

典型岩溶区域主要土壤类型分布特征与表层土壤保有量估算*

涂成龙^{1**} 张玉彪² 刘丛强¹ 李龙波¹ 陆晓辉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, 贵阳 550002; ²贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001)

摘要 在我国西南岩溶区域, 土壤受地质和地形条件的影响程度较深, 表现出强烈的非均一性; 且在不同地质地形条件下, 缺乏具体的量化参照系数, 致使对土壤元素库容等方面的估算存在较大偏差。据此, 本研究基于对贵阳市乌当区实地考察结果, 归纳确立土壤在不同地质与地形下的分布特征, 修正了现有的土壤图。利用地形图提取区域的坡度信息, 再与土壤图和地质图进行叠加, 乘以相应类型条件下土壤的经验系数, 估算区域主要土壤类型表层 (≤ 1 m) 土壤的保有量。结果表明, 乌当区境内坡度 $> 35^\circ$ 的碳酸盐岩地区无黄壤分布; 石灰土的覆盖率和土壤剖面深度随坡度的增加, 呈下降趋势, 但连续性石灰岩分布区的石灰土变异程度较大; 该区表层土壤 (≤ 1 m) 保有量约为 65656 万 t, 主要集中在 $0^\circ \sim 15^\circ$ 碳酸盐岩分布区, 且黄壤占 50% 以上。

关键词 分布特征; 面积; 深度; 保有量; 岩溶区域

中图分类号 S155 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2012)3-0620-06

Distribution characteristics and surface soil-retaining amount of main soil types in typical Karst region. TU Cheng-long^{1**}, ZHANG Yu-biao², LIU Cong-qiang¹, LI Long-bo¹, LU Xiao-hui² (¹State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; ²School of Geographic and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(3): 620-625.

Abstract: Due to the great effects of geology and topography, the soils in Karst region of Southwest China present a distinct spatial heterogeneity, and under the conditions of different geology and topography, the soil nutrient pools were over- or underestimated because of the lack of quantitative parameters. Based on the field investigations in Wudang district of Guiyang City of Guizhou Province, the distribution characteristics of the soils in the district under different geologic and topographic conditions were summed up, the present soil maps were emended, and, by the spatial overlapping of soil maps, geological maps, and topographical maps and by multiplying the empirical coefficients of the soils under corresponding conditions, the surface soil (≤ 1 m) retaining amount of the main soil types in the district was estimated. Within the Wudang district, no yellow soil was distributed on the slopes $> 35^\circ$. The coverage rate and profile depth of limestone soil presented a decreasing trend with the increase of slope degree, but the variance of the limestone soil in limestone region was very high. In the district, the surface soil-retaining amount was about 656.56 million ton, mainly distributed on the $0^\circ - 15^\circ$ slopes, and yellow soil occupied over half.

Key words: distribution characteristics; area; depth; retaining amount; Karst region.

* 国家自然科学基金项目(41003009)、中国科学院西部之光项目和贵州省科学技术基金项目(黔科合J字[2008]2243号)资助。

** 通讯作者 E-mail: chenglongtu@163.com

收稿日期: 2011-07-04 接受日期: 2011-11-23

我国西南岩溶地区是以贵州为中心,具有碳酸盐岩等可溶性岩石广为分布的地质背景,并在水作用下形成具有独特地貌景观的地区,面积达 111.6 万 km^2 (吴应科,1998)。该地区碳酸盐岩的分布表现为裸露、埋藏(埋藏于非可溶岩之下)、覆盖(上覆第四纪土层),或与其他非可溶性岩石形成夹层、互层等。其自然地理环境具有复杂性和特殊性的特点,但土壤在地理上的分布既与生物气候条件相耦合,表现为广域性的水平分布规律和山地垂直分布规律,又与区域性的母质(母岩)、地形地貌、水文地质等条件相适应,表现为中域或微域分布规律,且水平地带性与垂直地带性相互叠加,地带性与非地带性土壤相互镶嵌、相互交错(贵州省土壤普查办公室,1994)。因此,其土壤类型的地理分布表现出多样性和交错性,以及地理界线的模糊性。此外,受区域性地质和地形条件,以及强降雨过程的影响,岩溶区域土壤形成的速度极其缓慢(袁道先和蔡桂鸿,1988;韦启璠,1996;柴宗新,2000),且伴有频繁的土粒迁移现象(冯志刚,2007),使得坡面大面积岩石裸露,而土粒则聚集于岩溶裂隙和溶沟等负地形内,或在岩溶洼地或低丘地带形成深厚土层。土壤分布的这些特异性在裸露型碳酸盐岩,以及地表起伏较大的区域表现得尤为突出,并以贵州省最为典型(曹建华等,2003;李阳兵等,2004)。

