区域构造平稳前期和中期)→继承性发育和改造(区域构造平稳后期)”等 6 个阶段进行多期周期性循环发育(韦跃龙, 2009), 期间:原细沟、沟渠、岩石变形破碎/脆弱区及各构造相对低地、构造破碎带、岩石软弱带被改造成各种大小、规模、深度不一的洼(谷)地、峡谷、漏斗、坡立谷等横向负地貌,而岩石完整区、岩层厚产状平缓区及各构造相对高地、构造稳定带、岩石坚硬带等也不断被改造成错落有致的岩溶峰丛、峰林、丘陵、崮、孤峰、象形山、石柱峰、崖壁、台原等正地貌,并由上游/高地→中游/较高地→下游/低地,大体上由高峰丛深洼地(上游/高地)→中峰丛洼地→低峰丛洼地(中游/较高地)→高峰林平原/谷地→低峰林/孤峰平原(下游/低地)等多种地貌协同共生,有序分布于同一流域或大流域岩溶区内。同时,受多期区域间歇性隆升的控制和影响,形成多级地表岩溶景观,最直接的证据是常见的多级不同高程、规模、走向的阶地、夷平面、干谷、悬谷等。

(2)地下:地下流水不断侵蚀、溶蚀、潜蚀、搬运其围岩,并按“横向裂隙式岩溶水形成发育(区域间歇性构造运动时期)→地下河道形成发育(区域构造平稳前期)→地下河大规模发育(区域构造平稳中期和后期)→洞穴形成(二期及其后面的区域间歇性构造运动时期)→洞穴景观发育(区域构造平稳前期、中期和后期,往往开始于半充水状态的地下河道,可跳过前一阶段,并贯穿大部分阶段)”等 5 个阶段进行多期周期性循环发育(韦跃龙, 2009), 期间早期形成的地下河道则可能发生如下变化:①继续下潜或改道形成新的地下河,或继续下潜但不形成新河道,分别在新河道或老河道上继续进行新地下河的发育和演变,即“地下河道形成发育→……→洞穴形成”等阶段。②局部或全部被抬升形成旱洞,即洞穴,并进入洞穴景观发育过程,沿“形成发育(区域构造平稳前期)→大规模发育(区域构造平稳中期)→缓慢/停止发育(区域构造平稳后期)→崩塌(二期及其后面的区域间歇性构造运动时期)”等 4 个不同阶段进行周期性发育,形成千姿百态、规模不一、不同时代共

存的洞穴次生化学沉积物(韦跃龙等, 2016)。③部分地下河道被抬升,且顶板发生崩塌,形成天坑、天窗等地表与地下之间岩溶景观(详见后面所述)及天生桥(含穿洞)等地表景观。④作为极端情况,早期地下河道发生大面积崩塌,最后演变、发育形成峡谷、洼(谷)地等负地貌,转为地表。同时,受多期区域间歇性隆升的控制和影响,形成多级地下岩溶景观,最直接的证据是常见的多层洞穴、多级盲谷等。

(3)地表和地下之间:有两种情形,①地表流水沿垂直于岩石层面的裂隙、节理等岩石脆弱部位,不断进行纵向溶蚀、侵蚀,往往形成漏斗、落水洞、竖井等,甚至形成中、大型冲蚀型天坑(如重庆武隆后坪天坑群,以冲蚀为主),该情形往往贯穿于不同成景阶段。②总体按“地下河阶段(区域构造平稳前期、中期和后期)→塌陷型天坑、天窗和天生桥形成阶段(二期及其后面的区域间歇性构造运动时期)→改造和退化阶段(区域构造平稳前期、中期和后期)”,形成塌陷型天坑、天窗和天生桥(含穿洞)等,它们形成的基本机制是地下河洞腔发生局部崩塌;受多期区域间歇性隆升的控制和影响,可能会发生多期局部崩塌作用,形成众多位置各异、规模形态不一、不同时代共存的天坑、天生桥和天窗,如广西乐业天坑群、都安天窗群、鹿寨香桥岩天生桥等。

