

doi:10.3799/dqkx.2010.084

贵州碳酸盐岩岩性基底对土地石漠化时空演变控制

白晓永^{1,2}, 王世杰^{1,2*}, 陈起伟³, 程安云^{1,2}

1. 中国科学院地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵州贵阳 550002

2. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 贵州普定 562100

3. 贵州师范大学中国南方喀斯特研究院, 贵州贵阳 550001

摘要: 为了解碳酸盐岩岩性基底对土地石漠化时空演变的作用, 利用 RS、GIS 和 GPS 技术构建了贵州 20 世纪 80 年代、90 年代和 21 世纪初 3 期 1:10 万的土地石漠化历史空间分布图, 结合碳酸盐岩岩石组合类型分布数据, 利用数学建模的方法进行空间分析。结果发现: (1) 石漠化的演变方式与碳酸盐岩的类型有关, 而与其纯度关系不大; (2) 石漠化演变规模、演变速率和演变频率与碳酸盐岩岩性纯度呈正相关; (3) 在石灰岩组合类型区, 无石漠化土地易演变到中度石漠化土地; 而在白云岩组合类型区, 无石漠化土地易演变到轻度石漠化土地; (4) 无论碳酸盐岩纯度和组成如何, 在石漠化演变的长期过程中, 强度以上石漠化波动较小, 轻度、中度石漠化波动较大。因此, 碳酸盐岩岩性基底对土地石漠化的时空演变过程有明显的控制作用。

关键词: 碳酸盐岩; 岩性; 土地石漠化; 时空演变; 空间分析。

中图分类号: P512.1; P931.3

文章编号: 1000-2383(2010)04-0691-06

收稿日期: 2009-07-12

Constrains of Lithological Background of Carbonate Rock on Spatio-temporal Evolution of Karst Rocky Desertification Land

BAI Xiao-yong^{1,2}, WANG Shi-jie^{1,2*}, CHEN Qi-wei³, CHENG An-yun^{1,2}

1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China

2. Puding Monitoring and Research Station for Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Puding 562100, China

3. Institute of South China Karst, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

Abstract: In order to study the effect of lithological background of carbonate rock on spatio-temporal evolution of karst rocky desertification (RD) land, 1:100 000 scale digital RD distribution maps of Guizhou in 1986, 1995 and 2000 were obtained by RS, GIS and GPS (3S) technology and user-computer interactive interpreting method from Landsat remote sensing images. On the basis of spatial analysis and statistics, in association with digital-distribution map of carbonate rock assemblages' type, the following findings were obtained: (1) The evolution mode of RD land is related to carbonate rock types and is obviously uncorrelated with its purity. (2) Significant positive correlation was observed between evolution scale, evolution speed, evolution frequency and carbonate rock purity. (3) No RD land evolves easily to moderate RD in limestone rock combination type area, yet it evolves easily to light RD in dolomite combination type area. (4) Whatever the purity and component of the carbonate rocks are, the variation of the strong RD and extremely strong RD is not significant in the long-term evolution process, whereas the variation of the light RD and moderate RD is remarkable. In conclusion, the evolution process of RD land is constrained obviously by lithological background of carbonate rock.

Key words: carbonate minerals; lithology; karst rocky desertification; spatial-temporal evolution; spatial analysis.

岩溶地区的成土速率与碳酸盐岩建造中的酸不溶物含量密切相关(袁道先和蔡桂鸿, 1988; Wang

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(No. 2006CB403200); 中科院知识创新重要方向项目(No. kzcx2-yw-306); 国家科技支撑计划重大课题(Nos. 2006BAC01A09, 2008BAD98B07)

作者简介: 白晓永(1978-), 男, 博士生, 主要从事岩溶环境生态演变的研究。* 通讯作者: 王世杰, E-mail: wangshijie@vip.skleg.cn

et al., 1999, 2002, 2004; Ji et al., 2000; 曹建华等, 2003, 2004), 岩溶地区水的赋存规律也明显受碳酸盐岩的岩性影响(Yuan, 1999; 曹建华和袁道先, 2005), 岩性对水、土资源的配置起着举足轻重的作用(袁道先和蔡桂鸿, 1988)。水、土是生物生存和进化的基础。因此, 岩性基底是影响岩溶地区生态环境好坏的一个重要条件。