我国西南岩溶区土壤类型的多样性和异质性,以及土壤分布的特异性,使得我们在估算岩溶地区土壤的分布面积、土层厚度以及土壤的保有量时容易产生较大的误差(王绍强和朱松丽,2000;解宪丽等,2004),从而无法正确认识岩溶区土壤的生态容量,以及土壤在整个生态系统中的作用。基于此,本文以贵州中部贵阳市的乌当区为研究区域,充分观察土壤的分布、土层厚度以及土壤的基本性状与土壤类型、地质地貌的相互关系,估算喀斯特区域表层土壤($\leq 1\text{ m}$)的保有量。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区位于贵州省中部的贵阳市乌当区($106^{\circ}43'15''\text{N}$ — $107^{\circ}03'45''\text{N}$; $26^{\circ}32'30''\text{E}$ — $26^{\circ}55'00''\text{E}$),海拔多在 1100~1400 m,总面积 962.4 km^2 。该区属亚热带季风气候,冬无严寒,夏无酷暑,光水热同季,雨量充沛;因地势北高南低,起伏变化大,垂直气候差异明显。碳酸盐岩广为分布,并与碎屑岩相间

分布,构成了典型的岩溶地貌特征。区内洼地、峰林谷地和峰丛洼地等组合形态广泛分布,还有大量岩溶漏斗出现。岩溶区面积占该区土地总面积的 90.6%,其中 80% 为出露型岩溶区。地貌类型以中山、低中山、高丘、浅丘和缓丘为主,其中山地面积约占总面积的 53.1%,丘陵面积占总面积的 40.1%。地带性土壤为黄壤,镶嵌分布着非地带性的石灰土、紫色土、水稻土、潮土和沼泽土,共 6 个土类,18 个亚类(乌当区综合农业区划编写组,1989)。从现有的土壤图上反映的信息可知,黄壤、石灰土和水稻土面积分别占土壤总面积的 60.8%、24.1% 和 13.6%,为该区域的主要土壤类型(乌当区综合农业区划编写组,1989)。

1.2 研究方法

在研究区域内选取 43 个制高点进行目测估算(共计观察 114 个区域)。前期 12 个观察点采用丈量计算,同时结合现有的遥感影像石漠化分布成果图进行校正(图 1),观察土壤的分布情况与区域地质地貌和地形条件的相互关系,并依据实际的考察结果对现有的土壤图和地质图(1:250000)(《乌当区综合农业区划》编写组,1989)进行同类归并,以及重新确立不同土壤类型的边界。运用 ArcView GIS 3.3 软件,从乌当区 1:50000 的地形图中提取坡度信息,将该区域的坡度条件分成 4 组(表 1),绘制乌当区坡度等级图,并与该区域的地质图和土壤图(1:250000)(《乌当区综合农业区划》编写组,1989)进行叠加。最后根据实际观测的土壤分布与坡度、土壤类型和地质的相互关系计算土壤的分布面积和土壤的深度,并按公式(1)计算乌当区表层土壤($\leq 1\text{ m}$)的保有量。

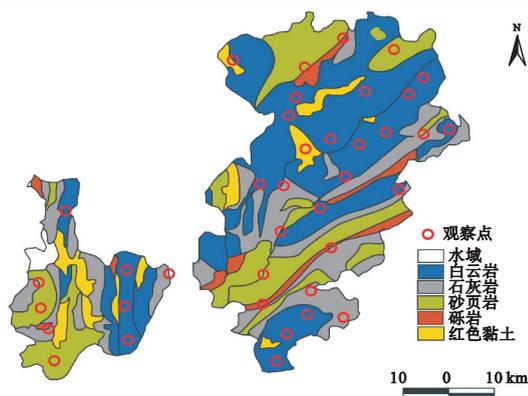


图 1 岩组分布及观察样点示意图

Fig. 1 Distribution of investigated area and rock association in Wudang County

$$W = \sum_{i=1}^n S \times H \times D \quad (1)$$

式中: W 为土壤的保有量 ($\leq 1 \text{ m}$); n 为土壤类型种类; S 为某一特定土壤类型分布面积; H 为土壤深度; D 为土壤的容重。根据部分实测结果和《贵州土壤》(贵州省土壤普查办公室, 1994), 本研究黄壤、石灰土和水稻土的容重取值为 1.17、1.14 和 1.29 $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤的覆盖率

