

岩溶关键带植被对水循环过程的影响作用研究

康志强^{1,2,3)}, 陈 骏¹⁾, 袁道先³⁾, 何师意³⁾, 邓 艳³⁾, 陈 旻¹⁾,
刘媛媛¹⁾, 姜光辉³⁾, 张勤军⁴⁾

1)表生地球化学教育部重点实验室/南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210093;
2)中国-东盟地学合作中心(南宁), 广西南宁 530023; 3)中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西桂林 541004;
4)广西壮族自治区地质调查院, 广西南宁 530023

摘 要: 随着农村能源结构的调整和多项林草植被保护政策的实施, 我国西南石漠化趋势得到初步的遏制。岩溶作用过程是由水循环驱动的碳循环过程。岩溶区森林植被的水文效应, 不仅促进植被自身的生长, 还能进一步促进岩溶作用过程。在西南岩溶区选择了 2 个不同植被覆盖条件的地下水系统为研究对象, 通过地下水系统降水量、地下水径流量、水化学组分和同位素组分等监测指标的对比分析, 发现岩溶关键带中, 森林植被对水循环过程具有明显的影响。植被通过蒸腾作用而在林区激发二次降水, 使林区降水量明显增大; 森林植被对强降水的截流消洪作用比较明显, 在降水-径流曲线上表现为森林覆盖区降水洪峰产生比较滞后而排泄过程中退水曲线上较为平滑; 森林植被对岩溶关键带地下水中无机碳的贡献比较大, 并能有效的增强岩溶作用。

关键词: 森林植被; 水循环; 石漠化治理; 岩溶关键带

中图分类号: P642.252 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2020.080201

The Effect of Vegetation on Groundwater Cycle in the Critical Zone of the Karst Area

KANG Zhi-qiang^{1,2,3)}, CHEN Jun¹⁾, YUAN Dao-xian³⁾, HE Shi-yi³⁾, DENG Yan³⁾, CHEN Yang¹⁾,
LIU Yuan-yuan¹⁾, JIANG Guang-hui³⁾, ZHANG Qin-jun⁴⁾

1) Key Laboratory of Surficial Geochemistry, Ministry of Education/School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093;
2) China-ASEAN Geosciences Cooperation Center (Nanning), Nanning, Guangxi 530023;
3) Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004;
4) Guangxi Institute of Geological Survey, Nanning, Guangxi 530023

Abstract: With the adjustment of rural energy structure and the implementation of a few forest and grass vegetation protection policies, the trend of rocky desertification in southwest China has been initially contained. Karstification is a carbon cycle process that is driven by the water cycle. The hydrological effect of forest vegetation can not only promote the growth of vegetation itself but also further promote the karstification process. In this paper, two karst groundwater systems with different vegetation coverages in the karst critical zone of southwest China were chosen as study areas. The monitoring of indicators, including precipitation, groundwater discharge, hydrochemical components, and isotope composition, was conducted, and the effect of vegetation on groundwater cycle was discussed. The results indicate that forest can effectively enhance precipitation in the forest critical zone. Because vegetation can stimulate secondary precipitation by transpiration, the precipitation in the forest area is larger than that in other places obviously. Forest vegetation has obvious function of water interception and

本文由广西重点研发计划(编号: 桂科 AB110004; 桂科 AB18126062)、国家重点研发计划项目(编号: 2016YFC0502302; 2016YFC0502500)、广西科技基地和人才专项项目(编号: 桂科 AD17129052)和国家自然科学基金项目(编号: 41502260; 41472239)联合资助。

收稿日期: 2020-04-14; 改回日期: 2020-07-27; 网络首发日期: 2020-08-04。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 康志强, 男, 1982 年生。高级工程师。从事岩溶水文地质调查研究工作。通讯地址: 530023, 广西南宁市园湖北路 21 号。电话: 0771-5654828。E-mail: zqkang000@126.com。

flood elimination. The max value of groundwater discharge in the forest cover area is more lagging behind and the rainfall-runoff curve is smoother than other regions with poor vegetation. In addition, forest vegetation contributes a lot to inorganic carbon in groundwater of karst critical zone and can effectively enhance karst process.

