

中国典型地区岩溶水资源及其生态水文特性

卢耀如 张凤娥 刘长礼 童国榜 张云

中国地质科学院水文地质环境地质研究所,石家庄,050061

摘要 本文比较中国南北方岩溶水特性及其水资源。在中国南方主要岩溶地区,已知有3358条岩溶地下河系统,枯季流量有 $420 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,目前开发量只有8%~15%。而在中国北方岩溶地区主要形成平均流量在 $1 \sim 13 \text{ m}^3/\text{a}$ 、流域面积在几百至4000 km^2 的近百个大的岩溶泉系统,其水资源开采量已达70%~80%。对一些典型中国岩溶生态水文特性,主要由6个方面,包括水环境、生态特性、母岩与土之间的特质、结构、生物—地质作用及孢粉等方面予以探讨。根据主要的生态条件和人工效应,对有关地质环境与石漠化予以评判。

关键词 岩溶 水资源 生态水文特性

Karst Water Resources in Typical Areas of China and Their Eco-hydrological Characteristics

LU Yaoru ZHANG Feng'e LIU Changli TONG Guobang ZHANG Yun

Institute of Hydrogeology and Environment Geology, CAGS, Shijiazhuang, 050061

Abstract This paper deals with different karst water features and water resources in southern and northern China. In the main karst regions of southern China, there are over 3,358 well developed karst subterranean river systems with total discharge of about $420 \times 10^8 \text{ m}^3$ in the dry season; nevertheless, the exploiting rates are only 8%~15%. In the main karst regions of northern China, over 100 large karst spring systems cover catchment areas from 500 km^2 to over 4,000 km^2 in size, of which the average discharges range from some $1 \text{ m}^3/\text{s}$ to $13 \text{ m}^3/\text{s}$, and the exploiting rates are 70%~80%. The discussion on the eco-hydrological features of some typical karst regions in China includes six aspects, namely, water environment, ecological features, materials and structures between parent rock and soil, bio-geological processes and spore-pollens. The qualitative evaluation of eco-geology and rocky desertification in karst regions should be based on the main karst ecological conditions and artificial impacts.

Key words karst water resources eco-hydrogeology

中国岩溶广泛发育(卢耀如等,1973,1986)。但是,在中国南北方主要岩溶地区,其特性不同(卢耀如等,1999,2003)。在两个区域岩溶发育的差异性,不仅表现在地貌类型上,也形成不同的岩溶水系统。由于人类活动,其生态水文特性受到显著的影响,研究生态水文是一个非常重要的主题。本文是综合了涉及到中国南北方的水资源、云南石林地区的生态—地质与硫酸岩岩溶与复合岩溶等方面的研究成果,以讨论下面几个方面的问题。

1 中国南北方岩溶水资源对比

1.1 中国南方

在中国,所有的省、自治区和直辖市都有岩溶水资源。云南、贵州、四川、重庆、广西、湖南和湖北7个省、市、自治区,总面积176万 km^2 。厚层碳酸盐岩分布面积有54.8万 km^2 ,占总面积30.9%;薄层(及夹层)碳酸盐岩分布面积约18.98万 km^2 ,占总面积的10.73%,则整个碳酸盐岩分布面积占总面积

本文由国家自然科学基金项目“硫酸盐岩溶发育机理与环境演化效应研究”(编号:49872095)和中国石林研究中心项目“石林发育过程与地质—生态环境演化研究”(编号:B99002)联合资助。

改回日期:2006-09-01;责任编辑:刘志强。

第一作者简介:卢耀如,男,1931年生,研究员,中国工程院院士,博士生导师。主要从事水文地质、工程地质与环境地质实践及研究;通讯地址:050061,河北省石家庄市石岗大街406号中国地质科学院水文地质环境地质研究所;E-mail:ylu@mail.tongji.edu.cn。

表 1 中国南方主要地区岩溶水资源简表
Table 1 Karst water resources in main regions of the South China

地区	地下水资源 / $\times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$	岩溶水资源 / $\times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$	岩溶水资源 地下水资源 /%
云南	742	345	46
贵州	479	386	80
四川	551	135	24
重庆	160	118	73
广西	699	374	53
湖南	456	263	57
湖北	416	185	44
总计	3503	1806	51

积的 41.31%，这片地区降雨量 1000~2200 mm，平均年气温为 16~22℃，本区气候条件有利于岩溶发育。中国南方裸露岩溶类型主要属于广泛溶蚀岩溶类型，限制溶蚀岩溶类型及溶蚀侵蚀岩溶类型(卢耀如, 1986)，岩溶水资源见表 1(Lu, 2005)，年人均地下水资源量是 514~1784 m³/a，而人均岩溶水资源量是 157~1053 m³/a。

在中国南方主要岩溶地区，经过调查有 3358 条岩溶水系统，枯水期总流量达 426 亿 m³/a(表 2)，可以划分为两类。岩溶水特性在岩溶化含水层中，与孔隙及裂隙地层相比不同，三相流(卢耀如, 1988a, 1988b)、洞穴水流系统(Atkinson, 1977, 1981; 卢耀如等, 1999)、水化学与水文(White, 1988; Chen et al., 2004)和洞穴探测(Jackson, 1982; Waltham, 1985; Zhang et al., 1988; Ford et al., 1989; Stanka et al., 2004)及有关岩溶洞穴效应(Culshaw et al., 1987; 卢耀如, 1993, 2003; Beck, 1993)，曾经在一系列有关岩溶出版物中予以讨论。由于本文篇幅所限，

表 2 中国南方典型地区岩溶地下水系统
Table 2 Karst groundwater system in different regions in South China

地区	地下暗流数量	枯水期流量 / $\times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$
云南	148	39.02
贵州	1130	71.35
四川	895	63.96
重庆	201	28.68
广西	435	191
湖南	338	17.65
湖北	211	14.85
总计	3358	426.69

只讨论两种岩溶水系统。

在中国南方主要岩溶地区的岩溶水系统，可以划分为两种类型：

(1) 地下岩溶伏流

这是地表河流消入地下洞穴通道，流经一段距离后，再涌出而成地表河，对伏流性暗河，其流量模型为：

$$Q_{oi} = Q_{I, i-t} \pm \sum_{p=1}^n q_{p, i-tp} \pm \sum_{f=1}^m q_{f, i-tf} + \Sigma Q_d \quad (1)$$