受地质、地貌和区域小气候条件的影响, 岩溶区域土壤呈现频繁的交错分布。通过实地观测发现, 形成黄壤的下覆基岩主要有 6 种(表 1): 连续性石灰岩、石灰岩夹层、连续性白云岩、白云岩夹层、砂页岩和红色粘土。由石灰岩发育形成的黄壤主要分布在 $0^\circ \sim 15^\circ$, 即在坡脚或坡面的缓冲地带, 以及有利于土壤堆积的山丘台地区域。而坡度 $> 15^\circ$ 的连续性石灰岩分布区域很少发现连片分布的黄壤。因此, 把 $> 15^\circ$ 的连续性石灰岩区黄壤的分布取值为 0, 其所得面积归并到石灰土部分。而灰岩夹层分布区的土壤, 由于存在大量砂岩和页岩, 这些非可溶性岩石有利于土壤的形成。因此, 在 $15^\circ \sim 35^\circ$ 出现了大量的黄壤, 但这些区域通常有部分岩石出露的情况, 其覆盖率在 70% ~ 80%。连续性白云岩区, 黄壤的分布主要集中在 $0^\circ \sim 25^\circ$ 。而白云岩夹层区在 $0^\circ \sim$

35° 均有黄壤出现, 但覆盖率相对连续性白云岩有所下降。砂岩、页岩, 以及红色粘土等发育的黄壤在各种坡度条件下均有分布。且覆盖率通常为 100%。

有碳酸盐岩分布的地方, 均有可能存在石灰土(李景阳等, 1991; 周德全等, 2005)。但是, 由于碳酸盐岩的差异性风化, 使得岩溶区域的坡面地带往往形成一些石沟、石洞、石坑等负地形(周政贤, 1987; 王世杰等, 2007)。这些负地形的存在, 使得大量土粒向这些区域退缩, 而其他区域则出现大量的岩石裸露。由表 1 可见, 随着坡度的增加, 石灰土的覆盖率有下降趋势(特别是连续性石灰岩分布地区)。此外, 白云岩的差异性风化没有石灰岩明显, 土被通常较为连续, 且较其他岩类发育的石灰岩覆盖率高, 但较为浅薄。

水稻土的分布受到强烈的人为活动影响, 并受地质地貌条件的限制。通过观察发现, 在这 6 种岩组(表 1)条件下均有水稻土的分布。但在连续性的石灰岩或者白云岩区, 坡度 $> 15^\circ$ 时, 由于土壤极其浅薄, 几乎未观察到水稻土的存在。而在砂页岩和红色粘土区, 只要有灌溉条件, 均有梯化形成的水稻土分布。

2.2 土壤的面积

目前, 获取土壤的分布面积最直接的方式就是丈量各种图件。然而, 在岩溶区域, 由于土壤在小区域内受地质地形条件的影响, 表现出强烈的相互交错现象, 已有的土壤图等图件难以在客观上反映土

