第 24 卷第 6 期
2004 年 6 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol. 24, No. 6
Jun., 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率对比研究

李恩香[1,2]，蒋忠诚[1*]，曹建华[1]，姜光辉[1]，邓 艳[1]

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所，国土资源部岩溶动力学开放实验室，桂林 541004；2. 浙江大学生命科学院，杭州 310029)

摘要：植被是土壤形成过程中最活跃的因素，在同样气候条件下又是最重要的因素，植被的演替改变了土壤的理化性质，促进了成土作用。植被的正向演替可改善土壤 A 层的理化性状，降低容重，增加孔隙度、含水量和有机质含量；而 B 层理化性状在演替初期得到改善，后期(乔林期)却明显下降，容重增加，孔隙度、含水量和有机质含量大大降低。土壤 pH 值随演替进展逐渐降低。Mg 含量随正向演替而降低；Ca 因植物的作用而呈现复杂性。土壤 CO_2 的变化也很复杂，表层 CO_2 随正向演替明显增加，但当(青冈林土)孔隙度很大时有利于 CO_2 的逸出而大大降低；深层 CO_2 与土壤孔隙度、含水量一致，初期随正向演替增加，到乔林期又降低。地表溶蚀率随植被正向演替，先降低后增加；土壤中岩石的溶蚀率随演替而增加，与 Ca、Mg 含量，pH 值成反比，与土壤有机碳、CO_2 浓度成正比；植被进展演替有促进潜蚀的作用，演替初期表层溶蚀率较深层高，到乔林阶段后深层较高。岩石的溶蚀率还受土壤含水量、孔隙度等多种因素的影响。

关键词：广西弄拉；植被演替；土壤因子；溶蚀率

The comparison of properties of Karst soil and Karst erosion ratio under different successional stages of Karst vegetation in Nongla, Guangxi

LI En-Xiang[1,2], JIANG Zhong-Cheng[1*], CAO Jian-Hua[1], JIANG Guang-Hui[1], DENG Yan[1] (1. *Institute of Karst Geology, CAGS, Karst Dynamics Laborary, MLR, Guilin, Guangxi* 541004, *China*; 2. *College of Life Science, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang* 310029, *China*). ***Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(6): 1131～1139.**

Abstract: The deterioration of karst ecosystems in Guangxi is very serious, which hinders local economic development and has become one of the key environmental problems in the province. In order to look for the best way to rehabilitate the vegetation in karst areas and achieve sustainable development, it is necessary to study the change of environmental factors during the process of succession. In this paper, selected properties of karst soils, including water content, soil porosity, soil organic C, pH value, soil CO_2, the content of Ca and Mg, and karst erosion ratio under plant communities representing six successional stages in Longla village, Guangxi, China are described. The stages are bare rock, grass, grass-shrubs, shrubs, young trees and climax forest.

The study shows that vegetation can accelerate the formation of karst soil, and determine various soil properties. Progressive succession can improve the physical conditions, for example raising the soil porosity and water content and reducing soil bulk density in the upper soil horizon (5～15cm). However, the changes are more complex in the lower horizons (25～35cm), where increased soil bulk density and reduced soil porosity can occur at the forest stages.

The changes in the chemical properties of karst soil are also complex during the succession. With the increased vegetation

基金项目：国家自然科学基金资助项目(30069005)；广西自然科学基金资助项目(30060022)；国土资源部重点科技项目资助项目(2000208)

收稿日期：2003-03-15；**修订日期**：2003-11-05

作者简介：李恩香(1970～)，男，广西桂林人，博士生，主要从事生态学、植物学研究，enxl@163.com

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: zhjiang@mail.karst.ac.cn

致谢：感谢广西植物研究所李先琨老师的指导，感谢蓝芙宁、路洪海等参与部分野外工作

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 30069005); Natural Science Foundation of Guangxi (No. 30060022); Key Project of Ministry of Land and Resource (No. 2000208)

Received date: 2003-03-15; **Accepted date**: 2003-11-05

Biography: LI En-Xiang, Ph. D. candidate, mainly engaged in vegetation ecology and botany.

万方数据

cover, soil organic C increases in the upper horizon (5～15cm); but in the lower horizon (25～35cm), it increases obviously in the earlier stages (from bare rock to shrubs) and may then decrease at the tree/forest stages. The pH and Mg content decrease with successional advancement. Changes in Ca content are complex, with the element being absorbed and then released by plants during succession.

The soil CO_2 was measured at 20cm and 50cm depth. In general, the content of soil CO_2 at 50cm depth is higher than that at 20cm. The soil CO_2 in the upper horizon (20cm) increases during succession, but may be lower when the soil porosity is very high. In the lower horizon (50cm), this increase appears not to occur. The soil CO_2 at the depth of 50cm positively correlated to the soil porosity and water content. Changes in soil CO_2 are very complex due to various factors. And do not appear to match experimental simulations of this process, in which the soil CO_2 is higher under the better vegetation.

At every successional stage, the erosion ratio was measured at the soil surface (or rock surface at the bare rock stage), 20cm depth and 50cm depth. Three limestone tablets were placed at each depth. The results show that erosion ratio is positively correlated to soil CO_2 concentration, the content of soil organic C and pH; and negatively correlated with the content of Ca and Mg in soil. The erosion ratios in the soil increased with the successional advancement, which suggests that more mature vegetation can produce more organic matter, more CO_2 and organic acid, reduce the pH value, accelerate the cycle of Ca and Mg and also increase the overall rate of soil formation. The erosion ratios are higher at 20cm depth than that at 50cm depth in prophase, but lower in anaphase (at the tree/forest stages). This confirms that vegetation succession accelerates the erosion ratio of limestone tablets in the lower horizons of the soil more significantly than that in the upper horizon. The karst erosion ratio at the surface decreases in prophase and increases in anaphase with successional advancement. The karst erosion ratio is also affected by other factors of which rainfall erosion is very important. Thus the erosion ratio at the surface of bare rock stage is higher than that of any later stage. The karst erosion ratio is an integrated measure of the effects of all factors in combination

Key words: Nongla; Guangxi; China; succession of Karst vegetation; Karst soil; Karst erosion ratio

文章编号:1000-0933(2004)06-1131-09 **中图分类号**:Q948.113 **文献标识码**:A

生态系统的退化问题是影响国民经济发展的重大问题。广西是世界上最重要的岩溶区之一,岩溶面积达 9.87 万 km^2,占广西总面积的 41.57%,其中裸露碳酸盐岩面积占碳酸盐岩总面积的 75.7%[1]。脆弱的岩溶生态环境,人口的剧增,以及资源的不合理利用导致了生态环境的严重退化,成为我区经济发展的障碍,恢复和重建广西岩溶区生态系统,从而实现经济的可持续发展,全面奔小康,成为广西岩溶区的首要任务。要实现生态恢复和重建,必须对岩溶植被演替规律及其动力机制进行研究,为我区生态恢复和重建产生推动作用。不同植被下的岩溶作用的研究是岩溶植被演替规律及其动力机制研究的一部分。岩溶作用的研究已取得了丰硕的成果,植被对岩溶作用的研究成果也不少[2,3],但是还没有人从植被演替角度来研究岩溶作用。本文以弄拉为例对不同演替阶段植被的岩溶作用进行了探讨。