期间,不同或同一时期/区域成景周期的成景特征,均是多种要素在不同时空相互响应作用的产物,既揭示了岩溶区从“胚胎期至老年期”的完整发育过程及此过程中各成景要素特征、水文过程、影响程度等和主导性成景要素等的响应变化,还展现了同一岩溶区不同区域间、同一岩溶区处于不同成景阶段的景观间、同一岩溶区不同类型景观间、同一类型各个具体景观间不同的成景特征,其中:地层(如同为可溶性碳酸盐岩)、构造(如均经历多期间歇性区域构造隆升)、岩溶成景过程(如峰丛-峰林、洞穴及其次生化学沉积物、天坑、天窗等各类典型岩溶景观的成景机制)等的相似性决定了成景特征明显的宏观相似性(如不同区域、时代的峰丛-峰林、洞穴等);地层(如岩性、分布特征、埋藏特征等)、构造(如构造运动强度、类型、间歇性等及地质构造特征等)等稳定要素之间区域差异特征,以及水、空气、土壤等变化要素之间复杂、多样、因地制宜、适时变化的特征,则共同决定了成景特征显著的微观差异性(如贵州施秉的峰丛-峰林与广西桂林的峰丛-峰林,贵州织金洞与湖南张家界黄龙洞等)。

5 现代岩溶成景过程分析及演变趋势

现代岩溶成景过程,泛指全新世(历时约 1 万多年)以来的岩溶成景过程,总体具备与“继承性改造

和发育阶段(区域构造平稳后期)”高度相似的成景特征(表 4),继续以对上一期岩溶景观的继承性改造和发育为主,总体处于“缓慢发育/停止发育阶段”,景观类型、形态、规模、数量等总体相似,各类景观将产生不同方向、强度和幅度的退化、演变趋势(表 5)。但两个阶段之间有着一个极为明显的差异:人类

观类型、形态、规模、数量等总体相似,各类景观将产生不同方向、强度和幅度的退化、演变趋势(表 5)。但两个阶段之间有着一个极为明显的差异:人类

表 4 继承性改造和发育阶段(处于区域构造平稳后期)及现代成景特征
Table 4 Characteristics of karst landscape formation in the inherited reform & development and modern stage