表 1 主要土壤类型的分布状况与岩性和坡度的相互关系

Table 1 Relationship between soil and slope, lithology

土壤类型	岩组类型	$0^\circ \sim 15^\circ$			$15^\circ \sim 25^\circ$			$25^\circ \sim 35^\circ$			$> 35^\circ$		
		观察点数	mean \pm SD	CV (%)	观察点(n)	mean \pm SD	CV (%)	观察点数	mean \pm SD	CV (%)	观察点数	mean \pm SD	CV (%)
黄壤	石灰岩	6	95 \pm 3	4	0	00	0	0	0	0	0	0	0
	灰岩夹层	4	76 \pm 12	16	5	77 \pm 24	33	4	71 \pm 23	34	0	00	
	白云岩	8	92 \pm 4	5	6	86 \pm 2	6	0	00	0	0	0	
	白云岩夹层	10	87 \pm 9	10	8	78 \pm 14	19	7	67 \pm 18	27	0	00	
	砂岩或页岩	4	100	0	6	100	0	3	100	0	2	100	0
	红色粘土	8	100	0	8	100	0	4	100	0	0	0	0
石灰土	石灰岩	9	61 \pm 15	25	9	49 \pm 12	25	6	43 \pm 10	24	10	31 \pm 6	19
	灰岩夹层	5	77 \pm 3	10	5	47 \pm 8	16	5	50 \pm 8	16	5	46 \pm 6	14
	白云岩	10	87 \pm 8	10	8	90 \pm 8	9	8	85 \pm 10	12	6	82 \pm 7	8
	白云岩夹层	9	82 \pm 12	15	6	74 \pm 7	6	6	72 \pm 9	12	7	72 \pm 9	13
水稻土	石灰岩	8	97 \pm 3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	灰岩夹层	4	95 \pm 2	3	按照石灰土的分布面积进行计算								
	白云岩	7	96 \pm 2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	白云岩夹层	6	85 \pm 30	35	按照石灰土的分布面积进行计算								
	砂岩或页岩	8	100	0	3	100	0	3	100	0	2	100	0
红色粘土	8	100	0	6	100	0	1	100	0	1	100	0	

壤的实际分布情况。此外,在这些区域,受人为或自然因素的影响还有大量的岩石裸露现象(有些表现为“石漠化”现象),使得土壤分布面积进一步减少,最终导致计算结果产生较大的误差。因此,为了客观获取土壤的分布面积,需准确把握土壤分布的规律。基于此,本研究在归纳土壤覆盖率与地质和地形条件的相互关系的基础上,利用地理信息系统应用软件 ArcView,分别提取不同条件下土壤的分布面积。同时根据实际观察的结果,对土壤面积进行更正或归并(如 $>15^\circ$ 连续性石灰岩分布区的黄壤更正为石灰土),结果列于表2。为了便于比较,把土壤在不同条件下的面积份额绘图(图2和图3)。由表2、图2和图3可知,黄壤主要集中分布在 $0^\circ \sim 15^\circ$ 的坝地、坡脚平缓区域等,约占黄壤分布面积66%。而砂岩或页岩或白云岩夹层区域的黄壤分布面积较广,约占黄壤分布面积的50%,而发育于石灰岩区的黄壤面积最小,仅占10%。石灰土的分布主要受碳酸盐岩岩性控制。因此,其与此4类碳酸盐岩(石灰岩、灰岩夹层、白云岩和白云岩夹层)的分布面积有很好的相关性(表2)。另外,根据石灰