1 研究区概况和方法

1.1 研究区概况

弄拉位于广西马山县古零镇,为典型的峰丛洼地地貌,地层为泥盆纪东岗岭组中段(D_2d^2),岩性较复杂,以含泥硅质的白云岩为主[4],土壤为棕色石灰土(岩、土化学性状见表 1)。弄拉植被为人为破坏后的次生植被,有封山 10、20、40a 的和仍受严重干扰的植物群落,这样在小范围内形成了演替的系列群落(样地的地理状况见表 2)。

① 裸岩阶段(Bare rock stage,S1) 岩石裸露,无植被生长。

② 一年生草丛阶段(S2) 为丢荒 10a 左右的弃耕坡地,由于长期的过度放牧,群落一直处于草丛阶段。群落高度约 20cm 以漫生莠竹(*Microstegium vagans*)为主,盖度 90%,样地上方为草灌丛样地。

③ 草灌丛阶段(S3) 是草丛向灌丛的过渡阶段,群落高度为 1.6m,盖度 90%,群落以黄荆(*Vitex negundo*)、类芦(*Neyraudia reynaudiana*)、白茅(*Imperata cylindrical* var. *major*)、漫生莠竹为主,其中草本植物的优势稍胜过灌木。群落受放牧和取薪的干扰。

④ 灌丛阶段(S4) 为由于人为的选择性砍划和放牧干扰而产生的群落,群落高度 2.8m,盖度 86%;灌木以黄荆占绝对优势;草本层的肾蕨(*Nephrolepis condifolia* (L.) Presl)盖度达 80%,土壤较疏松。

⑤ 乔木幼林阶段(S5) 为封山 20a 的常绿阔叶林,群落盖度 95%右;乔木层以黄桤(*Engelhardtia roxburyhiana*)为优势,郁闭度 0.85 左;灌层以紫凌木(*Decaspermum esquiorlii* (Levl.) Chang)为优势种,灌层盖度 25%;草本层盖度 15%。由于人为

万方数据

采划留目的树种,树木分布较均匀,林内层次较简单.地表枯落物厚约 2cm,土壤盖度约 30%,厚度 30～50cm,局部达 60cm,土壤较致密。

⑥ 乔木顶级阶段(S6)　为封山 40a 形成的常绿阔叶林群落,群落高度 16m,盖度 95%,郁闭度约 0.92,以中性树种青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)占优势,胸径可达 34cm,最大基径达 50cm 余。因青冈林是亚热带石灰岩山区常见的稳定群落[5~7],所以视此群落为顶级群落。受一定的人为干扰,林下灌木较少(40%),草本也较少(35%)。

表 1　广西弄拉的基岩及各样地土壤的化学性质

Table 1　Chemical properties of the bedrock and siol of different samples at Nongla, Guangxi

项目 Items		SiO_2 %	Al_2O_3 %	Fe_2O_3 %	CaO %	MgO %	TN %	P %	Mn ug/g	K_2O %	Na_2O %	Org. C %	pH
草丛 Grass stage(S2)	土(A 层)soil (LA)	37.84	26.36	10.37	0.54	3.37	0.28	0.057	1344.5	1.79	0.071	2.28	7.63
	土(B 层)Soil (LB)	38.54	26.30	10.37	0.58	3.37	0.25	0.057	1628.0	1.82	0.071	1.51	7.92
草灌丛 Grass-shrub stage(S3)	土(A 层)soil (LA)	37.96	25.44	8.22	0.58	3.43	0.31	0.059	1607.0	1.58	0.069	2.79	7.31
	土(B 层)Soil (LB)	38.78	26.30	8.94	0.29	3.41	0.26	0.049	1533.5	1.67	0.068	1.70	7.44
灌丛 Shrub stage(S4)	土(A 层)soil (LA)	40.10	24.49	8.94	0.44	2.70	0.36	0.100	2355.0	1.29	0.089	3.37	7.33
	土(B 层)Soil (LB)	40.38	25.60	10.01	0.47	2.71	0.33	0.089	2138.0	1.32	0.089	2.28	7.29
乔幼林 Earlier arbor stage(S5)	土(A 层)Soil (LA)	39.44	25.37	9.65	0.32	2.76	0.33	0.034	1098.0	0.28	0.065	2.99	6.69
	土(B 层)Soil (LB)	37.80	27.60	11.80	0.21	2.96	0.20	0.026	518.5	0.25	0.052	1.32	6.98
顶级乔林 Climax stage(S6)	土(A 层)Soil (LA)	36.74	25.11	9.65	0.60	2.79	0.42	0.039	680.0	0.36	0.066	4.14	6.35
	土(B 层)Soil (LB)	38.42	27.74	10.72	0.57	3.04	0.24	0.033	656.0	0.30	0.063	1.22	7.40
基岩 Bedrock		0.43	0.11	0.54	31.42	20.4	—	0.012	0.113	0.025	0.005	—	—

表 2　广西弄拉各样地地理状况

Table 2　The geographical properties of sample spots at Nongla, Guangxi

样地号 Sample No.	N	E	海拔(m) Elevation	坡向 Slope orientation	坡位 Location of hill	坡度 Gradient	土厚(cm) Soil depth	土盖度(%) Soil coverage	干扰状况 Disturbance state
S1	23°39.620′	108°19.975′	570	SW24°	中下坡 sub-mid	10°	—	—	—
S2	23°38.881′	108°19.091′	400	SE40°	下坡 lower	6°	100	100	严重 serious
S3	23°38.884′	108°19.091′	420	SE60°	中下坡 sub-mid	25°	30～50	50	严重 serious
S4	23°39.612′	108°19.985′	564	SW25°	中下坡 sub-mid	10°	40～50	45	严重 serious
S5	23°39.521′	108°19.987′	567	N	中坡 mid	15°	30～50	30	较轻 slight
S6	23°39.819′	108°19.360′	550	SE70°	中坡 mid	40°	30～80	30	较轻 slight

从地理条件来看,乔木林的两个阶段的地理条件并不比其它样地的好,如青冈林样地的坡度较大,但因恢复的时间长而达到顶级;黄桤林恢复的时间较短,但生长状况很好。常绿阔叶林是南亚热带常见的植被类型。如果给以足够的时间和减小干扰,所研究的样地都可以达到常绿阔叶林的顶级阶段。而且据村里的老人说,在大炼钢铁之前这里的植被类型就是以青冈为优势的常绿阔叶林。所以将这些小范围内处于不同地段的植被看作是处于同一植被的不同演替阶段是可行的。因岩溶小生境的复杂多变,研究的难度较大,即使在同一样地内不同小生境的土壤理化性质也会出现差异。这也是为什么岩溶区植被演替及其土壤研究较少的原因。本研究在测定土壤性质和岩溶作用时,选取大致相同的小生境以增加可比性。