成景要素		不同区域的成景特征			影响程度	对应岩溶成景方式
		上游 (或高地)	中游 (或较高地)	下游 (或低地)		
地 层	可溶岩	岩石地层总体相对完整,但不同的分布、岩性、埋藏、厚度、产状、面积、可溶性等特征,分别控制和影响着相应的成景过程,总体程度趋弱			次要/ 次要	较主要/ 较主要
	岩溶水赋存条件	节理/裂隙大、连续性最强、表面光滑、充满充填物,地表流水由高地往周边低地汇集,储水空间大,富水性强,含水岩组特征明显,分别影响着相应的成景过程,总体程度趋弱			次要/ 次要	
构 造	构造运动	处于区域构造平稳后期,隆升影响相对极弱,持续几千年至几万年不等			次要/ 次要	较主要/ 较主要
	地质构造	各构造应力基本平衡,各地质构造总体稳定,区域构造基本稳定			次要/ 次要	
	构造势能	以下游为区域侵蚀基准面,由上游至下游地势、比降等依次减弱,但远弱于前期并继续减弱,且不同区域间构造势能基本稳定;期间地表地势、比降等的降幅仍远大于地下			次要/ 次要	
水	地表水	地表水系萎缩阶段:绝大部分地表水系支流已被数量较多、流程较长、彼此断开的暂时性、季节性流水和小型常年性地表河替代,并经地下河系汇入(大部分)或直接汇入(小部分)地表水系主流;而地表水系主流从上游至下游具有和上一期相似的特征,但水动力远弱于前期并持续趋弱			较主要/ 次要	重要/ 重要
	地下水	地下河系大规模发育阶段:在下游经总出口汇入区域地表水系主流,从上游至下游具有和上一期相似的特征,水动力总体远弱于前期并持续趋弱,但仍保持着强劲的水动力,且远强于地表水系;期间,多处于半充水状态			较主要/ 较主要	
	地表与地下之间	随着地壳隆升影响相对极弱、不同区域间的构造势能基本稳定等,袭夺现象基本停止,基本保持着上一期形成的多个区域或全区域统一的大型地表地下水单元,但水动力总体远弱于前期并持续趋弱			较主要/ 较主要	
空 气	地表	空气各项特征保持稳定,其对区域地表水酸碱度的影响取决于所处区域的气候特征,总体影响程度较前期强			次要/ 次要	较主要/ 较主要
	地下					
	气候	气候各项特征保持稳定,不同气候类型及其特征,分别影响着相应的成景过程,总体程度强			重要/ 重要	重要/ 重要
	土壤	土壤各项特征保持稳定,且自上游至下游厚度、类型逐渐增大、变多,分别对成景过程产生不同程度的影响,总体较前期强			较主要/ 较主要	较主要/ 较主要
	生物	不同区域分别形成不同类型、特征相对稳定的生物,分别对成景过程产生不同程度的影响,总体较前期强			较主要/ 较主要	较主要/ 较主要
	人类活动	基本没有影响(现代:人类的影响程度逐渐增强,详见 3.6 所述)			无/ 较主要	无/ 较主要
	各要素间的响应关系	相对稳定:地壳隆升影响相对极弱,构造势能远弱于前期并继续减弱,各构造应力基本平衡,区域构造基本稳定;岩石地层总体相对完整,可溶岩各种特征稳定,岩溶水赋存条件好,水动力仍以多个区域或全区域大型地表地下水单元为主,但地表水系和地下河系分别处于萎缩和大规模发育阶段,空气、气候、土壤、生物等的各项特征保持稳定;期间,受高差、比降等远弱于前期并继续减弱、不同区域间构造势能基本稳定、各构造应力基本平衡、岩石地层完整性增强、水动力总体远弱于上一期并持续趋弱等的控制和影响,成景作用强度、幅度等远小于上一期并持续趋弱				
	主导性成景要素	水和气候				
	主要成景动力	以地下水动力(略强但总体持续趋弱)和地表水动力(弱且持续趋弱)为主,内动力(弱)为辅				
	主要岩溶作用	地下(相对略强但总体持续趋弱,主要)和地表(弱且持续趋弱,次要)岩溶作用彼此制约、协同共生,总体强度、幅度等远小于上一期并持续趋弱,而各自具体的强度、幅度则取决于各成景要素的响应关系				
	对应岩溶发育期和持续时间	总体处于“缓慢发育,或停止发育/持续风化阶段”,相当于老年期-历时长(几千年至几万年)				
	对应岩溶景观特征	以对上一期岩溶景观的继承性改造和发育为主,对应景观类型、形态、体量、数量总体和上一期相似,但均呈现出不同程度的退化趋势				

注:“较主要/次要”分别表示“继承性改造和发育阶段/现代阶段”的影响程度。

活动对现代岩溶过程的影响逐渐增强, 并且是全方位、全过程、全要素的影响, 涵盖着、贯穿于现代岩溶过程的不同部位、要素和过程, 详见前面 3.6 所述。

同时, 在今后可预测的时间内, 地层、构造等两大稳定成景要素不可能发生改变, 而水、空气、气候、土壤、生物等变化成景要素的变化则可通过相应仪器、技术等直接观测, 基于此并依据岩溶成景机理及成景过程与各成景要素响应关系的分析和不同成景阶段特征的分析, 可构建某一岩溶区当代成景模型, 实现水、空气、气候、土壤、生物等变化成景要素观测数据的实时传输、云空间响应分析和成景分析, 量化、精细化不同变化成景要素对成景过程的影响程度和权数, 确定精准的影响信息、准确的影响区域和时间, 精确分析景观的演变趋势, 实现当代成景过程的正演, 并以此实施