式中 Q_{oi} — i 时伏流暗河出口流量(m³/s 或 L/s); Q_I , $i-t$ —相应超前 $i-t$ 时杖流入口流量(m³/s 或 L/s); q_p , $i-tp$ —相应超前 $i-tp$ 时，暗河 p 支流汇入量(+)或分出量(-)(m³/s 或 L/s); q_f , $i-tf$ —相应超前 $i-tf$ 时， f 裂隙通道带江入量(+)或分出量(-)(m³/s 或 L/s); ΣQ_d —相应 Q_I , $i-t$ 水流自伏流入口流至暗河出口 Q_{oi} 这时间，中间增加的凝结水量(m³/s 或 L/s)。

(2) 岩溶暗河系统

岩溶暗河系统主要是汇聚从溶蚀洼地、溶蚀裂隙向地下渗流而形成，其水文表达式为：

$$Q_{oi} = \sum_{s=1}^n q_{s, i-ts} \pm \sum_{p=1}^n q_{p, i-tp} \pm \sum_{f=1}^m q_{f, i-tf} + Q_{oi} \Sigma Q_d \quad (2)$$

式中， q_s , $i-ts$ —相应超前 $i-ts$ 时，由 s 洼地落水洞直接汇入的流量(m³/s 或 L/s)。其他符号同式(1)。

在中国南方岩溶暗河系统曾已建了地下水库(卢耀如, 1973; 1986; Milanovic, 1981, 2000)。目前，岩溶水资源只开发了中国南方总岩溶水资源量的 8%~15%。因此，可以兴建更多地下水库。

1.2 中国北方

中国北方，主要包括北京、天津、河北、山东、河南、山西等地区。降雨量只有 400~600 mm/a，平均年气温 4~12℃。这地区主要发育了限制溶蚀岩溶类型和溶蚀-侵蚀岩溶类型。虽然这地区主要属于半干旱气候条件，但是有上百个以上大岩溶水系统发育(卢耀如等 1999; 卢耀如, 2003)，各个泉域年均流量在 1 m³/s 至 13 m³/s，流域面积在 500~4000 km² 以上。中国北方主要地区岩溶水资源情况，见表 3。

华北典型地区有 128 亿 m³/a 的丰富岩溶水资源量，约有 70%~80% 已经被开发利用。目前情况是，只有 29.71 亿 m³/a 岩溶水资源量。考虑到生态需求，最好考虑生态流量系数达 60% 左右，使约有 70 亿 m³/a 岩溶水流向下游。由于过量开采岩溶水资源，因此成为当地的生态水文特性恶化的最不利因素。

表 3 中国北方典型地区岩溶水资源量
Table 3 Karst water resources in typical regions of
in North China

岩溶水资源/×10 ⁸ m ³ ·a ⁻¹				
地区	自然	可开采	已开采	剩余量
山西高原	35.50	32.87	20.86	11.98
太行山以东	31.69	24.10	18.67	5.42
山东中南	35.74	28.29	20.53	7.67
燕山	11.75	3.46	1.69	1.77
山东南部	5.13	4.13	3.38	0.75
河南西部	4.32	3.99	1.87	2.12
合计	125.13	96.74	67.00	29.71

注:陈鸿汉提供有关资源数据。

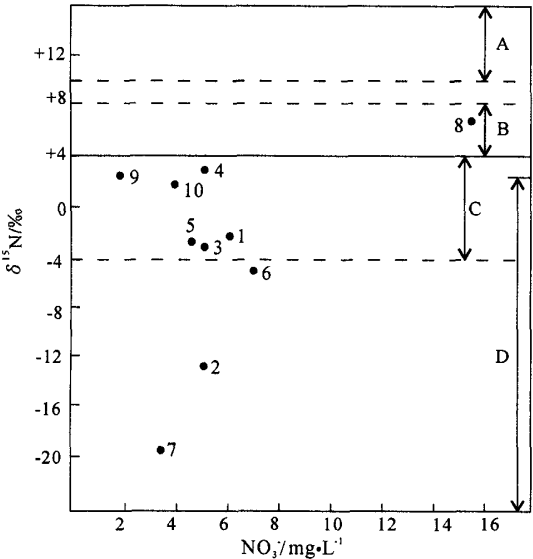


图 1 中国长江三峡地区 $\delta^{15}\text{N}$ 和 NO_3^- 关系图

Fig. 1 Relation of $\delta^{15}\text{N}$ and NO_3^- of surface and karst water in Three Gorges Region of Yangtze River in China

A—动物粪便影响带;B—土壤有机质影响带;C—工业废水与化肥影响带;D—降雨影响带

A—influenced zone by animal excrement; B—influenced zone by soil organics; C—influenced zone by fertilizer and industrial waste water; D—influenced zone by rainfall

2 中国典型地区基本地质—生态特性的要素分析

2.1 水环境与有关生态特性

许多学者研究了生态系统受水的控制,其主题涉及到河流、水库、湖泊在干旱—半干旱条件、热带

雨林、亚热带等不同气候条件下水文与水环境特性(Bayer, 1982; Golluscio et al., 1998; Fernandez et al., 2001; Porporato et al., 2002)。他们曾较多注意到 QWASIC,即定性定量研究水、空气、沉积的交替作用(Mackay et al., 1989; Ling et al., 1993)。

除了通常化学成份之外,持久有机物污染(POPS)是非常重要的成份需进行测定,通过氮同位素,可以了解不同环境状况下氮的成份与来源及其分带性,在长江三峡地区对污染源进行测定。计算公式(焦鹏程,1993;卢耀如等,1999)是:

$$\delta^{15}\text{N} = \frac{{}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}(\text{标准}) - {}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}(\text{标准})}{{}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}(\text{标准})} \times 1000\text{‰} \quad (3)$$