1.2　研究方法

1.2.1　土壤研究方法　用便携式 CO_2 气体泵和测试管,测土下 20cm 和 50cm 处的 CO_2 浓度,在埋试片前后各测一次;用环刀法[8]测定地下 5～15cm 和 25～35cm 处自然土壤的含水量、容重、孔隙度;分析土壤 A、B 层的 pH 值、Ca、Mg 等元素含量。

1.2.2　溶蚀率的测定[9]　在地表和土壤的不同深度(－20cm、－50cm)放置标准石灰岩溶蚀试片,每个样地每个层面放置 3 块,放置时间为 2000 年 5 月 26 日至 11 月 6 日。取出后测其溶蚀率[10](试片溶蚀量/试片原重 * 100%)。

2　结果和讨论

2.1　土壤物化性质的差异

2.1.1　土壤物理性质　研究结果(表 3)显示,随植被正向演替,浅层土壤容重有降低的趋势,但黄桤林中上层的容重较大有可能与坡向有关;深层土壤容重在初期随演替而减小,在乔林阶段却有所增加。土壤孔隙度的变化与土壤容重相反。说明此地的森林可改善土壤浅层的性状;而使深层土壤的容重增加,孔隙度减小。这可能与乔木对营养物质的大量利用有关。从图 1a 可看出,土壤的含水量与孔隙度呈显著的正相关,演替初期土壤含水量增加,但当演替到乔林阶段,土壤含水量却有下降的趋势,这可能是其群落的光合作用大增要消耗更多的水分的缘故。

万方数据

张庆费等[11]研究认为，随着演替的进展土壤的物理性质有改善的趋势，如土壤孔隙度增加、容重减小，土壤含水量增加，但弄拉的研究结果与之并不完全一致。本研究显示，表层土壤的物理性质随植被的正向演替而改善；深层土壤的物理性质随演替出现先改善后退化的特点，森林有增加深层土壤容重，减小其孔隙度的倾向。含水量变化与孔隙度相同。可见，土壤的物理性状因地、因时而异，也因基岩不同而异。

表3 广西弄拉不同植被下土壤物理性质

Table 3 Soil Physical Properties under vegetations at different stages at Nongla, Guangxi

项目 Items	深度 Depth(cm)	不同阶段植被下土壤的物理性质 The physical properties of soil under vegetations at different stages				
		S2	S3	S4	S5	S6
容重 Bulk density(BD)(g/cm³)	5～15	1.2825	1.2507	1.1111	1.298	1.0878
	25～35	1.3033	1.2267	1.1354	1.3305	1.3071
孔隙度 Soil porosity(SP)(%)	5～15	51.71	52.7	57.32	51.05	57.88
	25～35	51.05	53.36	56.33	50.06	50.72
自然含水量 Water content(WC)(%)	5～15	30.043	28.032	33.921	26.71	33.784
	25～35	30.338	32.208	37.009	31.146	32.017

2.1.2 土壤pH值和有机碳 图1表明，土壤有机碳在不同层面含量不同，A层的有机碳含量明显高于B层。A层土壤有机碳含量随演替进展而增加，但同时也受其他条件的影响；而B层土壤有机碳在演替的初期呈上升的趋势，到乔林阶段后急剧下降。从图1中可看出土壤有机碳的含量与土壤孔隙度呈正相关，因而与土壤的容重呈负相关。说明土壤有机碳来源于植被，随演替的进展群落的光合作用大大提高，制造更多的有机物，使群落的生物量增加，产生更多的凋落物，有更多的有机质进入土壤圈层。但不同植被有机质的分布有一定的差异，草本特别是一年生草本根系死亡率高；而木本植物根系死亡率低，其地表凋落物量大，主要是枯枝落叶，但集中在表层，同时随植被演替植物从土壤中吸收的营养物质增多。这样就表现出土壤A层的有机碳含量高于B层，而且森林土壤中有机质随深度变化的幅度较大[12]；随植被的演替进展而表现出A层有机碳增加，B层有机碳则先增加后剧减。同时也使得土壤的容重、孔隙度、含水量发生规律性变化。

pH值与有机碳变化趋势相反，A层pH值表现出随演替进展而明显降低，B层也出现下降的趋势，但顶级阶段出现较高的值。这说明植物枯落物的分解可产生较多的CO_2和有机酸[12,13]，降低了土壤的pH值，植物输入土壤的有机质越多，产生的酸性物质越多，土壤的pH值就越低。青冈林中的B层pH值较高，从此处岩石试片具较高溶蚀率及Ca、Mg元素的含量较高推测，可能是B层接近土下岩石，溶蚀作用消耗较多的CO_2和有机酸，土中Ca、Mg也消耗了部分酸性物质，以及植物对有机质的大量吸收所致。