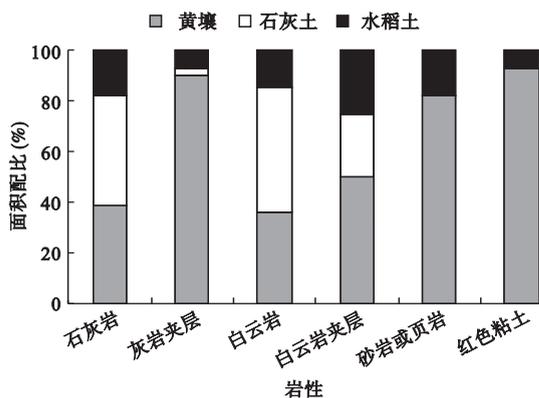


图2 不同岩性发育土壤的面积配比

Fig.2 Soil proportion under different rock association

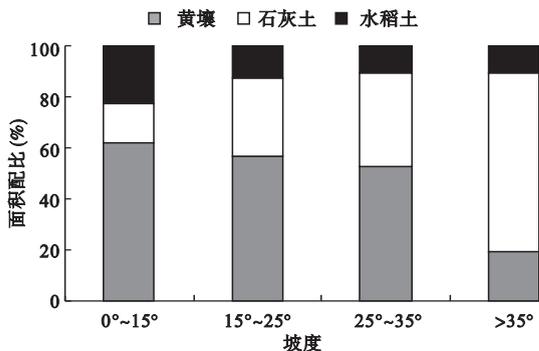


图3 不同坡度条件下土壤的面积配比

Fig.3 Soil proportion under different slopes

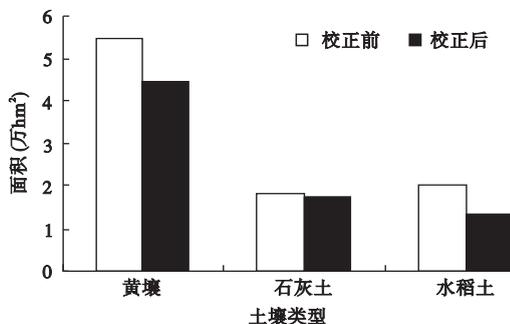


图4 校正前后土壤面积变化

Fig.4 Change of soil areas after correction

土在不同坡度条件下的分配比例,发现石灰土在各种坡度条件下的分布面积相差较小。水稻土则主要分布在白云岩夹层区,且主要集中分布在 $0^\circ \sim 15^\circ$ 。通过对土壤面积的校正,黄壤的面积变化较大,但其比例变化并不大,而水稻土和石灰土的比例则出现相应缩小和扩大(图4)。

2.3 土壤的剖面深度

在某种程度上,土壤的剖面深度能够反映土壤的发育程度。按照土壤发生学的观点,土壤主要受母质(岩)、气候、植被、地形和成土年龄五大成土因素控制。其中,在大区域尺度下,以水热差异为主的气候条件是土壤地带性分布的决定因素(黄昌勇,2000)。而在小区域尺度上,地形和成土母质以及成土年龄对土壤的控制表现得较为显著,特别是在我国西南以山地地貌为主的岩溶地区表现得更为突出。根据观察(表3),除由红色粘土形成黄壤的深度均 $>100\text{cm}$ 外,其他岩组所形成的黄壤深度通常

表2 主要土壤类型的分布面积 (hm^2)

Table 2 Area of the main types of soil in Wudang County

土壤类型	岩组类型	$0^\circ \sim 15^\circ$	$15^\circ \sim 25^\circ$	$25^\circ \sim 35^\circ$	$>35^\circ$
黄壤	石灰岩	4334±137	0	0	0
	灰岩夹层	4625±730	273±85	1306±423	0
	白云岩	3766±164	1671±47	0	0
	白云岩夹层	6391±661	2442±438	1414±280	0
	砂岩或页岩	5761	2447	2065	906
	红色粘土	5645	931	549	0
石灰土	石灰岩	1369±337	2353±282	1064±248	121±6
	灰岩夹层	156±6	25±4	10±2	2
	白云岩	2651±244	900±80	2090±246	1727±126
	白云岩夹层	2197±321	881±88	572±71	1480±185
水稻土	石灰岩	2082±64	0	0	0
	灰岩夹层	411±86	71±12	32±6	16±2
	白云岩	2246±468	0	0	0
	白云岩夹层	3633±1282	898±85	482±47	246±31
	砂岩或页岩	1084	693	519	229
红色粘土	379	116	67	30	

表3 土层深度(≤100 cm)与岩性和坡度的相互关系

Table 3 Relationship between soil depth (≤100 cm) and slope, lithology

土壤类型	岩组类型	0° ~ 15°		15° ~ 25°		25° ~ 35°		>35°	
		n	mean±SD	n	mean±SD	n	mean±SD	n	mean±SD
黄壤	石灰岩	5	76±17	0	0	0	0	0	0
	灰岩夹层	5	69±21	3	59±8	3	47±9	0	0
	白云岩	8	79±18	6	62±7	0	0	0	0
	白云岩夹层	5	81±12	8	76±26	4	45±12	6	49±27
	砂岩或页岩	4	81±19	4	71±30	4	57±30	0	0
	红色粘土	4	100		3100		3100		00
石灰土	石灰岩	7	70±26	7	51±25	6	49±26	10	32±11
	灰岩夹层	5	76±16	5	67±24	5	35±8	4	35±19
	白云岩	8	51±21	4	34±7	6	28±8	7	21±24
	白云岩夹层	8	68±24	5	35±8	6	28±11	6	28±25
水稻土	石灰岩 ^②	3	100	0	0	0	0	0	0
	灰岩夹层	6	100	80		80		80	
	白云岩 ^③	9	100	0	0	0	0	0	0
	白云岩夹层	6	100		80		80		80
	砂岩或页岩	4	100	0	100	0	100	0	100
	红色粘土	2	100	0	100	0	100	0	100