其次,土壤成份也同样需要研究。Jenny 于 1941 年曾指出土壤性质受到气候(*i*)、生物有机质(*o*)、地形(*r*)、母质(*p*)和时间(*t*)的影响。笔者认为也应考虑地质作用(*g*)(卢耀如, 2003),这方面包括水—土作用和受人类行动(*M*)的影响问题,因此有关土层坝质影响因素的概念化公式可表示为:

$$S = f(p, g, cl, r, O, M) \quad (4)$$

2.2 水—土(或岩石)作用

水—土间的作用,涉及到地下水动态、养分运移、土壤结构等,都综合影响生态水文特性的,有关植物影响,水—土作用的相关性与反应,见图 2(Lu, 2005)。

2.3 母质与土壤间关系

不同母岩(质)可以形成不同性质成分的土壤。虽然,它们的性质也是不一样的,土壤的不同成份在花岗岩和碳酸盐岩地区可对比于表 4。

元素的迁移(或富集)系数 A_{r-s} 表示于下表(卢耀如, 2003):

$$A_{r-s} = \frac{E_s - E_r}{E_r} \times 100\% \quad (5)$$

E_s —土壤中元素含量(mg/g);

E_r —岩石中元素含量(mg/g);

A_{r-s} —(+)值,表示该元素的富集;(-)值,表示该元素的迁移。

非常清楚由其母岩所生成的土壤成分是不同的。受地质环境影响, A_{r-s} 系数可达到母岩成份的正负数百倍值。

2.4 母岩与土壤间的结构

在母岩与土壤间的不同的结构,可影响到水文地质条件和生态—水文特性。其三种母岩—土壤结

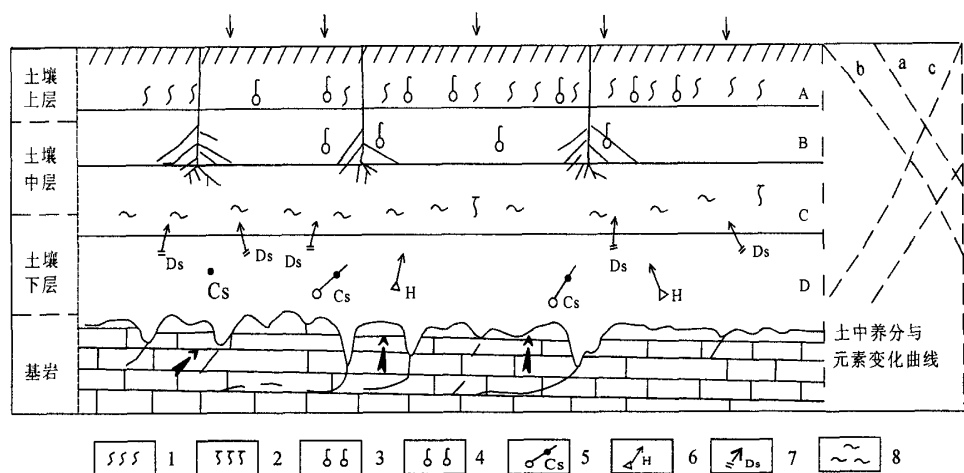


图 2 土壤中养分的分布、扩散与植物根系吸收作用理想状况机理分析

Fig. 2 Analysis of water-soil geo-ecological features related to soil nutrients, diffusion and absorption of plant

1—第一淋滤作用;2—第二淋滤作用;3—第一蒸发作用;4—第二蒸发作用;5—土壤中浓度扩散作用(可逆);6—土壤中热力扩散作用(可逆);7—动力扩散作用;8—植物根系吸收作用;A—上部渗透淋滤带;B—淋滤—蒸发带(地下水位变动带);C—土壤养分富集带;D—基岩—土层活路作用带(元素变化曲线有三种:a—Ti, Ni, Zn, Ca, Pb, Hg, As, Bi; b—Co, Mn; c—Cr)

1—first eluviation; 2—second eluviation; 3—first evaporation; 4—second evaporation; 5—consistency diffusion in soil; 6—heat diffusion in soil; 7—dynamic diffusion; 8—absorption of roots of plants; A—upper percolation-eluviation zone; B—eluviation-evaporation zone(fluctuation zone of ground water level); C—accumulation zone of soil nutrients; D—activity zone of bedrock-soil (curves related to some element changes:a—Ti, Ni, Zn, Ca, Pb, Hg, As; b—Cu, Mn; c—Cr)

表 4 花岗岩与碳酸盐岩母岩与风化土层成分对照

Table 4 Comparison of main components of soil related to different parent rocks

项 目	各成分含量/%									地 点
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	
花岗岩(母岩)	78.91	4.45	2.14	6.62	0.34	0.40	0.16			广州
土层	62.62	14.20	3.90	0.08	0.14	0.49	0.46			
迁移或富集系数 A _{r-s} /%	-20.64	+219	+82.2	-98.79	-58.82	+22.5	+187.5			
石灰岩(母岩)	0.83	0.14	0.55	54.30	1.52	0.03		0.06	0.01	贵州茂兰
土层	45.45	8.34	26.59	1.58	1.95	0.55		1.42	0.06	
迁移或富集系数 A _{r-s} /%	+5375	+5857	+4834	-97.09	28.28	+1733.3		+23.66	+500	
白云岩(母岩)	0.79	0.58	0.65	31.64	19.60	0.06		0.04	0.01	贵州茂兰
土层	48.47	8.30	19.97	0.76	2.45	0.34		1.54	0.14	
迁移或富集系数 A _{r-s} /%	+6035	+1331	+2972	-97.59	-87.5	+466.6		+3750	+1300	
石灰岩(母岩)	4.52	1.60	0.54	49.66	1.42	0.58	0.04	0.30		川南毗邻云南曲靖地带
土层	50.24	19.30	8.50	0.90	1.56	3.34	0.06	1.48		
迁移或富集系数 A _{r-s} /%	+1011.5	+1106	+1474	-98.18	+9.85	+475	+50	+393.3		

构类型,表示于图3。

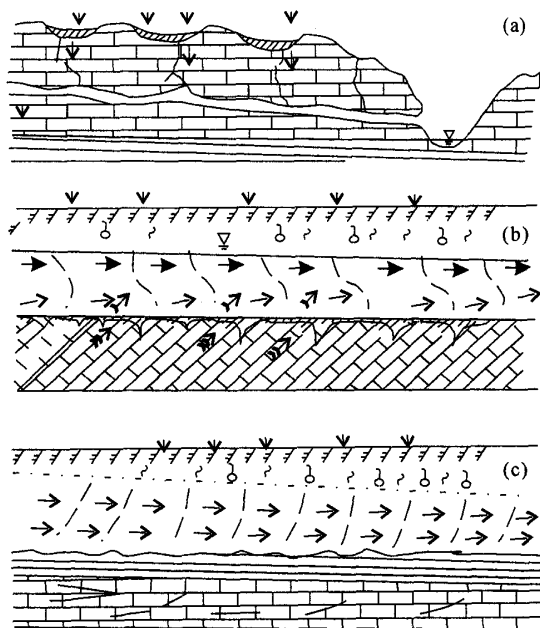


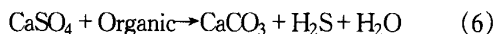
图3 三种母岩—土壤间的结构

Fig. 3 Three main structures between parent rock and soil
(a)—岩土构成二元相隔的水文地质单元;(b)—岩土构成两种介质具同一水动力图;(c)—母岩与土壤构成具海洋污染力联系的两个不同水文地质单元