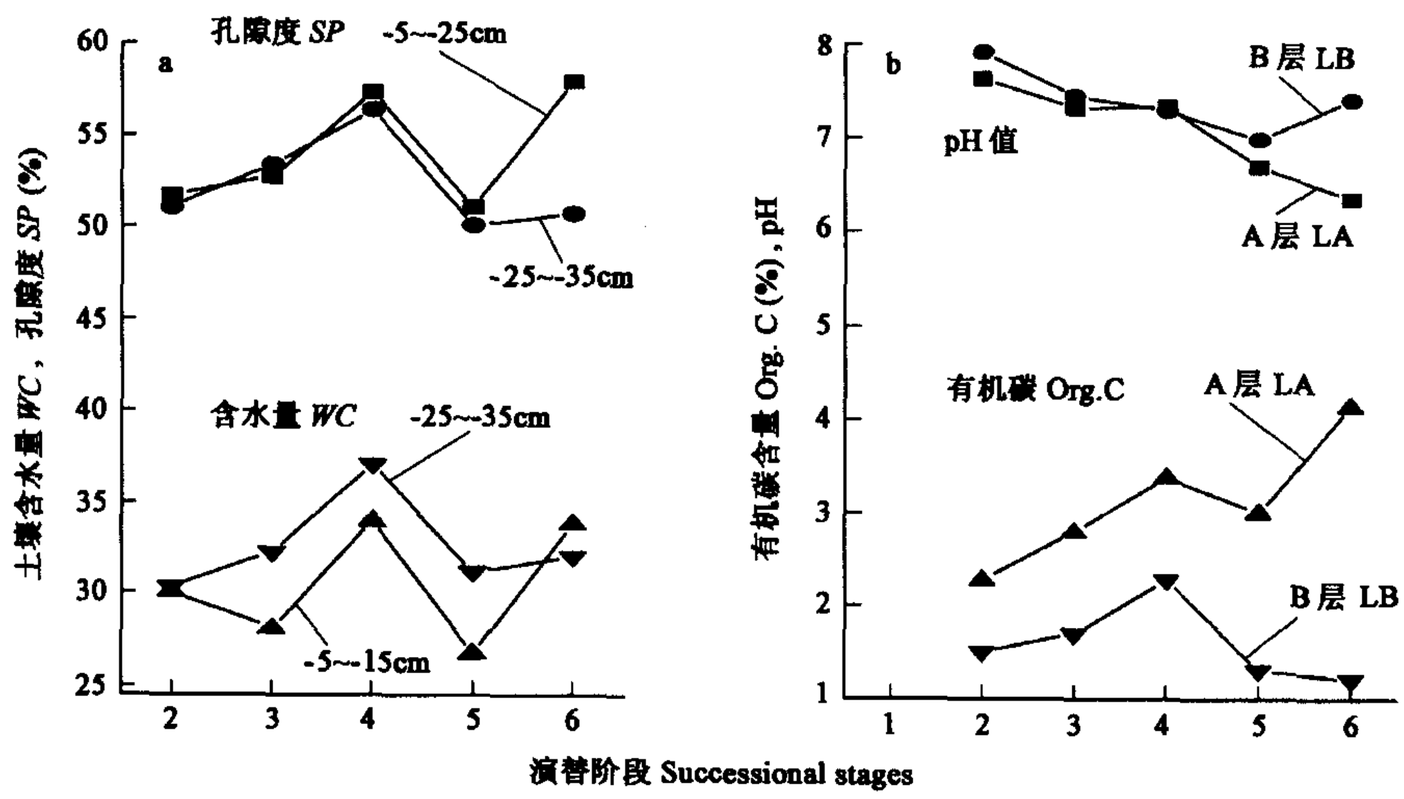

图1 土壤的含水量(*WC*)、孔隙度(*SP*)、有机碳(Org. C)含量、pH值

Fig. 1 Water content(*WC*), soil porosity(*SP*), organic carbon(Org. C) and pH value of soil at different stages

A层 Layer A, LA；B层 Layer B, LB，图2同 the same as fig. 2

2.1.3 土壤中Ca、Mg元素的迁移特性 从图2可知，与基岩中CaO、MgO的含量[4](表1)相比，土壤Ca、Mg含量都发生了很

万方数据

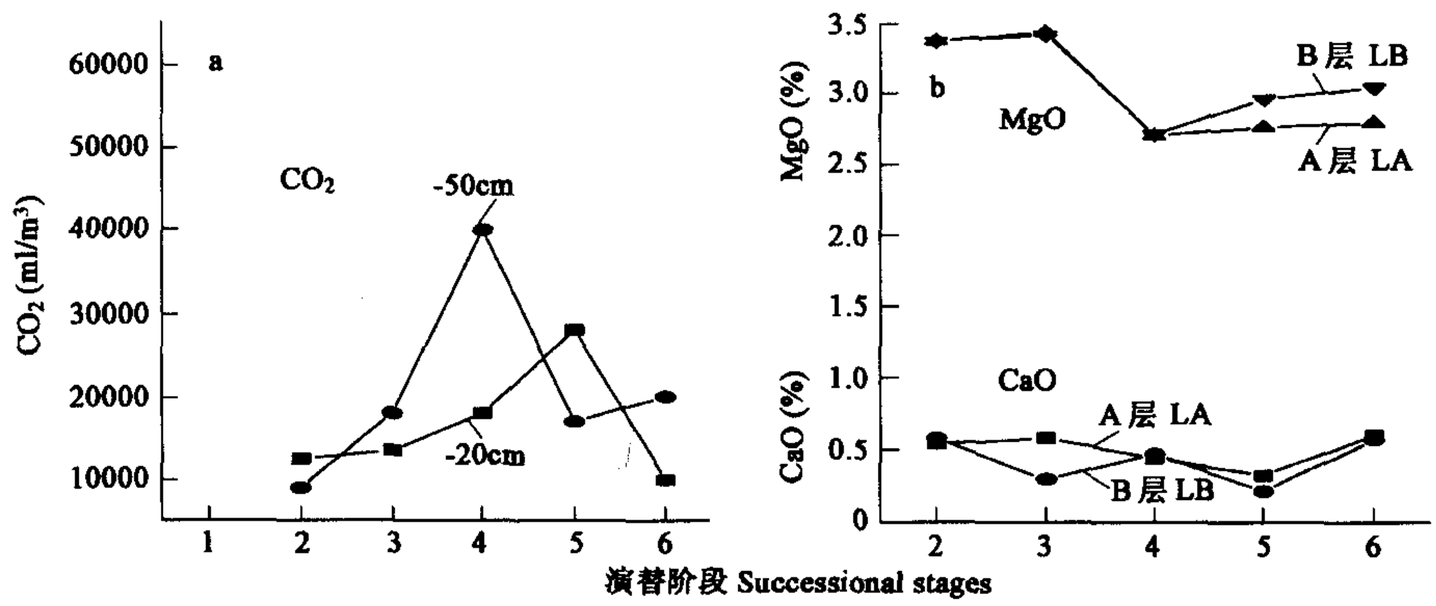

图 2　埋试片前土壤 CO_2 浓度及土壤 Ca、Mg 含量

Fig. 2　CO_2 and Ca, Mg content in the soil of different stages before burying limestone tablets

大的变化,Ca 的迁移速率明显大于 Mg 的迁移率,且各自表现出不同的特点。Mg 随演替的进展迁移率有所增加,其在土壤中的含量减小;Ca 则由于植被[14]和水分运移的影响而反复的脱钙和复钙,而表现出复杂的特征,因为各样地水文地形地貌的差异和不同植物对钙的吸收转移能力不同。从表 3 中还可看出,虽然 Ca、Mg 含量是影响土壤 pH 值的重要因素,但其影响远没有植被演替中群落变化对 pH 值的影响明显和强烈。

2.2　不同演替阶段 CO_2 浓度的变化

土壤 CO_2 的主要来源于微生物、植物和土壤动物的呼吸作用,所以不同植被条件下土壤 CO_2 的浓度具有很大的差异。从表 4、表 5 可看出,弄拉不同植被下 CO_2 浓度的变化与弄岗、阳朔等地的相似。一般情况下－20cm 处的 CO_2 浓度要低于－50cm 处的;植被伐光后土壤 CO_2 浓度大大降低;弄岗、弄拉两地土下 20cm 处 CO_2 浓度随演替的进展而呈现出一定的增加趋势,但阳朔样地的 CO_2 并不具此特点;而－50cm 处的更不具规律性。这些结果并不象实验模拟那样表现出较好的规律性,即土壤 CO_2 浓度随演替进展而明显增加①。