石漠化是发生在碳酸盐岩环境地质背景下, 以土壤减少、植被退化、生物量降低和土地生产力下降为标志, 地表出现基岩大面积裸露的土地退化过程(熊康宁等, 2002; Wang et al., 2002; Li et al., 2008), 是中国西南最严重的生态地质环境问题(Cai, 1997; 李恩香等, 2004; Wang et al., 2004), 危及到 2.22 亿人口的生产生活。显然, 若仅注重地表形态变化或过分强调人类活动的干扰作用, 而忽视控制水、土空间配置的关键因素——岩性基底(崔之久等, 2001), 则难以正确评价制约石漠化形成演变的基底以及瓶颈效应引起的生态环境变迁, 况且即使在相同人类活动的干扰下, 因碳酸盐岩岩性基底的不同, 土地石漠化的演变也会表现出较大的差异。因此, 碳酸盐岩岩性基底对石漠化的形成演变至关重要。本文将从石漠化时空演变方式、演变规模、演变方向、演变速率、演变频率与岩性基底之间的关系等几个方面来展开探讨。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

碳酸盐岩岩石组合类型分布数据利用本课题组工作成果(李瑞玲等, 2003; Wang et al., 2004), 岩石类型的特征编码为: 连续性石灰岩组合(HL)、连续性白云岩组合(HD)、石灰岩、白云岩混合组合(HLD)、石灰岩夹碎屑岩组合(LI)、白云岩夹碎屑岩组合(DI)、石灰岩与碎屑岩互层(LA)、白云岩与碎屑岩互层(DA)、非碳酸盐岩类(CR)。石漠化数据的获得方法与处理, 为笔者前期工作(白晓永等, 2009)。

1.2 研究方法

在 GIS 平台上对岩性图、不同时段石漠化图进行空间运算, 可以分别算出“单变方式”、“层变方式”和“返变方式”等石漠化演变类型在各岩性中的分布面积, 将面积汇总, 再分别求商运算, 进而可以得到图 1。

在岩性图基础上, 利用图 1986 年和 1995 年的石漠化分布图叠加运算, 可先算出 1986—1995 年各岩性中不同石漠化类型的转移矩阵; 同理, 再算出

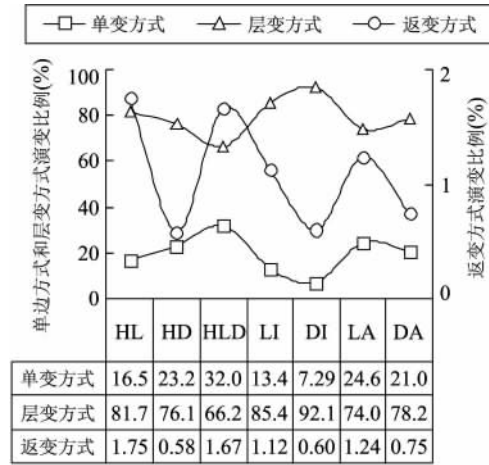


图 1 岩性基底与石漠化演变方式的关系(1986—2000)
Fig. 1 Relation between lithological background and RD (1986—2000)

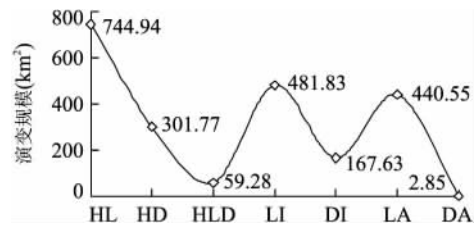


图 2 各岩性中已石漠化土地的演变规模(1986—2000)
Fig. 2 Evolution scale of already RD in various lithological backgrounds (1986—2000)

已石漠化土地 = 轻度以上石漠化土地下同

1995—2000 年各岩性中石漠化的转移矩阵, 将两者相加即可得到 1986—2000 年各岩性中不同石漠化类型的转移矩阵。由此, 可以得到 1986—2000 年贵州各岩性中演变到“已石漠化土地的演变规模”, 即图 2。