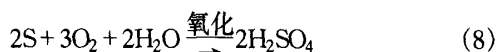
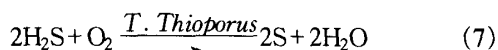
(a)—rock-soil making the separated two hydro-geological units;
(b)—rock-soil making the two material units with the same hydro-dynamics;(c)—parent rock-soil making two different hydro-geological units with hydraulic connection in between

2.5 生物—地球化学作用

许多学者已研究了矿物沉积中的微生物作用(阎宝瑞等,2000)。岩溶发育中生物作用也是重要的有兴趣的主题(Waltham,1982)。石膏和硬石膏在厌氧环境(卢耀如等,2002;Zhang et al.,2005)作用下,会产生 H_2S :

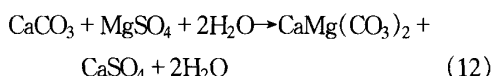
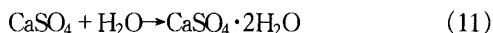
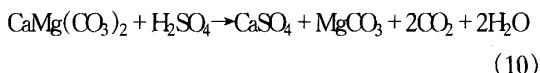
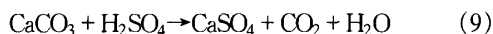


当水中含有溶解氧渗入地下,由于(*T. thioporus*)作用可能导致化学作用和氧化作用,Ph值会下降为5~4.5,促使 $CaSO_4$ 的溶解:



新产生的 H_2SO_4 会加强溶蚀碳酸盐岩,同时石

膏会产生沉积,其反映式为:



因此,对碳酸盐岩—硫酸盐岩复合岩溶作用而言,微生物作用是非常重要的,而且生物化学作用也是控制生态水文地质的重要因素。石膏中细菌的能谱曲线见图4。

石膏及石灰岩中微生物化石电子显微镜图谱片见图5。

2.6 土壤与钙华中孢粉对比

气候变化广泛影响到生态水文条件,这种变化的信息可以包含在土壤和钙华中,予以研究。为了研究石林地区环境演化,对土壤和钙华中的孢粉曾进行了对比。5个钙华沉积样品都含有孢粉,总数达694粒,最多数量有341粒,最少也有20粒。总之,孢粉和其建造的植物在土壤及钙华沉积中都非常相似。主要木本植物在土壤中占64.4%,钙沉积中占60.4%。自始新世(Eocene)以来,形成森林—灌木环境。但是在钙沉积物中,*hygrophilous*植物,例如 *Palmae*、*Mamgnolia* 是没有的,而 *Myrica*, *Helicia*, *Toxicodendron*, *Engelhardtia*, *Theaceae*, *Mytilaria*, *Randia*, *Santalum*, *Mallotus*, *Cinnamomum* 等很少,而且水生草木植物也很少。但土壤中孢粉是非常丰富而复杂,共含有不同生态类型的植物。具有大量钙沉积的环境时期,可以反映出古气候是较为干旱,较少钙沉积时期反映古环境是较温湿时期。在钙沉积中,孢粉富集比土壤中高出1/7,而且蕨类孢粉,例如 *Cyathea*, *Pteris*, *Onychium*, *Hicropteris* 和 *Dennstaedtia* 是很丰富的(黄威廉等,1988)。在一些时期中出现不同的孢粉组合,可反映不同地带演化。土壤和钙中孢粉对比见图6。