从图 1、图 2 可看出,埋试片前土壤 CO_2 与土壤孔隙度、水分也有很大的关系,下层的土壤 CO_2 的变化曲线和孔隙度、水分的相一致,呈正相关,其浓度在初期增长,在乔木期下降;上层 CO_2 变化较复杂,从草丛到乔木幼林呈明显增长,但顶级青冈林期最低。这些变化可做如下解释,随植被演替的进展,植物根系,土壤动物、微生物的活动增强,产生越来越多 CO_2,但演替同时增加土壤表层的孔隙度,使更多的 CO_2 散失到空气中,因而土壤上层 CO_2 表现出从草-草灌-灌丛-乔木幼林逐渐增加,而青冈林上层土壤的孔隙度很大,CO_2 进入空气的压力梯度大,更多的 CO_2 进入空气,CO_2 的浓度就低;土壤下层 CO_2 向空气逸出的能力小,且温度较稳定,其浓度主要受生物作用影响,而制约生物活动的土壤孔隙度和含水量就起着至关重要的作用,因而表现出上述特征。

表 4　广西弄拉不同阶段植被下的土壤 CO_2

Table 4　The soil CO_2 under vegetations at different stages at Nongla, Guangxi

时间 Time	深度(cm) Depth	CO_2(ml/m³) S2	S3	S4	S5	S6
埋试片前(5.26) Before bury tablets	－20	12500	13500	18000	28000	10000
埋试片后(8.31) After bury tablets	－20	29000	13000	31500	57000	20500
埋试片前(5.26) Before bury tablets	－50	9000	18000	40000	17000	20000
埋试片后(8.31) After bury tablets	－50	55000	19000	42000	70000	29000

埋试片后土壤(尤其是深层土壤)CO_2 浓度发生了很大的变化,是多种因素共同影响的结果。人为的挖掘改变了土壤的结构,使土壤变得疏松,有利于植物根系和土壤动物、微生物的活动,也就是说增强了土壤的呼吸作用。－50cm 处的土壤 CO_2 浓度明显较自然状态下高,特别是对于原来上层、下层孔隙度都很小的草丛和乔幼林来说,其增加幅度更大;且－50cm 处的 CO_2 浓度明显高于－20cm 处的,说明土壤疏松可能促进了微生物活动深度的增加,和微生物量的增加。这也说明,人为改变土壤结构可以促进植被的进展演替,人类活动可以加快植被恢复的进程。蒋忠诚 1998 年对弄拉森林土壤 CO_2 的研究表明,土壤 CO_2 浓度与气温、降雨呈正相关,随季节变化而变化。埋试片前后 CO_2 浓度的不同也是气温、降雨影响的结果,此时温度升高所起的作用要大。

土壤 CO_2 不仅受植被的影响,同时也受土壤水分、温度,通气状况等多种因素的影响,凡影响温度变化,水分、气体的保存、

① 见曹建华的博士论文:岩溶土壤系统中生物作用与有机碳转移 $CaCO_3$-CO_2-H_2O 体系的调节与控制

万方数据

运移和转换的气候、水文、地质、地貌条件，都影响到土壤 CO_2 的浓度，因为他们都影响到生物的活动，归根到底土壤 CO_2 主要是由生物呼吸作用产生。由于岩溶区小生境复杂多样，即使在同一样地内也会产生很大的差异。其实土壤因子是复杂多变的，土壤本身是各因素综合作用的结果，所以在分析土壤性质时，一切要以时间、地点、条件为转移，综合考虑各因素的影响。

表5 广西弄岗、阳朔不同阶段植被下的土壤 CO_2

Table 5 The soil CO_2 under vegetations at different stages at Longgang and Yangshuo, Guangxi

地点 Spots	深度(cm) Depth	CO_2(ml/m³) 裸地 Bare soil	草丛 Grass stage	灌丛 Shrub stage	先锋乔林 Pioneer arbor stage	顶级群落1 Climax 1	顶级群落2 Climax 2
弄岗(7月)Longgang(July)	−20	—	9000	10500	12000	15000	6500
	−50	—	21000	15000	10000	20000	14000
阳朔(8月)Yangshuo(Aug.)	−20	3600	51000	38000	4800	25500	—
	−50	—	60000	37000	36000	48000	—

2.3 不同植被下的溶蚀能力

从表6可知，不同植被下岩石试片的溶蚀率具有很大的差别。在从地表看，裸岩表面的溶蚀率最高，随正向演替的进展溶蚀率有所下降，到乔林阶段又上升。随演替的进展，土中试片的溶蚀率增加，但并不呈现直线的增长。不同演替阶段，土壤中同一深度的溶蚀率不同，但−20cm 和−50cm 处的溶蚀率变化曲线相似，同时消长。同一演替阶段，不同层面的溶蚀率变化也不同，演替初期−20cm 处的溶蚀率大于−50cm 处的溶蚀率，进入乔林阶段后，刚好相反，说明植被的演替可以促进深层的溶蚀作用。从森林阶段看，3个层面中，−50cm 处的溶蚀率最大，这与以前的研究一致[15]，但演替初期并不是这样。

表6 不同演替阶段植被下石灰岩试片的溶蚀率

Table 6 Erosion ratio of limestone tablets under different stages during succession

项目 Items	不同演替阶段植被下石灰岩试片的溶蚀率(*ER*)(%) Erosion ratio(*ER*) of limestone tablets under different stages during succession					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
地表 Surface	0.279	0.223	0.1318	0.106	0.233	0.174
−20cm	—	0.359	0.2619	0.661	0.844	0.498
−50cm	—	0.158	0.1106	0.583	1.097	0.664

从总体情况看，地表溶蚀率是比较小的(这与徐胜友等[9,16]的研究结果有差异)，但演替初期地表溶蚀重要地位，演替后期地表溶蚀占的比例越来越小，以后植被发挥的作用越来越大，土壤中溶蚀率随植被正向演替大大增加。说明植被在改变环境过程中的重要作用，植被的存在和发展促进了岩溶区土壤的形成。最大的溶蚀率出现在乔木幼林阶段，说明可能与乔木的树种及其他因素有关。溶蚀率还受到土壤 CO_2、含水量、孔隙度、pH 值、有机质、Ca、Mg 含量等多种因素的影响。

2.3.1 溶蚀作用与土壤 CO_2 浓度具有密切的关系 从同一深度来看，溶蚀率与土壤 CO_2 成正比，图3中显示土壤 CO_2 与溶蚀率变化曲线是一致的。从同一剖面看，在演替初期植被到达乔林阶段以前，土壤中不同深度的溶蚀率与土壤 CO_2 浓度不成正比，−20cm 处的 CO_2 浓度较−50cm 处的低，但其溶蚀率高；在演替后期植被到达乔林阶段后，溶蚀率与土壤 CO_2 成正比，−20cm 处的 CO_2 浓度和溶蚀率均较−50cm 处的低。可见 CO_2 浓度是影响溶蚀率的重要因子，而植被是影响溶蚀率最活跃的因素。植被可通过影响土壤孔隙度、含水量、土壤有机碳等来影响 CO_2 的浓度来影响或直接影响溶蚀率。岩石试片的溶蚀率主要受挖掘后土壤孔隙度和含水量的影响，而所测与挖掘前自然剖面中的孔隙度含水量关系不是很密切。在草灌丛阶段土壤 CO_2