Key words: forest vegetation; water cycle; rocky desertification control; the critical zone of karst area

近些年来,我国在石漠化治理方面做出了诸多的探索研究(蒋忠诚等, 2009; 曹建华等, 2016; 李强等, 2017; 何霄嘉等, 2019; 肖林颖等, 2021), 形成了一套基本成熟的石漠化治理模式(曹建华等, 2008; Jiang et al., 2014), 取得了明显的效果(蒋忠诚等, 2008; 杜文鹏等, 2019; 王克林等, 2019), 石漠化蔓延的势头也得到了有效的遏制(国家林业和草原局, 2018), 且持续向好发展。2019年2月12日, 美国航天局(NASA)发布消息称, 由于中国和印度的人类活动的影响, 在过去20年中, 地球变得越来越绿了, 尤其在中国最为显著, 占到全球新增绿叶面积的25%(Chen et al., 2019)。岩溶作用过程是由地下水驱动的地质循环过程, 是大气圈、岩石圈、生物圈、水圈相互作用最密切的地带(袁道先, 1993, 1995; Yuan, 1997b), 因而也是岩溶区地球关键带的最主要构成部分。地球关键带空间界限范围为上到植被冠层, 下到地下水含水层底部, 包含近地表的生物圈、大气圈、整个土壤圈以及水圈和岩石圈近地表部分(National Research Council, 2001; Lin et al., 2005; Sparks, 2005; Lin, 2010)。尤其在岩溶区, 关键带中水循环过程显得格外重要, 其不仅能促进岩溶作用过程本身, 还进一步促进了大气、植被和碳酸盐岩之间的碳循环过程。研究表明, 岩溶区森林植被可以增强岩溶小流域的降水-径流过程(Mcculloch and Robinson, 1993), 同时, 植被自身生长过程还会影响岩溶作用过程(曹建华和袁道先, 1999; 何师意等, 2001; 杨安学和彭云, 2007)。

本项研究在我国西南岩溶区选择了2个不同植被覆盖条件的岩溶关键带中的地下水系统为研究对象, 通过对岩溶水循环特征及水化学特征的对比, 研究森林植被对地下水循环过程和水化学组分的影响。

1 研究区概况及取样点布置

选择的两个研究点地域相近, 均处于亚热带季风气候区, 具有高温多雨、降雨集中、湿度大等特点。但其所处的地貌单元和植被覆盖条件不同, 其岩溶关键带的结构和功能也具有明显的不同。其中贵州茂兰国家级自然保护区位于贵州省东南部, 地表标高在450~1100 m之间, 处于云贵高原向广西盆地过渡的斜坡地带。森林覆盖率在90%以上。出露地层为石炭系中统灰岩、白云岩。地貌以峰丛洼

地、谷地为主。该区人口密度较小, 受人类活动的干预程度甚微。板寨地下河发育于保护区内, 为独立的岩溶地下水系统(图 1-R1), 仅受大气降水的补给。在石炭系中统碳酸盐岩和下统砂页岩的地层界面处发育岩溶管道, 系统内地下水在地下河出口处全部排向地表。板寨自动化监测站建于地下河出口下游, 其汇水面积共计27.26 km²。

柳州市农耕区位于广西壮族自治区中北部柳州市区周围, 处于广西平原桂中盆地内, 标高在90~150 m之间。为峰丛谷地地貌, 地势较平坦, 出露地层为石炭系至二叠系碳酸盐岩。谷底内为主要的农耕区, 人口分布较为稠密, 农业活动较为发达。山上植被稀疏, 以灌木为主。官村地下河位于峰丛洼地向峰丛谷地的过渡区, 亦为独立的岩溶地下水系统(图 1-R2), 仅受大气降水的补给。其流域总面积约28.90 km², 全长约7 km, 规模与板寨地下河相似, 平面展布形态呈简单树枝状, 构造呈南北向展布。地下河水力坡度较缓, 约为13.3‰, 主体流向自北向南, 于大良—潭头谷地边缘排泄, 形成地下河出口, 在地下河出口处修建了自动化监测站, 获取了自2015年8月至2018年12月共计3年多的连续数据。柳州农耕区其他平原地区岩溶发育整体较弱, 地下水一般以分散排泄为主。