3 岩溶地区地质环境特性质量的评判

生态水文与生态水文地质主要包含水量、水质与动力条件,水—土—气定性交换,以及生物—化学—物理—地质综合作用机理。因此,岩溶水资源过

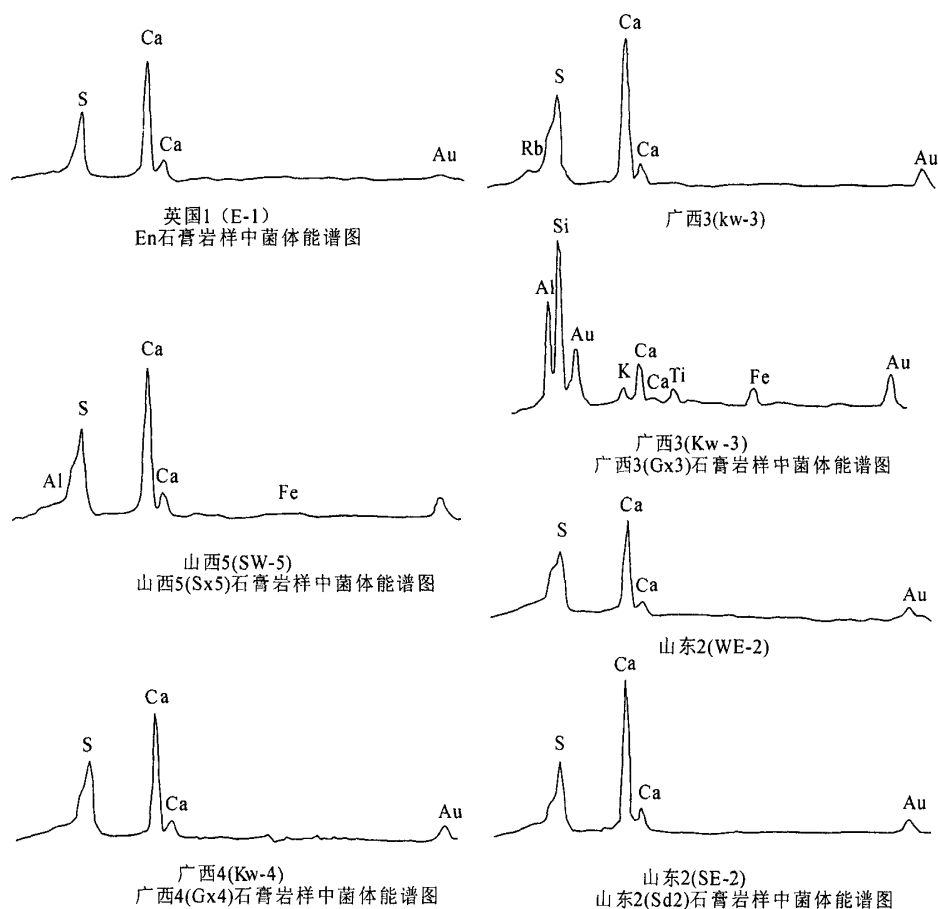


图4 石膏中细菌能谱曲线图

Fig. 4 The spectrum curves of bacteria cultivated in gypsum

量开采使地下水位下降,会直接影响到地质环境特性的质量。

地质—环境特性质量可由下列几方面予以评判,即:①植被复盖率;②土壤侵蚀率;③抵抗—降低自然灾害能力;④石漠化系数(卢耀如, 1993);⑤水—土污染率。对于抵抗和减少自然灾害能力,应根据自然灾害链的机理,特别应注意到灾害链方面,这种灾害链反映在气候地质与生物等灾害的关系方面。

下面着重讨论两方面问题。

3.1 水环境与污染

在中国岩溶地区存在着不同水体构成不同的水环境。为研究云南石林地区水环境,有关降水、河流、湖泊、岩溶洞穴和自来水等,曾进行了分析与对比。取干旱季节的水化学成分与国家Ⅰ标准类水质

标准进行对比,表明单因素的污染指数达1~20,超标成分主要是 BOD_5 , NO_2 , NH_3 , Cd等,主要是耕地地带。在雨季,对比结果表示超标元素主要是Cl, NH_3 , NO_2 和Fe等。

石林地区水环境质量由综合污染指数在雨季及旱季的数值见图7。将石林水环境与国家Ⅰ、Ⅱ标准类水质相比较,情况是复杂的。但多数的水质量达到国家Ⅱ类水标准。目前,水环境质量比较好。

3.2 土壤特性与人工效应

人工活动常常污染土壤。例如,在石林地区土壤质量曾受到人工效应的影响,特别是野外土地由于化肥使用在许多地方已经受到污染,根据地形、地貌与土壤分布情况,土壤在石林地区可分三种类型,即:①山地小面积分布的土地上土壤或在森林边缘的土壤;②岩溶洼地或山前地带薄脊的土壤;

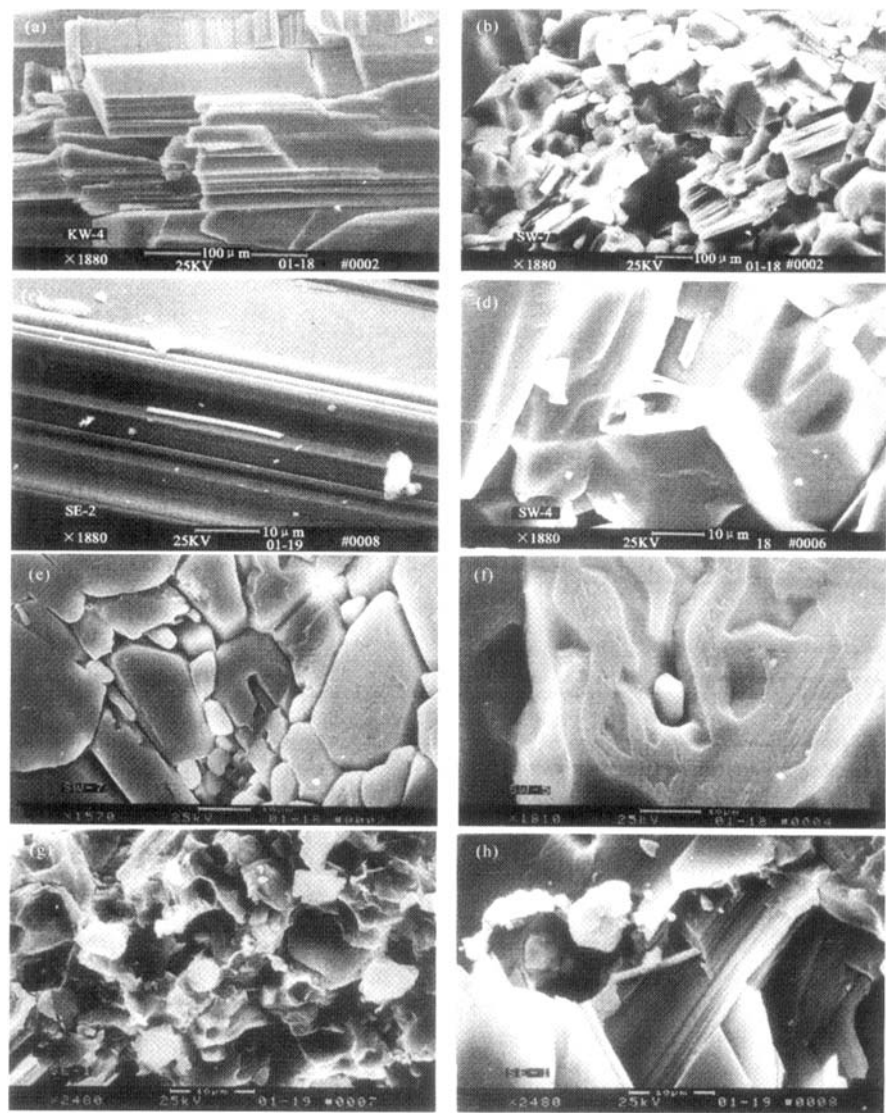


图 5 石膏及石灰岩中微生物化石电子显微镜图片(照片由阎宝瑞协助鉴定拍摄)

Fig. 5 Microbial fossil cultivated in gypsum by electron microscope

(a)—石膏节理,KW-4, SEM×300; (b)—石膏细粒结构,有细菌钻孔,SW-7, SEM×1130; (c)—石膏节理,见有纤维状微生物,SE-2, SEM×1880; (d)—石膏层的特殊结构,内有破碎的管形菌,SW-4, SEM×1550; (e)—石膏溶蚀现象,保存有杆状微生物及超显微溶坑痕迹,SW-7, SEM×1570; (f)—石膏层中特殊结构,有微生物遗迹,SW-5,SEM×1810; (g)—石灰岩中球状微生物,SE-1, SEM×2400; (h)—石膏裂隙中纤状菌,SE-1, SEM×2380