根据 1986—2000 年各岩性中不同石漠化类型的空间转移矩阵, 将各岩性中不同石漠化类型转移变化值汇总, 即可得到监测时段内某种石漠化类型的变化面积, 进而分别得到轻度以上石漠化演变速率图, 即图 3。

将岩性图和 1986 年的石漠化图进行空间叠加, 可以提取出 1986 年各岩性中不同石漠化类型的面积 S_0 , 然后利用石漠化类型的变化面积除以监测初期原地类面积(本底值), 再除以监测时段, 即为石漠化的演变频率, 即图 4。

2 结果与分析

2.1 岩性基底对土地石漠化演变方式的影响

由图 1 可知, 层变方式的演变比例都在 66.28%

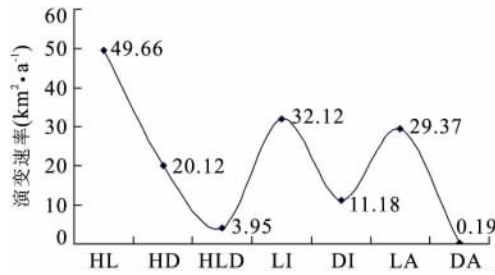


图3 各岩性中的已石漠化土地演变速率(1986—2000)

Fig. 3 Evolution speed of already RD in various lithological backgrounds (1986—2000)

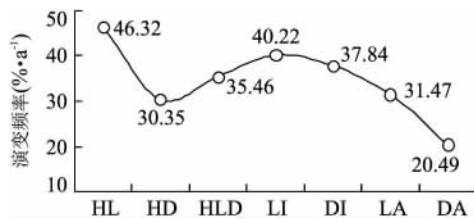


图4 各岩性中的已石漠化土地演变频率(1986—2000)

Fig. 4 Evolution frequency of already RD in various lithological backgrounds (1986—2000)

以上,单变方式的演变比例介于 7.29%~32.05% 之间,而返变方式的演变比例都在 1.75% 以下,说明各岩性中石漠化的演变类型呈现出“以层变方式为主,单变方式为辅”的特点。

在石灰岩区的 HL、LI 和 LA 中,单变方式的演变比例分别是 16.55%、13.45% 和 24.68%,因此可以得出石灰岩区的平均演变比例是 18.22%。同样求出,石灰岩区层变方式的平均演变比例为 80.41%;白云岩区单变方式的平均演变比例是 17.19%,而层变方式的平均演变比例为 82.17%。由此不难看出,石灰岩区的单变方式明显高于白云岩区,而层变方式正好与此相反。

2.2 岩性基底对土地石漠化演变规模与方向的影响

2.2.1 已石漠化土地的总演变

由图 2 可以看出,在石漠化的演变中,演变规模最大的是 HL,达到 744.94 km²,最小的是 DA,仅为 2.85 km²,前者是后者的近 261 倍。演变规模最大的前 3 位,分别是 HL、LI 和 LA,都在石灰岩区,且演变规模都在 440 km² 以上;除 HLD 外,演变规模最小的分别是 HD、DI 和 DA,都在白云岩区,都在 302 km² 以下。

在连续性碳酸盐岩组合中,已石漠化土地的演变规模顺序为:HL>HD>HLD;在碳酸盐岩夹碎屑岩组合中,LI>DI;在碳酸盐岩与碎屑岩互层组合中,LA>DA,说明:灰岩组合类型区的“已石漠化

土地的演变规模”比白云岩组合类型区的大。在灰岩组合类型区中,石漠化的演变规模顺序为:HL>LI>LA;白云岩组合类型区中,HD>DI>DA,说明:碳酸盐岩岩性越纯,“已石漠化土地的演变规模”越大。

2.2.2 不同石漠化土地类型的演变

根据 1986—2000 年各岩性中不同石漠化类型空间转移矩阵,可以得到 1986—2000 年贵州省各岩性中“不同石漠化类型”的演变规模。在连续性碳酸盐岩组合中,都是 HL>HD>HLD;在碳酸盐岩夹碎屑岩组合中,都是 LI>DI;在碳酸盐岩与碎屑岩互层组合中,都是 LA>DA;这说明:灰岩组合类型区的“各岩性中不同石漠化类型”演变规模比白云岩组合类型区的大。