2 数据采集

2010年, 在茂兰国家级自然保护区布置了7个水化学取样点, 取样频次每次/月。于2015年9月至2016年4月, 在柳州市周边SS1区、SS2和SS3等3个区域, 在丰水季节和枯水季节2批次共采集水样39组。在板寨地下河出口和官村地下河出口处均建有监测站, 安装澳大利亚 Greenspan 公司生产的 CDTP300 多参数水质监测仪, 配备雨量筒和矩形薄壁堰。同步监测指标为水体水温、水位、电导率、pH 值以及降水量, 其精度分别为0.1℃、0.01 m、0.01 μs/cm、0.1 pH 单位和0.5 mm。碳同位素标准样品为V-PDB, 测试仪器为MAT 235 气体稳定同位素质谱仪, 测定精度分别为 $\delta^{13}\text{C} \leq 0.01\%$ 。

3 结果及讨论

3.1 森林植被的气候效应

1984年茂兰喀斯特森林科学考察过程中, 发现森林小气候特征较明显, 主要表现为云雾较多, 阴

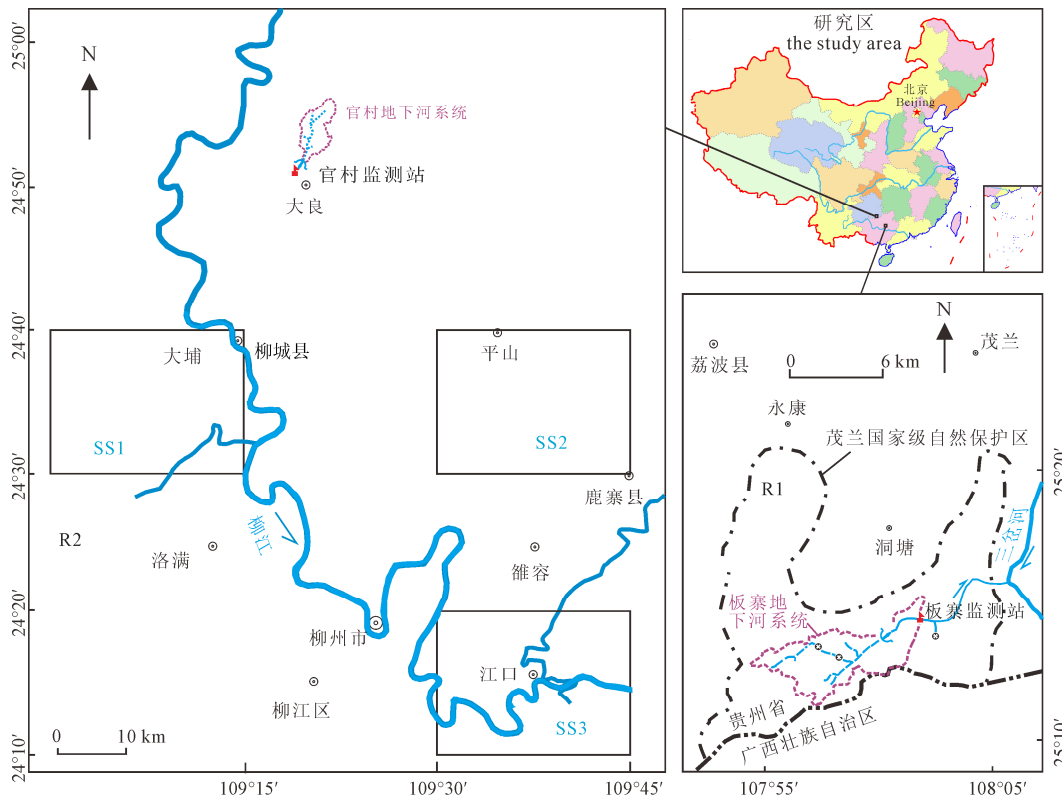


图 1 研究区地理位置图
Fig. 1 Geographical location of the study areas

雨天气出现频繁,日照时数相对较少,且年均气温低于荔波县气象站 3℃左右,降水量明显较大(周政贤, 1987)。2009 年,中国地质科学院岩溶地质研究所在茂兰保护区建立了板寨水文监测站(海拔 530 m),对林区降水量进行连续监测,发现茂兰保护区降水量值通常明显大于周围区域。如 2010 年,茂兰自然保护区降水量达 1 710.0 mm,而荔波县气象站(海拔 432.9 m)降水量仅为 1 058.9 mm,说明茂兰自然保护区森林的气象水文效应明显,森林激发降水量值占全年降水量的 38.08%,显著高于预测值(表 1)。

3.2 植被对流域水循环的调控作用

通过对多场暴雨过程中降水-径流曲线分析(图 2),发现板寨地下河和官村地下河的在雨季暴涨暴落现象非常明显,但去噪后退水过程流量曲线衰减部分拟合效果基本一致,说明每场暴雨事件的流量衰减方式相同。从降水-径流曲线上可以看出,虽然板寨地下河流量的峰值较大,但官村地下河对降水的响应比板寨地下河迅速,说明森林植被能起到有效的截流消洪作用。