(a)—fissures in gypsum, KW-4, SEM×300; (b)—drilling hole of bacteria in gypsum, SW-7, SEM×1130; (c)—fibre-shaped bacteria in gypsum, SE-2,SEM×1880; (d)—specture textures of gypsum with tube shaped bacteria, SW-4, SEM×1550; (e)—corroded phenomena on gypsum with shaft of bacteria, SW-7, SEM×1570; (f)—remains of microbial things in gypsum, SW-5,SEM×1810; (g)—global-shaped-microbe in lime-stone, SE-1, SEM×2400; (h)—shaft of bacteria in gypsum, SE-1, SEM×2380

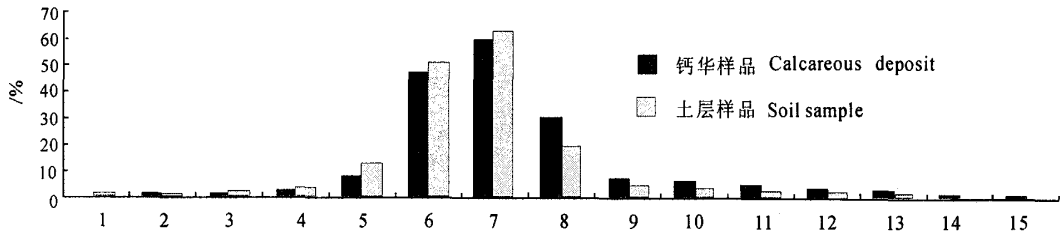


图 6 土壤和钙沉积中孢粉对比图

Fig. 6 Comparison of spore pollens between the soil and calcareous deposits in Shilin

- 1—杉科; 2—棕榈科; 3—栗; 4—水生草本花粉; 5—草本草本花粉; 6—松; 7—乔木花粉; 8—蕨类孢子; 9—凤尾蕨;
10—铁线蕨; 11—木; 12—常绿栎; 13—灌木花粉; 14—卫矛; 15—杜鹃科
1—Taxodiaceae; 2—Palmae; 3—Castanopsis; 4—Aquiherbosa; 5—Xeromorph herb; 6—Pinus; 7—Arbor; 8—Brake; 9—Pteris;
10—Adiantum; 11—Alnus; 12—Green Quarcus; 13—Arbustum; 14—Euonymus; 15—Eriaceae

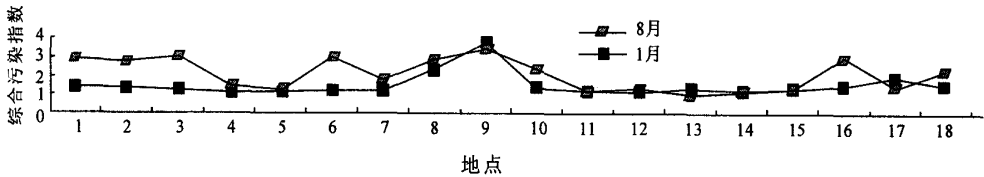


图 7 石林地区水环境综合污染指数

Fig. 7 Water environmental quality of comprehensive pollution indexes in the Shilin region(According to the National Standard of Water Class I)

- 1—大跳水; 2—大跳水; 3—大跳水; 4—白云洞出口处; 5—白云洞; 6—板桥村; 7—天生桥; 8—大山沟稻田; 9—北吉村稻田; 10—石林湖; 11—团结水库; 12—石林自来水; 13—长湖水; 14—绿芳塘水; 15—剑峰湖水; 16—路南河水; 17—石林雨水; 18—雨中堂菜地
1—Dadieshui (Upper); 2—Dadieshui (Middle); 3—Dadieshui (Lower); 4—Baiyun Dong Cave exit; 5—Baiyun Dong cave; 6. Banqiao town; 7—Tianshengqiao Bridge; 8—Dashangou rice field; 9—Beijicun rice field; 10—Shilin Lake; 11—Tuanjie Reservoir; 12—Shilin Tap; 13—Changhu Lake; 14—Lufangtang Pond; 15—Jianfengchi; 16—Lunan Country River; 17—Raining water in Shilin; 18—Yuzhongtang vegetable plot

③全年受到人工效应的主要农田的土壤。对这三组土壤取样分析,其 NH_4 、COD 和全 K、P 及 Ca,其结果和没有受污染的阿玉林森林地区作为标准进行比较,以评价其质量。图 8 可反映出主要化学成分 NH_4 和 K 含量都较多,但是 NH_4 和 P 含量较低。石林地区耕种影响单元素的分析情况见图 9。耕种综合影响土壤的情况见图 10。

图 8 说明由于使用农肥(N)使土壤中 NH_4 、 HNO_3 、K 和 Ca 影响到了单元素的指标。

由于耕耘石林地区的土壤,阿玉林地区没有受人工影响为 I 类地带,其综合影响指数是 $P_a = 1$ 。而在薄岩溶山区绿芳塘菜地, P_a 值是 1~5。主要耕地的稻田,具平坦地形,土壤质量全年明显受人工影响,通常 P_a 值在 5 以上。

3.3 石漠化

石漠现象主要是由于人类不合理开发。例如过

量开采岩溶地下水资源、滥伐森林和破坏草地所导致,扩大土壤侵蚀等作用。因此,这就意味着岩溶地区碳酸盐岩裸露没有或极少土层覆盖的岩石嶙峋和生态条件恶化的现象。

石漠化系数值是:

$$R_f = \frac{\sum_{i=1}^n F_{ei}}{\sum_{i=1}^n P_{ei}} \quad (13)$$

$$P_{ei} = \frac{C_m}{m} \sum_{j=1}^m K_j R_j \rho R \quad (14)$$

式中: R_f —石漠化系数;

F_{ei} —i 带年均土壤侵蚀速率(水土流失率), $t/km^2 \cdot a$; P_{ei} —i 带年均岩溶产土率, $t/km^2 \cdot a$; R_j —j 段碳酸盐岩溶蚀残余物, %; K_j —j 段碳酸盐岩溶蚀速率, mm/a ; ρ_{kj} —j 段溶蚀残余物的密度, t/m^3 ; C_m —换算系数,取 1000; m —计算的段数。