无石漠化(NRD)、潜在石漠化(PRD)和轻度石漠化(LRD)演变规模顺序都是:HL>LA>LI>HD>DI>HLD>DA;中度石漠化(MRD):HL>LI>LA>HD>DI>HLD>DA;强度石漠化(SRD):HL>LI>HD>DI>LA>HLD>DA;极强度石漠化(ESRD):LI>LA>HLD>HL>HD>DI>DA。这表明:不同石漠化类型的演变规模也是碳酸盐岩岩性越纯,“各岩性中不同石漠化类型”演变规模越大。由此可见,各岩性中不同石漠化类型的演变共性:强度、极强度石漠化波动范围极小,基本都维持在 28 km² 以下;轻度、中度石漠化波动较大,除 DA 和 HLD 外,一般都在 200 km² 以上波动;无石漠化、潜在石漠化起伏很大。

2.3 岩性基底对土地石漠化演变速率的影响

2.3.1 已石漠化土地的总演变

由图 3 可以看出,已石漠化土地演变速率最快的是 49.66 km²·a⁻¹,发生在 HL 中,最慢的是 0.19 km²·a⁻¹,发生在 DA 中。

在连续性碳酸盐岩组合中,石漠化的演变速率顺序为:HL>HD>HLD;在碳酸盐岩夹碎屑岩组合中,LI>DI;在碳酸盐岩与碎屑岩互层组合中,LA>DA;在灰岩组合类型区中,石漠化的演变速率顺序为:HL>LI>LA;白云岩组合类型区中,HD>DI>DA。这表明:灰岩组合类型区的“已石漠化土地演变速率”比白云岩组合类型区的大;碳酸盐岩岩性越纯,“已石漠化土地演变速率”越大。

在七大岩石组合类型中,石漠化演变速率由快到慢的顺序排列,分别是:HL>LI>LA>HD>DI>HLD>DA。

2.3.2 不同石漠化土地类型的演变

由表 1 可知,HL 中的 PRD 是演变速率最快的,演变速率达到 46.14 km²·a⁻¹;其次是 HL 中的 NRD,演变速率

表 1 各岩性中的不同类型石漠化演变速率排名次序(1986—2000)

Table 1 Order of evolution speed for different RD types in various lithological backgrounds (1986—2000)

排名	岩性	石漠化	演变速率	排名	岩性	石漠化	演变速率	排名	岩性	石漠化	演变速率
1	HL	PRD	46.14	11	LA	LRD	17.03	21	HLD	NRD	3.08
2	HL	NRD	36.89	12	LI	MRD	16.24	22	HLD	PRD	3.02
3	LA	PRD	33.11	13	LI	LRD	14.12	23	HLD	LRD	1.91
4	LA	NRD	26.71	14	HD	LRD	12.38	24	HLD	MRD	1.89
5	HL	LRD	24.12	15	LA	MRD	11.39	25	HL	SRD	1.85
6	LI	NRD	23.75	16	DI	NRD	10.22	26	LI	SRD	1.76
7	HL	MRD	23.68	17	DI	PRD	7.06	27	HD	SRD	1.41
8	LI	PRD	22.40	18	DI	LRD	6.82	28	DI	SRD	1.14
9	HD	NRD	19.96	19	HD	MRD	6.32	29	LA	SRD	0.95
10	HD	PRD	19.19	20	DI	MRD	3.19	30	HLD	SRD	0.16

注:石漠化演变速率(单位 $\text{km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)排名在 30 位以后的,数值很小,都在 $0.16 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 以下,未一一列出。

表 2 各岩性中的不同类型石漠化演变频率排名次序(1986—2000)

Table 2 Order of evolution frequency for different RD types in various lithological backgrounds (1986—2000)