从地下河流量的衰减曲线来看,初期地下河水流流量衰减速率较快,水文地质固有条件控制洪水的消减过程。但在退水后期,板寨地下河洪水过后退水曲线的衰减过程非常平滑,说明从管道流向基岩裂隙流的排水过渡过程中,森林植被发挥了重要的

表 1 茂兰保护区与荔波气象站降水情况对比表
(单位: mm)

Table 1 Comparison of precipitation data in Maolan karst forest and Libo station (unit: mm)

月份	2010 年		1984 年*	
	荔波站	保护区	荔波站	保护区(估算值)
1 月	29.9	73.0	21.3	29.20
2 月	0.8	5.5	26.6	35.90
3 月	1.5	15.0	41.1	54.35
4 月	64.1	116.0	101.7	131.30
5 月	106.7	225.5	180.1	230.85
6 月	284.6	391.5	231.7	296.40
7 月	178.8	353.0	246.0	314.60
8 月	166.4	148.5	221.7	283.70
9 月	108.1	221.0	93.8	121.30
10 月	37.3	40.0	87.4	113.15
11 月	23.8	40.0	45.7	60.20
12 月	56.9	81.0	23.4	31.85
合计	1 058.9	1 710.0	1 320.5	1 702.80

注: *根据周正贤(1987)统计,其余为实测。

调节作用;而官村地下河流域缺乏森林植被覆盖,其退水曲线的拐点十分明显,表现了由小型管道流直接向基岩裂隙流的过渡。

3.3 植被对岩溶作用过程的调控作用

研究表明,海相碳酸盐岩矿物 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 0‰至 2.0‰之间(Drever, 1997); C_3 植物分布区土壤 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 -23‰ ~ -40‰之间,平均值为 -27‰; C_4 植物区土壤 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 -9‰ ~ -19‰之间,