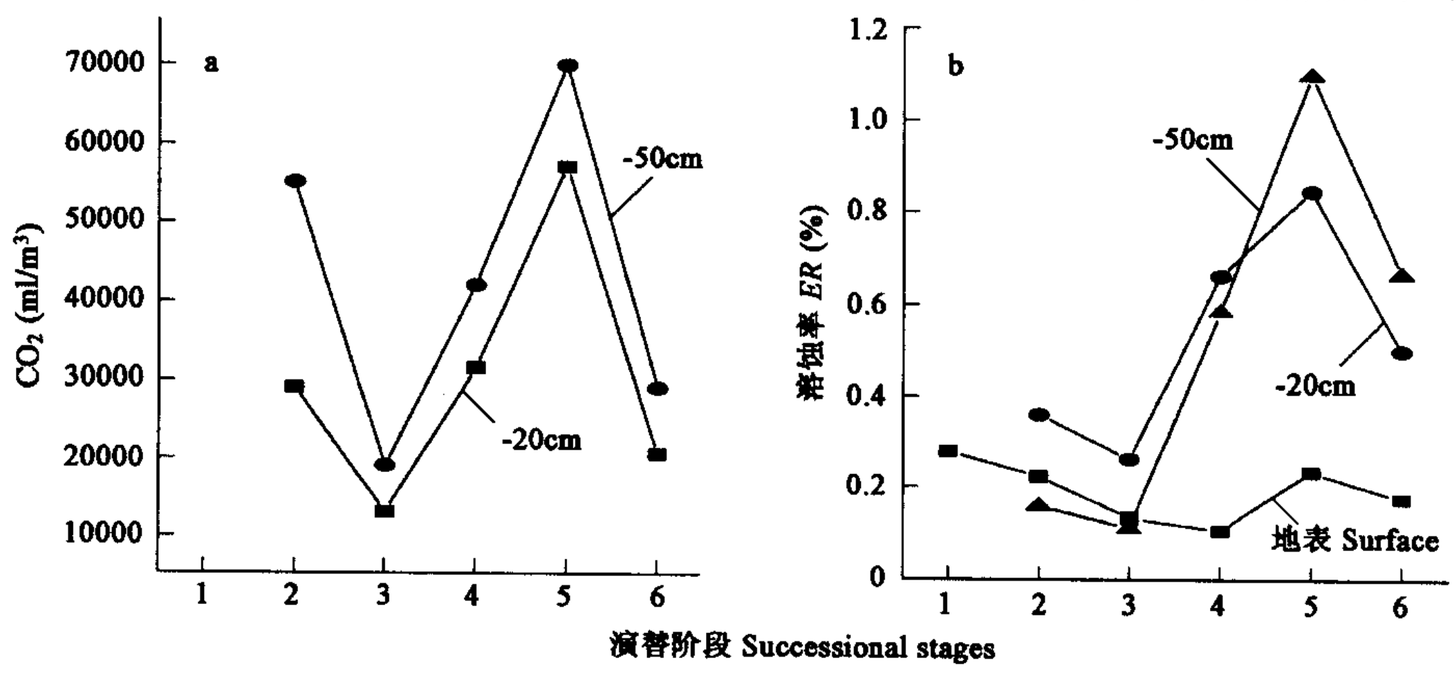

图3 不同演替阶段的土壤 CO_2(埋试片前，8月31日)与岩石试片的溶蚀率(*ER*)

Fig. 3 The soil CO_2(before bury tablets, Aug. 31)and the Erosion Ratios(*ER*) at different stages

万方数据

和溶蚀率都低,原因可能是此样地植被较差,接受太阳辐射较多,又有较大的坡度,地表蒸发强烈,不利水分的保持,不利于植物和微生物的生长。而在较干旱的季节(8.31 和 11.6)也发现土壤特别干燥,11 月 6 日还发现有的草本已近枯死。

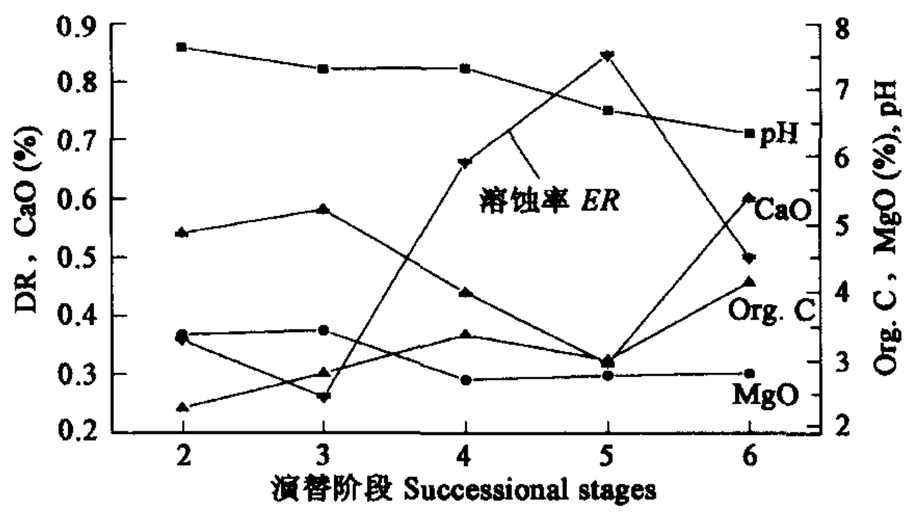

图 4　−20cm 处试片溶蚀率(*ER*)与 A 层土壤的有机碳、Ca、Mg 含量间的关系

Fig. 4　The comparison between Erosion Ratio at −20cm and the content of Org. C, Ca, Mg in layer A