排序	岩性	石漠化	演变频率	排序	岩性	石漠化	演变频率	排序	岩性	石漠化	演变频率
1	DA	SRD	109.11	15	LI	SRD	37.63	29	HLD	LRD	26.98
2	DI	ESRD	86.02	16	HL	NRD	37.48	30	HLD	PRD	25.78
3	HL	MRD	62.18	17	DI	NRD	35.96	31	HD	MRD	24.77
4	LI	MRD	59.00	18	DI	LRD	35.62	32	HLD	NRD	21.94
5	HLD	MRD	53.47	19	LI	NRD	35.23	33	HD	NRD	20.80
6	DI	PRD	49.81	20	LA	NRD	33.35	34	DA	LRD	20.05
7	LI	PRD	48.51	21	HD	LRD	33.23	35	LA	SRD	19.92
8	HL	PRD	45.59	22	HL	SRD	33.04	36	DA	MRD	18.48
9	DI	MRD	42.74	23	HLD	SRD	31.33	37	LI	ESRD	15.67
10	LA	PRD	41.93	24	LI	LRD	29.63	38	HD	ESRD	10.98
11	LA	MRD	41.26	25	LA	ESRD	29.43	39	DA	PRD	9.26
12	HD	SRD	40.68	26	HD	PRD	28.32	40	DA	NRD	4.09
13	DI	SRD	39.57	27	LA	LRD	27.94	41	HLD	ESRD	1.02
14	HL	LRD	38.00	28	HL	ESRD	27.37				

注:演变频率单位为 $\% \cdot \text{a}^{-1}$ 。

达到 $36.89 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$; 接下来是 LA 中的 PRD, 演变速率也在 $30 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 以上; 以上石漠化演变速率在 $30 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 以上, 都排在前 8 位, 且都在石灰岩组合类型区, 排在第 9、第 10 位的是白云岩组合类型区, 演变速率都在 $20 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 左右, 可接下來的第 11、12 和第 13 位又是石灰岩组合类型区。排在第 25 位以后的都是强度石漠化, 且演变速率都在 $1.91 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 以下, 极强度石漠化的演变速率未排入前 30 位。显然石漠化达到极强度以后, 演变速率就相当低了。

2.4 岩性基底对土地石漠化演变频率的影响

2.4.1 已石漠化土地的总演变 由图 4 可以看出, 石漠化演变频率最快的发生在 HL 地区, 演变频率高达 $46.32\% \cdot \text{a}^{-1}$, 是 DA 地区 $20.49\% \cdot \text{a}^{-1}$ 的 2 倍之多。在七大岩石组合类型中, 按照演变频率由大到小的顺序排列, 分别是 $\text{HL}(46.32) > \text{LI}(40.22)$

$> \text{DI}(37.84) > \text{HLD}(35.46) > \text{LA}(31.47) > \text{HD}(30.35) > \text{DA}(20.49)$ 。

2.4.2 不同石漠化土地类型的演变 由表 2 可知, 排在第一位的是 DA 中的 SRD 和 DI 中的 ESRD, 演变频率高达 $109.11\% \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $86.02\% \cdot \text{a}^{-1}$, 显然, 这属于一种非正常的演变, 演变过程中可能受到了人类刻意的强烈干预而导致其演变频率过快; 排在第 3、4、5 位的都是 MRD, 而且都是灰岩组合类型区的, 其顺序也是与灰岩纯度排列一致, 体现了灰岩组合类型区中度石漠化易变性和治理的紧迫性; 排在第 6、7、8 位的都是 PRD, 且以灰岩为主, 看来灰岩区潜在在石漠化的“预防”工作也不能松懈; 排在第 9、10、11 位的分别是 DI 中的 MRD, LA 中的 PRD 和 LA 中的 MRD, 三者的演变频率都在 $40\% \cdot \text{a}^{-1}$ 以上。总的看来, 排在前十位, 演变频率都在 $40\% \cdot \text{a}^{-1}$ 以上, 且以灰岩组合类型区为主。

3 结论与讨论

(1)土地石漠化的时空演变过程明显受到碳酸盐岩岩性基底的控制。石漠化的演变方式与碳酸盐岩的类型有关,而与其纯度关系不大。灰岩组合类型区的返变方式和单变方式演变比例明显高于白云岩组合类型区,而层变方式正好与此相反。