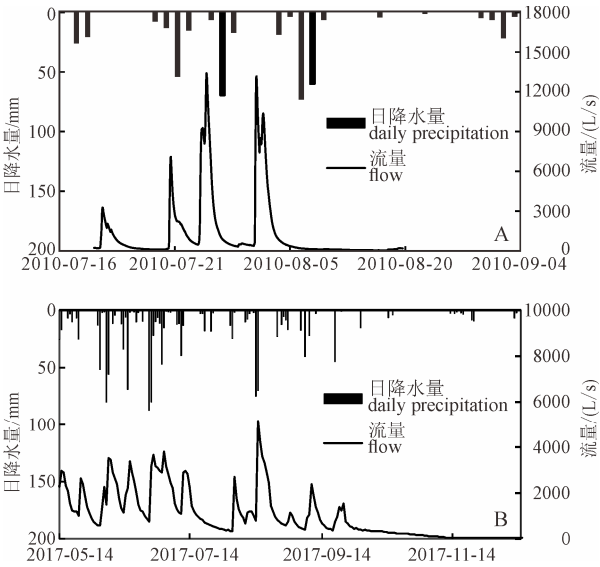


图 2 板寨(A)和官村(B)地下河降水-流量过程曲线
Fig. 2 Rainfall-flow dynamic of Banzhai (A) and Guancun (B) subterranean river system

平均值为 -12‰ (Smith and Epstein, 1971)。根据岩溶动力学方程式,岩溶水中碳有两个来源,其一为碳酸盐岩矿物,其二来自大气(包括自由空气和土壤空气),且大气碳源和碳酸盐矿物的碳源为1:1(Bögli, 1980; Dreybrodt, 1980; Yuan, 1997a)。因此有研究者认为在良好的植被覆盖条件下,海相碳酸盐岩分布区岩溶水中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的预测值应该为 -11‰ (Grootes et al., 1969; Mook, 1986)。在柳州市

表 2 柳州农耕区分散流系统地下水中 HCO_3^- 浓度和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值

Table 2 HCO_3^- concentrations and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ values of groundwater in the Liuzhou decentralized flow system

样品序号	HCO_3^- / (mg/L)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ / ‰	样品序号	HCO_3^- / (mg/L)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ / ‰
WS01	246	-10.50	WS21	227	-8.60
WS02	248	-8.96	WS22	133	-10.45
WS03	270	-4.86	WS23	232	-9.50
WS04	161	-7.22	WS24	132	-12.40
WS05	141	-10.56	WS25	234	-8.49
WS06	166	-9.10	WS26	235	-12.62
WS07	171	-6.04	WS27	240	-9.82
WS08	172	-7.74	WS28	246	-11.70
WS09	224	-10.80	WS29	191	-10.83
WS10	236	-9.18	WS30	248	-6.78
WS11	191	-7.71	WS31	283	-9.51
WS12	284	-10.02	WS32	287	-9.24
WS13	191	-6.12	WS33	183	-11.66
WS14	168	-10.46	WS34	301	-8.58
WS15	219	-9.03	WS35	271	-10.67
WS16	229	-8.44	WS36	176	-10.86
WS17	222	-8.28	WS37	210	-10.55
WS18	225	-9.66	WS38	261	-9.95
WS19	245	-9.70	WS39	235	-9.24
WS20	149	-9.54			

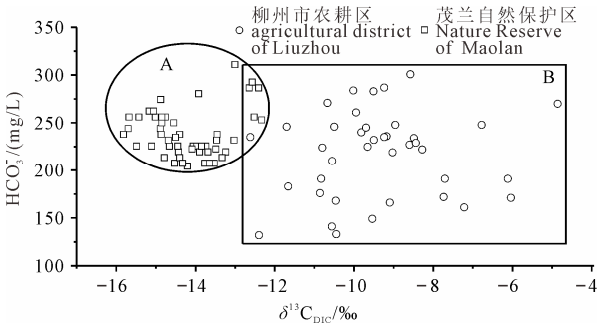


图 3 研究区 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值与水体 HCO_3^- 含量关系图
Fig. 3 Relationship between the $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ and HCO_3^- in the karst water

农耕区,受酸雨和施肥等影响,大部分岩溶水点的值 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 介于 -8‰ ~ -10‰ 之间(表 2),统计值为 $(-9.08\pm 4.70)\text{‰}$ (图 3),值域明显较宽。而在森林覆盖条件良好的茂兰森林保护区,岩溶水中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值均小于 -11‰ (康志强和何师意, 2011),统计值为 $(-14.18\pm 1.64)\text{‰}$,其值整体较茂兰自然保护区偏负。通过对比发现,森林区参与岩溶作用的大气 CO_2 的碳同位素受森林植被的控制左右较为明显。