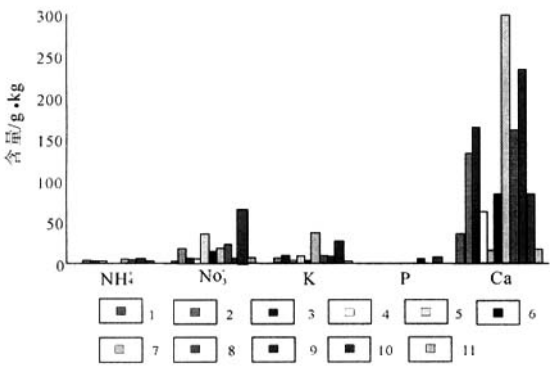


图 8 石林地区土壤中主要化学成分
Fig. 8 Main chemical compositions in the soil in the Shilin region

1—阿玉林;2—和莫站;;3—大跳水上面;4—乃古石林西;5—大石林垃圾堆底;6—绿芳塘玉米地;7—北吉村稻田;8—雨宗堂菜地;9—大山沟稻田;10—绿芳塘垃圾堆底;11—对比样
1—Ayulin; 2—Hemozhan; 3—Dadieshui (upper); 4—West Naigu Shilin; 5—Bottom of rubbish heap of Da Shilin; 6—Lufangtang corn field; 7—Beijicun rice field; 8—Yuzhongtang vegetable plot; 9—Dashangou rice field; 10—Bottom of Lufangtang rubbish heap; 11—comparative sample (from the upper to the lower)

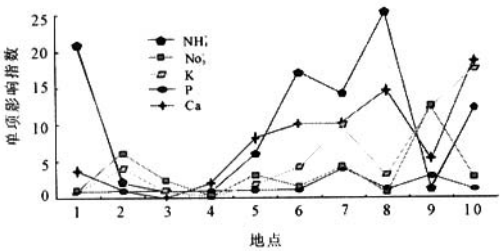


图 9 石林地区耕种影响单元素分析
Fig. 9 Analysis of the single element to determine the farming influence on soil in the Shilin Region

1—乃古石林西;2—大石林垃圾堆底;3—绿芳塘玉米地;4—阿玉林;5—和莫站;6—大跳水上面;7—雨宗堂菜地;8—大山沟稻田;9—绿芳塘垃圾堆底;10—北吉村稻田
1—West Naigu Shilin; 2—Bottom of rubbish heap of Da Shilin; 3—Lufangtang corn field; 4—Ayulin; 5—Hemozhan; 6—Dadieshui (Upper); 7—Yuzhongtang vegetable plot; 8—Dashangou rice field; 9—Bottom of Lufangtang rubbish heap; 10—Beijicun rice field

中国一些地区石漠化系数是 6.94~156.95,在通常其抗侵蚀能力是有几十年至几百年。

岩溶地区整个地质—生态特性的质量是:

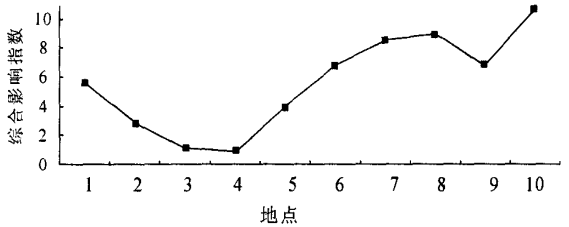


图 10 石林地区耕种综合影响土壤指数图
Fig. 10 Soil comprehensively influenced by farming activities in Shilin

1—乃古石林西;2—大石林垃圾堆底;3—绿芳塘玉米地;4—阿玉林;5—和莫站;6—大跳水上面;7—雨宗堂菜地;8—大山沟稻田;9—绿芳塘垃圾堆底;10—北吉村稻田
1—West Naigu Shilin; 2—Bottom of rubbish heap of Da Shilin; 3—Lufangtang corn field; 4—Ayulin; 5—Hemozhan; 6—Dadieshui (Upper); 7—Yuzhongtang vegetable plot; 8—Dashangou rice field; 9—Bottom of Lufangtang rubbish heap; 10—Beijicun rice field

$$E_{GC} = \sum_{i=1}^n A_{ui} \quad (15)$$

E_{GC} —coefficient of comprehensive evaluation related to geo-ecology; A_{ui} — i 因子评判值;中国岩溶地区地质—生态特性评判可分 4 级: E_{GC} —90~100 (优秀级); E_{GC} —70~89 (良好级); E_{GC} —50~69 (一般级); E_{GC} —<50 (不良级)。

4 结论

①在中国南方和北京岩溶水资源丰富,但是在南方开采率只有总岩溶水资源量的 8%~15%,而在北方已达 70%~80%;②在南方有两种性质岩溶地下伏流和暗河系统,在不同地区可以更多建设地下水库,而北方大岩溶系统应当控制其开发;③岩溶水数量和质量密切地反映在生态水文特性上,而岩溶水动力条件、水—土作用以及生物—化学等作用,共同构成生态水文地质条件;④岩溶地质生态环境质量是从综合方面予以评判;⑤水和土的污染是值得重视的问题,中国南方岩溶化山区石漠化问题也是非常重要的。这两大问题都密切影响到岩溶地质环境质量。

致谢 在此对阎宝瑞、杨丽娟、齐继祥、郭秀红等在野外调查与室内外试验方面合作,及光耀华、察汝宏、陈鸿汉、葛文彬、耿弘、李兴中、杨顺泉、朱永琴、程伯禹、张凤岐、贺可强、姚春梅等在研究水资源方面的合作与帮助,表示衷心的感谢!