对岩溶区, 尤其是各个罕见、典型岩溶风景区的监测和预警: 及时发现不利的成景因素, 如水和空气受污染、土壤-植被特征大幅改变、过度耕作、过度旅游、工程建设、城镇化等人类活动及干旱、洪涝、高温、低温等极端气候变化, 并采取相应的管控和应对措施, 如建立水资源保护制度、减少污染、治理污染、清洁生产、保护和恢复生物多样性、实施有效的水土保持措施、减少农药和化肥的使用、合理安排耕作制度(如轮作、间作、套作等)、适当限制游人数量、制定并实施绿色施工措施、合理规划城镇发展、建立强大而可靠的气象监测和预警系统等, 避免对应典型景观受到毁灭性破坏或加速老化、退化的速度; 最终为大数据与 AI 背景下岩溶景观资源大数据、演变模型、开发-保护新模式、智能监测等的建设和研究开拓新的思路和视野。

表 5 各类典型岩溶景观的主要退化、演变趋势

Table 5 The main tendencies of degeneration and development of various typical karst landscapes

岩溶景观类型		主要退化、演变趋势	总体趋势	演变规律
地表景观	正地貌或景观	峰丛	变矮变小, 或变尖变高	变低、变小
		悬崖	不断后退, 削壁变缓	
		峰林、孤峰	变低变小	
		天生桥	桥面不断崩塌、变薄	
		丘陵	变矮变小	
		石林、石柱峰	变矮变小、或变尖变高	
		崖壁	崖壁后退, 变低变缓	
		崮、台原	顶部变小、变尖	
	负地貌或景观	地表各类崩塌堆积物	变多变大	变平/大、变宽/深
		洼(谷)地、坡立谷	变平变宽, 或变深变窄	
		漏斗、干谷	变平变浅, 或变深变宽	
		盆地/平原	变大变宽	
		峡谷	变宽变浅, 或变深变窄	
	水体地貌或景观	地表河	变大、变宽、变长、变深	保持不变
		瀑布	大多数水量不变, 极少数演化为季节性或干涸	
泉				
湖泊				
湿地				
地表与地下之间景观	天坑	峭壁缓慢后退, 大部分典型形态得以保持, 少部分朝大型漏斗演变	四周边壁后退, 内部不断被崩塌物填充	
	天窗	峭壁缓慢后退, 大部分典型形态得以保持, 少部分将慢慢脱离地下河		
	竖井、落水洞	变大变深, 或变深变窄		
地下景观	地下河(系)	变大、变宽、变长、变复杂	变大、变宽、变长、变复杂	
	洞穴及其洞穴空间/大厅	顶部不间断崩塌, 洞底崩塌物缓慢增加, 洞穴空间/大厅缓慢变小	变窄变小	
	洞穴次生化学沉积物	老的钟乳石不断风化变黑, 或局部缓慢脱落; 同时不断生成新的小型钟乳石	缓慢风化、脱落	

总体以继承性改造和发育为主: 地表以各向流动、或定向流动的暂时性地表水及季节性、常年性地表河为主要动力, 地下则以各地下河, 或地下河系为主要动力, 地下(相对略强但总体持续趋弱, 主要)和地表(弱且持续趋弱, 次要)岩溶作用彼此制约、协同共生, 降水量越大, 退化、演变的规模、强度越大; 且自上游区域至下游区域, 规模和强度也越大

6 结论

在综合前人研究成果和长期野外考察的基础上,全面系统探讨了岩溶成景过程与地层、构造等稳定要素及水、空气等变化要素的响应关系,主要结论如下:

(1)某一岩溶区的成景过程与区域地层、构造等稳定要素(即物质和内动力子系统)及水、空气、气候等变化要素(即外部输入和外动力子系统)之间相互作用构成一个复杂、动态、多期循环、彼此相似却又差异明显的岩溶成景系统,并通过不同的成景过程(即成景响应子系统)分别形成既表现出共同的区域、时期、类型等特征、又具有不同发育特征的各种景观单体(即输出子系统),即同一区域、时期、类型的岩溶景观均具有共同的特征,但每个岩溶景观的规模、形态等发育特征都是独一无二的。而目前的岩溶景观,是其动态成景过程中某一短暂时期内形态的呈现。