4 结论

不同类型岩溶关键带中地下水循环模式不同,其中的森林植被对地下水系统内部水循环和水化学组分均有明显的影响,具体表现在以下方面:

- (1)植被通过蒸腾作用而在林区激发二次降水,使林区降水量明显增大;
- (2)在降水-径流曲线上,森林覆盖区降水洪峰产生比较滞后,而地下水排泄过程中退水曲线较为平滑,说明森林植被具有明显的截流消洪作用;
- (3)相比柳州农耕区,茂兰自然保护区地下水中 HCO_3^- 浓度整体上较大,碳稳定同位素也明显偏负,其两者的值域也明显较小。说明森林植被对岩溶关键带地下水中无机碳的贡献比较大,并能有效增强岩溶作用。

Acknowledgements:

This study was supported by Scientific Research and Technology Development Program of Guangxi (Nos. GuikeAB110004 and GuikeAB18126062), National Key Research and Development Program of China (Nos. 2016YFC0502302 and 2016YFC0502500), Science and Technology Base and Talent Special Project of Guangxi (No. AD17129052), and National Natural Science Foundation of China (Nos. 41502260 and 41472239).

参考文献:

曹建华, 袁道先. 1999. 石生藻类、地衣、苔藓与碳酸盐岩持水性及生态意义[J]. 地球化学, 28(3): 248-256.

- 曹建华, 邓艳, 杨慧, 蒲俊兵, 朱同彬, 蓝芙宁, 黄芬, 李建鸿. 2016. 喀斯特断陷盆地石漠化演变及治理技术与示范[J]. 生态学报, 36(22): 7103-7108.
- 曹建华, 袁道先, 童立强. 2008. 中国西南岩溶生态系统特征与石漠化综合治理对策[J]. 草业科学, 25(9): 40-50.
- 杜文鹏, 闫慧敏, 甄霖, 胡云锋. 2019. 西南岩溶地区石漠化综合治理研究[J]. 生态学报, 39(16): 5798-5808.
- 国家林业和草原局. 2018. 中国·岩溶地区石漠化状况公报[R]. 北京: 国家林业和草原局.
- 何师意, 冉景丞, 袁道先, 谢运球. 2001. 不同岩溶环境系统的水文和生态效应研究[J]. 地球学报, 22(3): 265-270.
- 何霄嘉, 王磊, 柯兵, 岳跃民, 王克林, 曹建华, 熊康宁. 2019. 中国喀斯特生态保护与修复研究进展[J]. 生态学报, 39(18): 6577-6585.
- 蒋忠诚, 李先琨, 曾馥平, 邱泗杰, 邓艳, 罗为群, 覃小群, 谢运球, 蓝芙宁. 2009. 岩溶峰丛山地脆弱生态系统重建技术研究[J]. 地球学报, 30(2): 29-40.
- 蒋忠诚, 李先琨, 覃小群, 吕仕洪, 罗为群, 蓝芙宁, 曹建华. 2008. 论岩溶峰丛洼地石漠化的综合治理技术——以广西平果果化示范区为例[J]. 中国岩溶, 27(1): 50-55.
- 康志强, 何师意. 2011. 表层岩溶系统碳迁移路径及其土被效应探讨[J]. 中国岩溶, 30(4): 456-460.
- 李强, 蒲俊兵, 黄妮, 杜红梅, 祁向坤, 王力, 杨慧. 2017. 断陷盆地生态环境地质分异及石漠化演变机理的研究途径[J]. 地球科学进展, 32(9): 899-907.
- 王克林, 岳跃民, 陈洪松, 吴协保, 肖峻, 祁向坤, 张伟, 杜虎. 2019. 喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应[J]. 生态学报, 39(20): 7432-7440.
- 肖林颖, 吴秀芹, 周金星, 肖桂英. 2021. 岩溶断陷盆地典型县域石漠化治理综合效益评价——以云南建水县为例[J]. 地球学报, 42(3): 444-450.
- 杨安学, 彭云. 2007. 贵州喀斯特森林生态系统水文生态功能的研究[J]. 安徽农业科学, 35(36): 11995-11997, 12037.
- 袁道先. 1993. 碳循环与全球岩溶[J]. 第四纪研究, 13(01): 1-6.
- 袁道先. 1995. 岩溶作用对环境变化的敏感性及其记录[J]. 科学通报, 40(13): 1210-1213.
- 周政贤. 1987. 茂兰喀斯特森林科学考察集[M]. 贵阳: 贵州人民出版社.