参考文献

- 焦鹏程. 1993. 水文地质研究中氮同位素方法应用原理. 地质矿产部水文地质工程地质研究所, 中国地质学会水文地质专业委员会编: 中国同位素水文地质之进展(1988-1993). 天津: 天津大学出版社, 25~29.
- 黄威廉, 屠玉麟, 扬龙. 1988. 贵州植被. 贵阳: 贵州人民出版社.
- 卢耀如, 杰显义, 张上林. 1973. 中国岩溶(喀斯特)发育规律及其若干水文地质工程地质条件. 地质学报, (1): 121~136.
- 卢耀如. 1986. 中国岩溶—景观·类型·规律. 北京: 地质出版社, 1~288.
- 卢耀如. 1993. 喀斯特为主地质—生态环境质量及其评判——中国南方几省(区)为例. 宋林华, 丁怀远主编: 喀斯特景观与洞穴旅游. 北京: 中国环境科学出版社, 54~64.
- 卢耀如. 2003. 地质—生态环境与可持续发展——中国西南及邻近岩溶地区发展途径. 南京: 河海大学出版社.
- 卢耀如等. 1999. 岩溶水文地质环境演化与工程效应研究. 北京: 科学出版社, 1~305.
- 卢耀如, 张凤娥, 阎葆瑞, 郭秀红. 2002. 硫酸盐岩岩溶发育机理与有关地质环境效应. 地球学报, 23(1): 1~6.
- 卢耀如. 2003. 地质—生态环境与可持续发展——中国西南及邻近岩溶地区发展途径. 南京: 河海大学出版社, 1~304.
- 阎宝瑞, 张锡根. 2000. 微生物成矿学. 北京: 科学出版社.

References

- Atkinson T C, Smart P L. 1977. Caves and Karst of southern England and South Wales. Published by the 7th I. S. C. Committee.
- Atkinson T C, Smart P C. 1981. Artificial tracers in hydrogeology. A Survey of British Hydrology, 173~190.
- Bayer J. 1982. Plant productivity and environment. Science, 218: 443~448.
- Beck B F (ed.). 1993. Applied karst geology. Proceeding of the Fourth Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environment Impacts of Karst. P. E. LaMoreaux & Associates, Inc.
- Chen Jing'an, David Dian Zhang, Wang Shijie, Xiao Tangfu. 2004. Water Self-Softening Processes at Waterfall Sites. Acta Geologica Sinica (English edition), 78(5): 1154~1161.
- Culshaw M G, Waltham A C. 1987. Natural and artificial cavities as ground engineering hazards. Quarterly Journal of Engineering Geology, 20: 139~150.
- Fernandez I C, Porporato A, Laio F, et al. 2001. The role of soil texture in water limited ecosystems. Water Resources Research, 37(12): 2863~2872.
- Ford D, Williams P. 1989. Karst geomorphology and hydrology. London: Unwin Hyman.
- Golluscio R A, Sala O E, Lauenroth W K. 1998. Differential use of large summer rainfall events by shrubs and grasses: a manipulative experiment in proc of the patagonian stoppe. Oecologia, 115(1-2): 17~28.
- Jackson D D. 1982. Underground worlds. Time-Life Books, Alexandria, Virginia.
- Ling H, Diamond M, Mackay D. 1993. Application of the QWASI fugacity equivalence model to assessing sources and fate of contaminant in Hamilton Harbor. Journal of Great Lakes Research, 19: 582~602.
- Lu Yaoru, Jie xianyi, Zhang Shanglin. 1973. The development of karst in China and some of its hydrogeological and engineering geological conditions, Acta Geologica Sinica, (1): 121~136 (in Chinese with single English publication).
- Lu Yaoru. 1988a. Hydrogeological environment and water resources patterns in China. Proceedings of the IAH 21th Congress Karst Hydrogeology and Karst Environment Protection, Part II, Beijing: Geological Publishing House, 64~75.
- Lu Yaoru. 1988b. Process of karst caverns' development and three phrases flow. In: Proceedings of the 9th International Congress of Speleology, Barcelona, Spain.
- Lu Yaoru, Zhang Feng'e, Yan Baorui, Guo Xiuhong. 2002. Mechanism of karst development in sulphate rocks and its main geo-environmental impacts, Acta Geoscientia Sinica, 23(1): 1~6 (in Chinese).
- Lu Yaoru. 2003. Geo-ecology and sustainable development—Developing ways for karst regions in Southwest and adjacent karst regions of China, Nanjing: Hehai University Press, 1~304 (in Chinese).
- Lu Yaoru. 2005. Karst Water Resources and Geo-ecology in Typical Regions of China. In: Zoran Stevanović & Petar Milanović (eds.), Proceedings of the international conference and field seminars. Water Resources and Environmental Problems in Karst. Serbia & Montenegro, 19~26.
- Mackay D, Diamond M. 1989. Application of the QWASI (Quantitative water air sediment interaction) fugacity model to dynamics of organic and inorganic chemicals in lakes. Chemosphere, 18: 1343~1365.
- Milanovic P. 1981. Karst Hydrogeology. Water Resources Publication Littleton, Colorado, USA.
- Milanovic P. 2000. Geological engineering in karst. monograph, Zebra Publication Ltd. Belgrade, 207~225.
- Porporato A, Dodorico P I, Laio F, Rodriguez I I. 2002. Ecohydrology of water controlled ecosystems. Water Resources, 25: 1335~1348.
- Stanka S, Tadej S, Liu Hong, Petr P. 2004. Speleogenesis of selected caves beneath the Lunan Shilin and caves of Fenglin Karst in Qibei, Yunnan. Acta Geologica Sinica (English edition), 78(6): 1289~1298.
- Waltham J A. 1982. A biogenic methane in midocean ridge hydrothermal fluids. In: William W J (ed.), Deep Source Gas Workshop Technical Proceedings: Morgantown Energy Center, 122~129.
- Waltham A C, Smart P L, Friederich H, Atkinson T C. 1985. Exploration of caves for rural water supplies in the Gunung Sewu Karst, Java. Annales de la Societe Geologique de Belgique, 108: 27~31.
- White W B. 1988. Geomorphology and hydrology of karst terrains, New York: Oxford University Press.
- Zhang Feng'e, Lu Yaoru, Qi Jixiang, Zhang Sheng, Tang Hongcai, Zhang Yun. 2005. The role of bacteria in the development of sulfate karst. In: Zoran Stevanović & Petar Milanović (eds.), Proceedings of the international conference and field seminars. Water Resources and Environmental Problems in Karst. Serbia & Montenegro, 485~492.
- Zhang Shouyue, Barbary J P. 1988. Guizhou '86 Pnemiére Expédition Spéléologique Franco-Chinoise. PSCJA, Lyon et Institute de Géologie de Academia Sinica. Spelunca-Mémoires, (16).