(2)地层和构造分别构成了成景系统的物质和内动力子系统,共同从宏观上控制着成景过程的格局、特征(包括方式、强度、幅度等)、极限等。

(3)水、空气、气候、土壤、生物等是成景系统相对活跃的外驱动要素(它们的活跃和驱动程度总体依次降低),分别直接或间接为成景过程提供不同的外动力条件,共同构成成景系统的外部输入和外动力子系统,对系统的运行、演变起着关键的引导和调节作用,直接或间接控制着成景过程和特征。

(4)以某一次区域地壳隆升影响程度由强渐弱为时间界限和主线,将某一成景周期划分为4个阶段,并反演模拟分析不同成景阶段的特征:

①可溶岩出露和分割阶段(一期区域间歇性构造运动时期),此阶段极为短暂(几年至几十年),各成景要素间的响应关系极不平衡,主导性成景要素为区域构造和地层,成景动力以内动力(最强)和地表水动力(十分强劲)为主,地下水动力(极弱)为辅,以大强度、大规模的重力崩塌、搬运作用、侵蚀等为主,并伴随着相应的地表(强)和地下(极弱)岩溶作用,对应景观以地表细沟、渠等为主,相当于胚胎期与孕期。

②雏形阶段(区域构造平稳前期),此阶段相对短暂(几十年至百多年),各成景要素间的响应关系趋于平衡,主导性成景要素为构造、水、气候和地层,成景动力以内动力(强)和地表水动力(十分强劲)为主,地下水动力(弱)为辅,以强地表岩溶作用(侵蚀、溶蚀、搬运并重)为主,弱地下岩溶作用(溶蚀为主)为辅,各类岩溶景观的雏形已初具,相当于婴儿

与少年期。

③重要发育和成型阶段(区域构造平稳中期),此阶段历时漫长(几万年至几十万年),各成景要素间的响应关系相对平衡,主导性成景要素为水、地层和气候,成景动力以地表水动力(强→极强→强→趋弱)和地下水动力(弱→强→极强→趋强)为主,内动力为辅(强→弱),地表(强→极强→强→趋弱)和地下(弱→强→极强→趋强)岩溶作用并重,但角色互换,各类岩溶景观逐渐演变形成,并奠定了各自的类型、规模、形态、数量和分布格局等,相当于青壮年期。

④继承性改造和发育阶段(区域构造平稳后期),此阶段历时长(几千年至几万年),地壳隆升影响相对极弱,各成景要素间的响应关系相对稳定,主导性成景要素为水和气候,成景动力以地下水动力(略强但总体持续趋弱)和地表水动力(弱且持续趋弱)为主,内动力(弱)为辅,地下(相对略强但总体持续趋弱,主要)和地表(弱且持续趋弱,次要)岩溶作用彼此制约、协同共生,以对上一期岩溶景观的继承性改造和发育为主,景观类型、形态、规模、数量总体和上一期相似,但均呈现出不同程度的退化趋势,相当于老年期。

(5)区域岩溶作用继续按“重塑阶段(二期区域间歇性构造运动时期)→二期雏形阶段→二期重要发育和成型阶段→二期继承性改造和发育阶段→重塑阶段→三期雏形阶段……→现代岩溶阶段”进行多期周期性循环发育。期间,岩溶区的不同部位(即地表、地下及地表与地下之间)分别进行着不同的成景过程,并分别形成对应三大类景观,而它们之间的关系则由各向分散、彼此独立→彼此制约、协同共生演替。

(6)现代岩溶成景过程,总体具备与“继承性改造和发育阶段”高度相似的成景特征,但两个阶段之间有着一个极为明显的差异:人类活动对现代岩溶过程的影响逐渐增强,并且是全方位、全过程、全要素的影响,涵盖着、贯穿于现代岩溶过程的不同部位、要素和过程。

Acknowledgements:

This study was supported by Guangxi-ASEAN Demonstration Platform for Research and Development on Sustainable Utilization of Karst Landscape Resources (Guangxi S&T Base and Human Resources Dedicated Project) (No. Guike AD 21196001), Shandong TaiShan Industrial Experts Programme (No. tscy20200416), and National Natural Science Foundation of China (No. 42172287).