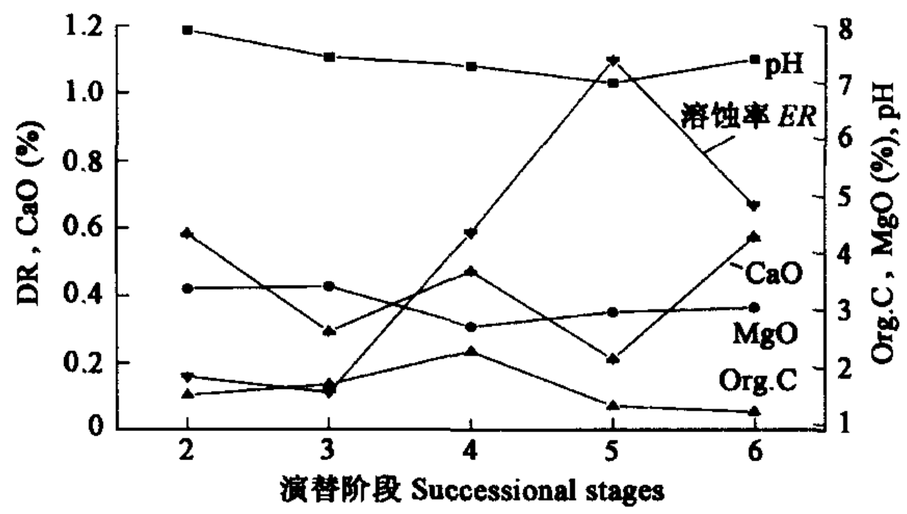

图 5　−50cm 处试片溶蚀率(*ER*)与 B 层土壤的有机碳、Ca、Mg 含量间的关系

Fig. 5　The comparison between Erosion Ratio at −20cm and the content of Org. C, Ca, Mg in layer B

2.3.2　溶蚀率与环境中 Ca、Mg 的含量同样关系密切[15]　从溶蚀率与土壤 Ca 含量看(图 4、图 5),−20cm 处两者呈明显的负相关;−50cm 处也呈负相关,只在草灌丛处不太相符,而此时 Mg 的含量较高。溶蚀率与土壤 Mg 含量的负相关性也很明显。总之,环境中 Ca、Mg 含量与溶蚀率呈显著的负相关,两者都强烈地影响着岩溶作用。

2.3.3　溶蚀率明显受有机质、pH 值变化的影响　伴随植被正向演替土壤有机质增加,pH 值下降,岩石的溶蚀率升高。森林土壤中有机质随土壤加深而急剧减少,但森林增加了物质循环的能力,森林大量吸收物质也使得溶蚀率有所提高。青冈林中溶蚀率较高,土壤剖面中 Ca、Mg 含量也高,从侧面说明青冈可促进 Ca、Mg 的循环和迁移,青冈灰分中 Ca、Mg 含量较高,这与青冈能成为岩溶区的一种重要的优势种[17]是相符的。从图 4、图 5 中可看出,土壤有机碳与溶蚀率呈正相关,pH 值与溶蚀率呈负相关。说明植被改善为土壤带来了更多的有机质,有机质的分解有产生更多的 CO_2 和有机酸[18],植物根系呼吸及根系分泌许多有机酸[19],使土壤的 pH 值降低,大大地促进了岩溶作用[20]。

2.3.4　植被影响水分的运移和物质循环　植被正向演替可减少地表径流,增强水的下渗,加强蒸腾作用[12]等,加强物质在岩石圈、生物圈、大气圈间的循环。循环功能的增强,并不一定表现出土壤水分和孔隙度的增加,但却会促进物质的迁移和岩溶作用的进行。

根据岩溶动力学原理[21],岩溶动力系统主要由碳酸盐岩($CaCO_3$)-CO_2(气)-水(H_2O)三相组成,岩溶动力系统处于三相动态不平衡中。生物是岩溶作用中最活跃的因素,它以多种方式影响着岩溶作用的进行,如直接附着吸收,产生 CO_2、分泌有机酸、调节小气候等,从而改变岩溶作用的理化环境促进岩溶作用。植被又是生物中最重要的因素,植被的存在营造了小环境,为其他生物的生存创造了条件,如适宜的温度、水分,氧气,营养来源等。岩溶作用与水分、CO_2 具有密切的关系,充足的水分、高 CO_2浓度会促进岩溶。植被的存在促进了物质在圈层间的循环,植被的演替改变了岩溶动力系统的三相条件,使其朝岩石溶解方向发展,出现新的不平衡。

岩石试片的溶蚀率是多种因素影响的结果。地表溶蚀率在裸岩阶段最高,然后下降,到乔林期又上升,其原因是裸岩表面雨水的溅蚀作用和径流的溶蚀作用相当大①,温差变幅大促进物理风化,利于溶蚀有关;随植被的演替,雨水的溅蚀作用和径流减弱,溶蚀率降低,而乔林阶段的地表溶蚀率高与森林的酸性淋溶作用[22]强有关。因试验的时间是当地的主要降雨季节,所以在演替初期占有相当的比重,但降雨持续时间有限,故总体上地表溶蚀率较低。从土壤中的溶蚀作用看,上层 pH 值低利于溶蚀;下层的 CO_2 浓度高利于溶蚀;植被促进水分、CO_2 和其它物质的转化及运移,促进溶蚀。在草丛、草灌丛和灌丛阶段,植被的影响主要在表层,而对较深层的影响小,所以−20cm 处的溶蚀率最高;到乔林阶段植被对深层溶蚀率的影响加强超过了对表层的影响,所以−50cm 处的溶蚀率最高。从图 3b 中可以看出,随植被的改善−50cm 处的溶蚀率所占的比例逐渐增加,地表溶蚀率所占比例逐渐下降。

3　结论

随正向演替的进展主要土壤因子和溶蚀作用会发生如下变化:

① 见蒋忠诚博士论文:峰丛石山的岩溶作用及生态环境元素迁移典型研究

万方数据

(1) 植被演替对土壤表层和深层的物理性质的影响不同,不能简单的用改善来说明。土壤表层的土壤容重有降低的趋势;深层的容重在演替初期有降低的趋势,而到乔林阶段后容重增加,土壤致密;土壤孔隙度的变化与容重相反;土壤含水量与土壤孔隙度变化一致。

(2) 土壤有机碳和pH值的变化很有规律 土壤有机碳在A层增加趋势明显;B层的变化与土壤孔隙度、含水量一致,初期增加,而森林阶段明显降低。土壤pH值在上、下层都明显降低。

(3) 土壤Ca、Mg元素活化、迁移各具特点 Ca的迁移速率明显大于Mg的迁移率,且各自表现出不同的特点。Mg随演替的进展迁移率增加,含量降低;Ca则由于植被和水分运移的影响,出现反复的脱钙和复钙,而表现出复杂的特征。

(4) 土壤CO_2的变化更加复杂,表层CO_2随演替明显增加,但当孔隙度很大时有利于CO_2的逸出而大大降低;深层CO_2与土壤孔隙度、含水量一致,初期增加,而乔林期明显下降。

(5) 岩石的溶蚀率是多种因素影响的结果。地表的溶蚀率普遍较低,但在演替初期占有相当大的比例。土壤中的溶蚀率随正向演替而有所增加,与同一深度的CO_2浓度成正比;演替初期土壤表层的溶蚀率较高,演替后期深层的溶蚀率较高,说明演替进展可促进土壤的潜蚀作用[18]。溶蚀率与土壤中Ca、Mg含量成反比;随pH值的降低而增加;随A层有机碳的增加而增加。植被正向演替促进了岩溶作用,加速了岩石的风化和土壤的形成。

References:

[1] Provincial Records Compilatory Committee of Guangxi ed. General Records of Guangxi——Karst Records. Nanning: People's Press of Guangxi, 2000. 1.