石灰岩区由于差异性风化导致的水、土空间配置不均匀(Ji *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2005),以乔木为主的植被受到外界干扰时,容易“突变”,由一种类型很快地直接演变到另一种类型,具有“跳跃性”;而白云岩与此相反,植被以灌草为主,短期内演变较慢,按照石漠化等级“层层演变”。

(2)石漠化演变规模、演变速率和演变频率与碳酸盐岩岩性纯度呈正相关,且石灰岩组合类型区>白云岩组合类型区。即:碳酸盐岩岩性越纯,石漠化演变规模越大、演变速率越快、演变频率越高;且石灰岩组合类型区>白云岩组合类型区。

越纯的碳酸盐岩中的酸不溶物含量越低,岩石风化残留下来的土壤物质也越少(Ji *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2004);各种规模不等的溶洼,甚至地下空间,为残积土壤的积聚提供空间,水、土的微距离和短距离的垂向迁移越是明显(崔之久等,2001; Wang *et al.*, 2004),这可能是碳酸盐岩岩性越纯,石漠化演变越剧烈的原因。

对酸不溶物含量相当的石灰岩和白云岩而言,石灰岩由于显著的差异性风化,基岩面起伏更加强烈,地表土壤物质分布更加不均匀,地下地貌系统也更加发育,因此石漠化演变更是剧烈。这与笔者前期研究结果基本一致(李瑞玲等,2003; Wang *et al.*, 2004)。

(3)在灰岩组合类型区,无石漠化土地易演变到中度石漠化土地;而在白云岩组合类型区,无石漠化土地易演变到轻度石漠化土地,在轻度石漠化土地要经过漫长的“缓冲”,才有可能演变到强度以上石漠化土地。

石灰岩差异性溶蚀作用显著,造成水、土分布不连续,植被以乔木为主,根系空间布置不均匀,在受到外界干扰时,从无石漠化极易向高强度石漠化演变;而白云岩中溶蚀残余物质能相对均匀地分布于地表(Ji *et al.*, 2000),白云岩地区的土层厚度往往大于石灰岩区,植被以灌草为主,它们的生长和繁衍较灰岩地区稳定,因此在受到外界干扰时,从无石漠

化向高等级石漠化演变速率较为缓慢。

(4)碳酸盐岩纯度和类型对强度以上石漠化土地演变影响很小,对潜在、轻度和中度石漠化土地的演变影响较大。

强度以上石漠化属于岩石大面积裸露、农用价值彻底丧失的典型难利用土地,加上碳酸盐岩成土速率又极慢,在短期内很难恢复;轻度、中度石漠化区有一定的水、土资源,是连接强度以上石漠化和无石漠化2个极端的中间环节,既可能向高等级演变,又可能向低等级演变,从而拉动2个极端的面积。因此,在石漠化治理中应当作为“核心”和“龙头”。

References

- Bai, X. Y., Wang, S. J., Chen, Q. W., et al., 2009. Spatial-temporal evolution process and its evaluation method of karst rocky desertification in Guizhou Province, China. *Acta Geographica Sinica*, 64(5): 609–618 (in Chinese with English abstract).
- Cai, Y. L., 1997. Ecological and socio-economic rehabilitation in the karst of Southwest China. *The Journal of Chinese Geography*, 7(2): 24–32.
- Cao, J. H., Yuan, D. X., 2005. Karst ecosystem constrained by geological conditions in Southwest China. Geological Publishing House, Beijing, 1–189 (in Chinese).
- Cao, J. H., Yuan, D. X., Pan, G. X., 2003. Some soil features in karst ecosystem. *Advance in Earth Sciences*, 18(1): 37–44 (in Chinese with English abstract).
- Cao, J. H., Yuan, D. X., Zhang, C., et al., 2004. Karst ecosystem constrained by geological conditions in Southwest China. *Earth and Environment*, 32(1): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Cui, Z. J., Li, D. W., Liu, G. N., et al., 2001. Covered karst, weathering crust and karst planation surface (of double levels). *Science in China (Series D)*, 31(6): 510–519 (in Chinese with English abstract).
- Ji, H. B., Ouyang, Z. Y., Wang, S. J., et al., 2000. Element geochemistry of weathering profile of dolomitite and its implications for the average chemical composition of the upper-continent crust. *Science in China (Series D)*, 43(1): 23–35.
- Li, E. X., Jiang, Z. C., Cao, J. H., et al., 2004. The comparison of properties of karst soil and karst erosion ratio under different successional stage of karst vegetation in Nongla, Guangxi. *Acta Ecologica Sinica*, 24(6): 1131–1139 (in Chinese with English abstract).
- Li, R. L., Wang, S. J., Zhou, D. Q., et al., 2003. The correlation between rock desertification and lithology in karst