参考文献:

- 蒋忠诚, 袁道先, 1999. 表层岩溶带的岩溶动力学特征及其环境和资源意义[J]. 地球学报, 20(3): 302-308.
- 刘戡, 王世杰, 刘秀明, 等, 2013. 贵州荔波黑洞碎屑沉积物宇宙成因核素 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 埋藏年龄[J]. 第四纪研究, 33(3): 437-444.
- 卢耀如, 1986. 中国喀斯特地貌的演化模式[J]. 地理研究, 5(4): 25-35.
- 任美鄂, 刘振中, 1983. 岩溶学概论[M]. 北京: 商务印书馆: 1-25.
- 阮骄杨, 胡超涌, 2010. 湖北清江和尚洞石笋方解石晶体的季节性生长及其环境控制[J]. 科学通报, 55(30): 2988.
- 王明达, 胡超涌, 周炼, 等, 2010. 土壤和围岩地球化学组成及气候对洞穴滴水水化学的影响——以湖北清江和尚洞为例[J]. 地质科技情报, 29(3): 97-103.
- 韦跃龙, 2009. 广西乐业国家地质公园地质遗迹成景机制及旅游开发模式研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 韦跃龙, 2020. 山东岩溶地貌与洞穴[M]. 北京: 地质出版社.
- 韦跃龙, 2021. 贵州绥阳国家地质公园白云岩喀斯特景观特征及其形成演化分析[M]. 北京: 地质出版社.
- 韦跃龙, 2022. 广西岩溶景观特征及其形成演化分析[M]. 南宁: 广西科学技术出版社.
- 韦跃龙, 陈伟海, 黄保健, 2010. 广西乐业国家地质公园地质遗迹成景机制及模式[J]. 地理学报, 65(5): 580-594.
- 韦跃龙, 陈伟海, 罗劭侃, 2016. 洞穴次生化沉积物与地质背景及洞穴环境的耦合关系——以广西巴马水晶宫为例[J]. 地理学报, 71(9): 1528-1543.
- 韦跃龙, 陈伟海, 罗劭侃, 2018a. 广西都安地下河地质公园喀斯特景观特征及其形成演化[J]. 热带地理, 38(1): 34-47.
- 韦跃龙, 陈伟海, 罗劭侃, 等, 2017. 洞穴呼吸及其影响因素[J]. 地质科技情报, 36(4): 82-94.
- 韦跃龙, 陈伟海, 罗劭侃, 等, 2018b. 贵州织金洞世界地质公园喀斯特成景机制及模式研究[J]. 地质论评, 64(2): 457-476.
- 韦跃龙, 蒋忠诚, 陈伟海, 等, 2020. 山东岩溶地貌特征及其形成演化分析[J]. 地球学报, 41(4): 561-574.
- 韦跃龙, 李成展, 陈伟海, 等, 2018d. 广西岩溶景观特征及其形成演化分析[J]. 广西科学, 25(5): 465-504.
- 韦跃龙, 李成展, 陈伟海, 等, 2019. 重庆奉节天坑地缝景区喀斯特景观特征及其形成演化分析[J]. 地球学报, 40(5): 747-766.
- 韦跃龙, 罗书文, 陈伟海, 等, 2018c. 贵州绥阳地质公园白云岩喀斯特景观特征及其形成演化分析[J]. 地球学报, 39(3): 365-383.
- 薛治国, 刘子琦, 陈浒, 2014. 喀斯特洞穴晶体生长速率的古气候重建意义[J]. 地球与环境, 42(1): 34-40.
- 袁道先, 2006. 现代岩溶学在中国的发展[J]. 地质论评, 52(6): 733-736.
- 张美良, 朱晓燕, 吴夏, 等, 2013. 广西巴马县水晶宫洞穴沉积物特征及其沉积环境[J]. 中国岩溶, 32(3): 345-357.
- 朱学稳, 2009. 我国峰林喀斯特的若干问题讨论[J]. 中国岩溶, 28(2): 155-168.