References:

- BÖGLI A. 1980. Karst Hydrology and Physical Speleology[M]. New York: Springer-Verlag.
- CAO Jian-hua, DENG Yan, YANG Hui, PU Jun-bing, ZHU Tong-bin, LAN Fu-ning, HUANG Fen, LI Jiang-hong. 2016. Rocky desertification evolution, treatment technology and demonstration in karst faulted basins, Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 36(22): 7103-7108(in Chinese with English abstract).
- CAO Jian-hua, YUAN Dao-xian, TONG LI-Qiang. 2008. Features of karst ecosystem and integrating measure for rock desertification in Southwest China[J]. Pratacultural Science, 25(9): 40-50(in Chinese with English abstract).
- CAO Jian-hua, YUAN Dao-xian. 1999. Relationship between water-holding of carbonate rock and saxicolous algae, lichen and moss and its ecological significance[J]. Geochimical, 28(3): 248-256(in Chinese with English abstract).
- CHEN C, PARK T, WANG X, PIAO S, XU B, CHATURVEDI R K, FUCHS R, BROVKIN V, CIAIS P, FENSHOLT R, TØMMERVIK H, BALA G, ZHU Z, NEMANI R R, MYNENI R B. 2019. China and India lead in greening of the world through land-use management[J]. Nature Sustainability, 2(2): 122-129.
- DREVER J I. 1997. The Geochemistry of Natural Waters: Surface and Groundwater Environments (3rd Edition)[M]. Upper Saddle River: Prentice-Hall.
- DREYBRODT W. 1980. Kinetics of the dissolution of calcite and its applications to karstification[J]. Chemical Geology, 31: 245-269.
- DU Wen-peng, YAN Hui-min, ZHEN Lin, HU Yun-feng. 2019. The experience and practice of desertification control in karst region of southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 39(16): 5798-5808(in Chinese with English abstract).
- GROOTES P M, MOOK W G, VOGEL J C. 1969. Isotopic fractionation between gaseous and condensed carbon dioxide[J]. Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei, 221(3): 257-273.
- HE Shi-yi, RAN Jing-cheng, YUAN Dao-xian, XIE Yun-qiu. 2001. A Comparative Study on Hydrological and Ecological Effects in Different Karst Ecosystems[J]. Acta Geoscientia Sinica, 22(3): 265-270(in Chinese with English abstract).
- HE Xiao-jia, WANG Lei, KE Bing, YUE Yue-min, WANG Ke-lin, CAO Jian-hua, XIONG Kang-ning. 2019. Progress on ecological conservation and restoration for China Karst[J]. Acta Ecologica Sinica, 39(18): 6577-6585(in Chinese with English abstract).
- JIANG Z, LIAN Y, QIN X. 2014. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. Earth-Science Reviews, 132: 1-12.
- JIANG Zhong-cheng, LI Xian-kun, QIN Xiao-qun, LÜ Shi-hong, LUO Wei-qun, LAN Fu-ning, CAO Jian-hua. 2008. Comprehensive improving technique to rocky desertification in karst peak-cluster depression——A case study at Guohua Ecological Experimental Area, Pingguo, Guangxi[J]. Carsologica Sinica, 27(1): 50-55(in Chinese with English abstract).
- JIANG Zhong-cheng, LI Xian-kun, ZENG Fu-ping, QIU Si-jie, DENG Yan, LUO Wei-qun, QIN Xiao-qun, XIE Yun-qiu, LAN Fu-ning. 2009. Study of Fragile Ecosystem Reconstruction Technology in the Karst Peak-cluster Mountain[J]. Acta Geoscientia Sinica, 30(2): 29-40(in Chinese with English abstract).
- KANG Zhi-qiang, HE Shi-yi. 2011. The regolith effect on carbon transfer path in epi-karst system[J]. Carsologica Sinica, 30(4): 456-460(in Chinese with English abstract).
- LI Qiang, PU Jun-bing, HUANG Ni, DU Hong-mei, QI Xiang-kun, WANG Li, YANG Hui. 2017. A Research Approach for Ecological, Environmental and Geological Differentiation of