- area of Guizhou. *Acta Geographica Sinica*, 58 (2): 314—320 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. B., Shao, J. A., Yang, H., et al., 2008. The relations between land use and karst rocky desertification in a typical karst area, China. *Environmental Geology*, 57 (3): 621—627. doi:10.1007/s00254-008-1331-z
- Wang, S. J., Ji, H. B., Ouyang, Z. Y., et al., 1999. Preliminary study on carbonate rock weathering pedogenesis. *Science in China (Series D)*, 42(6): 572—581.
- Wang, S. J., Li, R. L., Sun, C. X., et al., 2004. How types of carbonate rock assemblages constrain the distribution of karst rocky desertified land in Guizhou Province, PR China: phenomena and mechanisms. *Land Degradation & Development*, 15: 123—131. doi:10.1002/ldr.591
- Wang, S. J., Zhang, D. F., Li, R. L., et al., 2002. Mechanism of rocky desertification in the karst mountain areas of Guizhou Province, Southwest China. *International Review for Environmental Strategies*, 3(1): 123—135.
- Xiong, K. N., Li, P., Zhou, Z. F., et al., 2002. The RS and GIS representative study on karst rock desertification—an example of Guizhou Province. Geological Publishing House, Beijing, 1—182 (in Chinese).
- Yuan, D. X., 1999. Rock desertification in the subtropical karst of South China. Karst Dynamics Laboratory and Network Center of Guangxi Normal University. <http://www.karst.edu.cn/desert/rockdesert.htm>
- Yuan, D. X., Cai, G. H., 1988. The science of karst environment. Chongqing Science and Technology Publishing House, Chongqing, 1—162 (in Chinese).
- Zhang, C., Yuan, D. X., Cao, J. H., 2005. Analysis of the environmental sensitivities of a typical dynamic epikarst system at the Nongla monitoring site, Guangxi, China. *Environmental Geology*, 47 (5): 615—619. doi: 10.1007/s00254-004-1186-x

附中文参考文献

- 白晓永, 王世杰, 陈起伟, 等, 2009. 贵州土地石漠化类型时空演变过程及其评价. *地理学报*, 64(5): 609—618.
- 曹建华, 袁道先, 2005. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统. 北京: 地质出版社, 1—189.
- 曹建华, 袁道先, 潘根兴, 2003. 岩溶生态系统中的土壤. *地球科学进展*, 18(1): 37—44.
- 曹建华, 袁道先, 章程, 等, 2004. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统. *地球与环境*, 32(1): 1—8.
- 崔之久, 李德文, 刘耕年, 等, 2001. 覆盖型岩溶、风化壳与岩溶(双层)夷平面. *中国科学(D辑)*, 31(6): 510—519.
- 李恩香, 蒋忠诚, 曹建华, 等, 2004. 广西弄拉岩溶植被不同演替阶段的主要土壤因子及溶蚀速率对比研究. *生态学报*, 24(6): 1131—1139.
- 李瑞玲, 王世杰, 周德全, 等, 2003. 贵州岩溶地区岩性与土地石漠化的相关分析. *地理学报*, 58(2): 314—320.
- 熊康宁, 黎平, 周忠发, 等, 2002. 喀斯特石漠化的遥感-GIS典型研究——以贵州省为例. 北京: 地质出版社, 1—182.
- 袁道先, 蔡桂鸿, 1988. 岩溶环境学. 重庆: 重庆科学技术出版社, 1—162.