[2] He S Y, Pan G X, Cao J H, *et al.* Research on properties of carbon cycle in epi-Karst ecological system. *Quaternary Sciences*, 2000, **20**(4):383~390.

[3] Cao J H, Yuan D X, Pan G X, *et al.* Preliminary study on biological action in Karst dynamic system. *Earth Science Frontiers*, 2001, **8**(3): 203~209.

[4] Jiang Z C. Rehabilitation of ecology and optimization of eco-agricultural structure in karst peak cluster area in Nongla of Guangxi. *Guangxi Sciences*, 2001, **8**(4):308~312.

[5] Su Z M. The classified system of natural vegetation in Guangxi. *Guihaia*, 1998, **18**(3):237~246.

[6] Zheng Z W ed. *Summary of Mulun Karst forest.* Beijing: science Press, 1999. 2~4.

[7] Su Z M, Li X K. The types of natural vegetation in Karst region of Guangxi and its classified system. *Guihaia*, 2003, **23**(4)289~293.

[8] Institute of Soil Science, CAS, Nanjing. *Mensuration to soil physical characteristics.* Beijing: Science Press, 1978. 35~56.

[9] Yuan D X. *Karst Environmental Science.* Chongqing: Chongqing Press, 1988. 62.

[10] Xu S Y, He S Y. The CO_2 regime of soil profile and its drive to dissolution of carbonate rock. *Carsologica Sinica*, 1996, **15**(1-2):50~57.

[11] Zhang Q F, You W H, Song Y C. Influence of plant community on soil physical properties in Tiantong Forest Park, Zhejiang Province. *Journal of Plant Resources and Environment*, 1997, **6**(2):36~40.

[12] Zhan F R, *et al.* *Genesis and Taxology of Soil.* Beijing: Beijing University Press, 1992. 12, 15.

[13] Wang W, Guo J X. Contribution of CO_2 emission from soil respiration and from litter decomposition in *Lymus chinensis* community in northeast Songnen Grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(5):655~660.

[14] Wei Q P, Cheng H Z, Wu Z D, *et al.* The geo-chemical properties of Karst-soil in Guangxi Longgang National Nature Reserve. *Acta Pedologica Sinica*, 1983, **20**(1):30~41.

[15] Jiang Z C. Element migration of Karst dynamic system. *Acta Geographic Sinica*, 1999, **54**(5):438~444.

[16] He S Y, Xu S Y, Zhang M L. Observation on soil CO_2 concentration, hydrochemistry, and their relationship with Karst processes. *Carsologica Sinica*, 1997, **16**(4):319~324.

[17] Hou X Y. *Geographical pattern of vegetation and the chemical component of its dominant vegetable in China.* Beijing: Science Press, 1982. 320.

[18] Ren M E, Liu Z Z, ed. *Conspectus of Karstology.* Beijing: Commercial Press, 1983. 55, 89.

[19] Zhu G P, Shen H. A review of the study methods for root exudates. *Subtropical Plant Science*, 2002, **31**(zl):15~21.

[20] Cao J H, Pan G X, Yuan D X, *et al.* Influence of two litters on the soil organic carbon leachings and its Karst effect. *Quaternary Sciences*, 2000, **20**(4):360~366.

[21] Yuan D X. Carbon cycle and global Karst. *Quaternary Sciences*, 1993, (1):1~ 6.

[22] Zhuo X F ed. *Forest and eco-environment in China.* Beijing: Chinese Forestry Press, 1999. 116~147.

万方数据

参考文献:

[1] 广西壮族自治区地方志编纂委员会编. 广西通志——岩溶志. 南宁:广西人民出版社,2000. 1.

[2] 何师意,潘根兴,曹建华,等. 表层岩溶生态系统碳循环特征研究. 第四纪研究,2000,**20**(4):383～390.

[3] 曹建华,袁道先,潘根兴,等. 岩溶动力系统中的生物作用机理初探. 地学前缘,2001,**8**(1):203～209.

[4] 蒋忠诚. 广西弄拉峰丛石山生态重建经验及生态农业结构优化. 广西科学,2001,**8**(4):308～312.

[5] 苏宗明. 广西天然植被类型分类系统. 广西植物,1998,**18**(3):237～246.

[6] 郑颖吴主编. 木论喀斯特林区概论. 北京:科学出版社,1999. 2～4.

[7] 苏宗明,李先琨. 广西岩溶植被类型及其分类系统. 广西植物,2003, **23**(4):289～293.

[8] 南京土壤研究所. 土壤物理性质测定法. 北京:科学出版社,1978. 35～56.

[9] 袁道先. 岩溶环境学. 重庆出版社,1988. 62

[10] 徐胜友,何师意. 碳酸盐岩土壤 CO_2的动态特征及其对溶蚀作用的驱动. 中国岩溶,1996,**15**(1-2):50～57.

[11] 张庆费,由文辉,宋永昌. 浙江天童森林公园植物群落演替对土壤物理性质的影响. 植物资源与环境,1997,**6**(2):36～40.

[12] 张凤荣,等. 土壤发生与分类学. 北京:北京大学出版,1992. 12,15.

[13] 王娓,郭继勋. 东北松嫩平原羊草群落的土壤呼吸与枯枝落叶分解释放 CO_2 贡献. 生态学报,2002,**22**(5):655～660.

[14] 韦启璠,陈鸿昭,吴志东,等. 广西弄岗自然保护区石灰土的地球化学特征. 土壤学报,1983,**20**(1):30～41.

[15] 蒋忠诚. 岩溶动力系统中的元素迁移. 地理学报,1999,**54**(5):438～444.

[16] 何师意,徐胜友,张美良. 岩溶土壤中 CO_2 浓度、水化学观测及其与岩溶作用关系. 中国岩溶,1997,**16**(4):319～324.

[17] 侯学煜. 中国植被地理及其优势植物化学成分. 北京:科学出版社,1982. 320.

[18] 任美锷,刘振中主编. 岩溶学概论. 北京: 商务印书馆出版. 1983. 55,89.

[19] 朱国鹏,沈宏. 根系分泌物研究方法. 亚热带植物科学,2002 ,31(增刊 1):15～21.

[20] 曹建华,潘根兴,袁道先,等. 不同植物凋落物对土壤有机酸淋失的影响及岩溶意义. 第四纪研究,2000,**20**(4):360～366.

[21] 袁道先. 碳循环与全球岩溶. 第四纪研究 ,1993, (1):1～6.

[22] 周晓峰主编. 中国森林与生态环境. 北京:中国林业出版社,1999. 116～147.

万方数据