- Rocky Desertification and Its Driving Mechanism in Karst Graben Basin[J]. *Advances in Earth Science*, 32(9): 899-907 (in Chinese with English abstract).
- LIN H, BOUMA J, WILDING L P, RICHARDSON J L, KUTÍLEK M, NIELSEN D R. 2005. *Advances in Hydropedology*[M]. USA: Academic Press.
- LIN H. 2010. Earth's Critical Zone and hydropedology: concepts, characteristics, and advances[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(1): 25-45.
- MCCULLOCH J S G, ROBINSON M. 1993. History of forest hydrology[J]. *Journal of Hydrology*, 150(2-4): 189-216.
- MOOK W G. 1986. ^{13}C in atmospheric CO_2 [J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 20(2-3): 211-223.
- National Research Council. 2001. *Basic Research Opportunities in Earth Science*[M]. Washington, DC: The National Academies Press.
- SMITH B N, EPSTEIN S. 1971. Two Categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ Ratios for Higher Plants[J]. *Plant Physiology*, 47(3): 380-384.
- SPARKS D, BRANTLEY S, CHOROVER J. 2005. *Frontiers in Exploration of the Critical Zone: Report of a workshop sponsored by the National Science Foundation (NSF)*[R]. Newark.
- State Forestry and Grassland Administration. 2018. *Bulletin on Rocky Desertification in Karst Areas of China*[R]. Beijing: State Forestry and Grassland Administration(in Chinese).
- WANG Ke-lin, YUE Yue-min, CHEN Hong-song, WU Xie-bao, XIAO Jun, QI Xiang-kun, ZHANG Wei, DU Hu. 2019. The comprehensive treatment of karst rocky desertification and its regional restoration effects[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 39(20): 7432-7440(in Chinese with English abstract).
- XIAO Lin-ying, WU Xiu-qin, ZHOU Jin-xing, XIAO Gui-ying. 2021. Comprehensive Benefit Evaluation of Rocky Desertification Control in the Typical County of Karst Fault Basin: A Case Study of Jianshui County, Yunnan Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(3): 444-450(in Chinese with English abstract).
- YANG An-xue, PENG Yun. 2007. Summary of Study on the Eco-hydrological Functions of Karst Forest Ecosystems in Guizhou[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 35(36): 11995-11997, 12037(in Chinese with English abstract).
- YUAN Dao-xian. 1993. Carbon Cycle and Global Karst[J]. *Quaternary Science*, 13(1): 1-6(in Chinese with English abstract).
- YUAN Dao-xian. 1995. The research of Karst and global change[J]. *Advance in Earth Sciences*, 10(05): 471-474(in Chinese with English abstract).
- YUAN Dao-xian. 1997a. Sensitivity of karst process to environmental change along the PEP II transect[J]. *Quaternary International*, 37: 105-113.
- YUAN Dao-xian. 1997b. The carbon cycle in karst[J]. *Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge*, 108(suppl-Bd): 91-102.
- ZHOU Zheng-xian. 1987. *Scientific investigation of karst forest in maolan*[M]. Guiyang: Guizhou People's Publishing House(in Chinese with English abstract).