References:

- BAKER A, JEX C N, RUTLIDGE H, et al., 2016. An irrigation experiment to compare soil, water and speleothem tetraether membrane lipid distributions[J]. Organic Geochemistry, 94(1): 12-20.
- CAMPMAS E, MICHEL P, COSTAMAGNO S, et al., 2015. Were Upper Pleistocene human/non-human predator occupations at the Témara caves (El Harhoura 2 and El Mnasra, Morocco) influenced by climate change?[J]. Journal of Human Evolution, 78: 122-143.
- DORALE J A, 1998. Climate and vegetation history of the midcontinent from 75 to 25 ka: A speleothem record from crevice cave, Missouri, USA[J]. Science, 282(5395): 1871-1874.
- FINCH A A, SHAW P A, WEEDON G P, et al., 2001. Trace element variation in speleothem aragonite: Potential for palaeoenvironmental reconstruction[J]. Earth and Planetary Science Letters, 186(2): 255-267.
- GONZÁLEZ-LEMO S, JIMÉNEZ-SÁNCHEZ M, STOLL H M, 2015. Sediment transport during recent cave flooding events and characterization of speleothem archives of past flooding[J]. Geomorphology, 228: 87-100.
- JIANG Zhongcheng, YUAN Daoxian, 1999. Dynamics features of the epikarst zone and their significance in environments and resources[J]. Acta Geoscientica Sinica, 20(3): 302-308(in Chinese with English abstract).
- JOHNSON K, HU C, BELSHAW N, et al., 2006. Seasonal trace-element and stable-isotope variations in a Chinese speleothem: The potential for high-resolution paleomonsoon reconstruction[J]. Earth and Planetary Science Letters, 244(1-2): 394-407.
- KRAJCARZ M T, KRAJCARZ M, 2014. The 200, 000 year long record of stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) of cave bear (*Ursus spelaeus*) teeth from Biśnik Cave, Poland[J]. Quaternary International, 339-340: 119-130(in Chinese with English abstract).
- LI Zhenghua, DRIESE S G, CHENG Hai, 2014. A multiple cave deposit assessment of suitability of speleothem isotopes for reconstructing palaeo-vegetation and palaeo-temperature[J]. Sedimentology, 61(3): 749-766.
- LIU Yu, WANG Shijie, LIU Xiuming, et al., 2013. Cosmogenic nuclides ^{26}Al and ^{10}Be burial age of black cave sediments,

- Libo of Guizhou, China[J]. Quaternary Sciences, 33(3): 437-444.
- LU Yaoru, 1986. Models of Karst geomorphological evolutions in China[J]. Geographical Research, 5(4): 25-35(in Chinese with English abstract).
- ONAC B P, FORRAY F L, WYNN J G, et al., 2014. Guano-derived $\delta^{13}\text{C}$ -based paleo-hydroclimate record from Gaura cu Musca Cave, SW Romania[J]. Environmental Earth Sciences, 71(9): 4061-4069.
- REN Mei'e, LIU Zhenzhong, 1983. Introduction to karstology[M]. Beijing: The Commercial Press(in Chinese).
- RUAN Jiaoyang, HU Chaoyong, 2010. Seasonal growth and environmental control of calcite crystals of stalagmite in Heshangdong, Qingjiang, Hubei Province[J]. Chinese Science Bulletin, 55(30): 2988(in Chinese).
- WANG Mingda, HU Chaoyong, ZHOU Lian, et al., 2010. Impact of soil, bedrock geochemical composition and climate on hydrochemistry of cave drip water: A case study of heshang cave, Qingjiang, Hubei[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 29(3): 97-103(in Chinese).
- WEI Yuelong, 2020. Karst Landforms and Caves of Shandong[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- WEI Yuelong, 2021. Characteristics and Formation and Evolution Analysis of the Dolomite Karst Landscape of Suiyang Geopark, Guizhou Province[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- WEI Yuelong, 2022. Characteristics and Formation and Evolution Analysis of the Karst Landscape of Guangxi[M]. Nanning: Guangxi Science and Technology Press(in Chinese).
- WEI Yuelong, CHEN Weihai, HUANG Baojian, 2010. Geological relics formation mechanism and model of the Leye national geopark, Guangxi[J]. Acta Geographica Sinica, 65(5): 580-594(in Chinese with English abstract).
- WEI Yuelong, CHEN Weihai, HUANG Baojian, 2010. Geological relics formation mechanism and model of the Leye national geopark, Guangxi[J]. Acta Geographica Sinica, 65(5): 580-594(in Chinese with English abstract).
- WEI Yuelong, CHEN Weihai, LUO Qukan, 2016. Coupling relationship among speleothems, geological background and cave environment[J]. Acta Geographica Sinica, 71(9): 1528-1543(in Chinese with English abstract).
- WEI Yuelong, CHEN Weihai, LUO Qukan, 2018a. Characteristics, formation and evolution of the Karst landscape of the Du'an underground river geopark, Guangxi[J]. Tropical Geography, 38(1): 34-47(in Chinese with English abstract).
- WEI Yuelong, CHEN Weihai, LUO Qukan, et al., 2017. Study on cave respiration and its impacting factors[J]. Geological Science and Technology Information, 36(4): 82-94(in Chinese with English abstract).
- WEI Yuelong, CHEN Weihai, LUO Qukan, et al., 2018b. Study on the Karst landscape formation mechanism and model of the Zhijindong cave global geopark, Guizhou Province[J]. Geological Review, 64(2): 457-476(in Chinese with English abstract).
- WEI Yuelong, JIANG Zhongcheng, CHEN Weihai, et al., 2020. An analysis of characteristics, formation and evolution of the Karst landforms, Shandong Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(4): 561-574(in Chinese with English abstract).
- WEI Yuelong, LI Chengzhan, CHEN Weihai, et al., 2018d. Characteristics and formation and evolution analysis of the Karst landscape of Guangxi[J]. Guangxi Sciences, 25(5): 465-504(in Chinese with English abstract).
- WEI Yuelong, LI Chengzhan, CHEN Weihai, et al., 2019. Characteristics and formation and evolution analysis of the Karst landscape of Fengjie Tiankeng difeng scenic area, Chongqing[J]. Acta Geoscientica Sinica, 40(5): 747-766(in Chinese with English abstract).
- WEI Yuelong, LUO Shuwen, CHEN Weihai, et al., 2018c. Characteristics and formation and evolution analysis of the dolomite Karst landscape of Suiyang geopark, Guizhou Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(3): 365-383(in Chinese with English abstract).
- XUE Zhiguo, LIU Ziqi, CHEN Hu, 2014. Karstic cave crystal growth rate and its significance in climate reconstruction[J]. Earth and Environment, 42(1): 34-40(in Chinese with English abstract).
- YUAN Daoxian, 2006. The development of modern karstology in China[J]. Geological Review, 52(6): 733-736(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Meiliang, ZHU Xiaoyan, WU Xia, et al., 2013. Characteristics of deposits and the depositional environment in the Shuijinggong cave in Bama, Guangxi[J]. Carsologica Sinica, 32(3): 345-357(in Chinese with English abstract).
- ZHU Xuewen, 2009. Discussions on Fenglin Karst in China[J]. Carsologica Sinica, 28(2): 155-168(in Chinese with English abstract).