<1 m,且随着坡度的增加,土壤有变薄的趋势。石灰土土层的深度同样有随着坡度增加而逐渐变薄的趋势,但其变异程度较大。如在低洼堆积区域,可以挖掘到1.5 m以上的土壤剖面,30~50 cm的土层常有出现。水稻土的剖面深度一般均>1 m,但在一些碳酸盐岩夹层地带,坡度较大的梯田,土层相对较为浅薄,未进行详细的调查,根据对农户的调查结果,取值为80 cm。

2.4 表层土壤(≤1 m)保有量的估算

土壤的保有量在某种程度反映了一个区域的生态承载能力,以及对污染物的容忍限度(曹志平,2007)。因此,已有研究主要通过估算表层(≤1 m)

土壤保有量,计算土壤生源要素(碳、氮、磷等)的储量,与大气圈和水圈的交换通量,以及土壤最大的生物支撑能力(Chen & Chiu,2000)。准确估算表层土壤保有量的关键是对区域土壤分布规律进行详细分析(Ogle *et al.*,2003)。基于此,本研究应用公式(1)估算了乌当区表层土壤的保有量(表4)。由表4可见,乌当区表层土壤保有量共计65656万t,其中,黄壤39366万t,石灰土8938万t,水稻土16621万t,分别占该区表层土壤保有量的60%、14%和25%。除>35°坡度无黄壤分布外。在其他坡度黄壤的保有量均为最大。而该区域不同土壤的累积数量也是黄壤最大。此外,尽管乌当区0°~15°的

表4 乌当区表层土壤(≤1 m)保有量(t)

Table 4 Amount of surface soil (≤1 m) in Wudang County

土壤类型	岩组类型	0° ~ 15°	15° ~ 25°	25° ~ 35°	>35°
黄壤	石灰岩	38537928	0	0	0
	灰岩夹层	37337625	1884519	7181694	0
	白云岩	34809138	12121434	0	0
	白云岩夹层	60567507	21714264	7444710	0
	砂岩或页岩	54596997	20327229	13771485	0
	红色粘土	66046500	10892700	6423300	0
石灰土	石灰岩	10924620	13680342	5943504	441408
	灰岩夹层	1351584	190950	39900	7980
	白云岩	15412914	3488400	6671280	4134438
	白云岩夹层	17031144	3515190	1825824	4724160
水稻土	石灰岩	26857800	0	0	0
	灰岩夹层	5301900	732720	330240	165120
	白云岩	28973400	0	0	0
	白云岩夹层	46865700	9267360	4974240	2538720
	砂岩或页岩	13983600	8939700	6695100	2954100
	红色粘土	4889100	1496400	864300	387000

土地面积仅约占该区土地总面积的 51%,土壤的分布面积约为土壤总面积的 61%,但表层土壤的总量占该区域土壤总量的 71%。

3 结 论

除砂岩(或页岩)或红色粘土区的黄壤外,随坡度的增加,黄壤和石灰土的覆盖率均有所下降,但石灰土的变异程度较大。在坡度 $>35^\circ$ 的碳酸盐岩地区(含连续性石灰岩、白云岩、灰岩夹层和白云岩夹层分布区),没有黄壤分布。白云岩及白云岩夹层地区发育的土壤覆盖率通常较高,但土层相对浅薄。

除由红色粘土形成黄壤的深度均 >1 m 外,其他岩组所形成的黄壤深度通常 <1 m,且随着坡度的增加,土壤有变薄的趋势。石灰土表层的深度亦有随着坡度增加逐渐变薄的趋势,但其变异程度较大。

乌当区 $0^\circ \sim 15^\circ$ 的土地面积约占该区土地总面积的 51%,土壤的分布面积约为土壤总面积的 61%,但表层土壤(≤ 1 m)的总量占该区土壤总量的 71%。乌当区表层土壤(≤ 1 m)保有量共计 65656 万 t。除坡度 $>35^\circ$ 条件下,没有黄壤分布外,其他任何坡度黄壤的保有量均为最大。

参考文献

- 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.
- 曹志平. 2007. 土壤生态学. 北京: 化学工业出版社.
- 柴宗新. 2000. 西南地区生态环境建设的科技工程. 山地学报, **18**(5): 396-398.
- 冯志刚,王世杰,刘秀明,等. 2007. 微地域搬运——碳酸盐岩红色风化壳形成过程的一种方式. 地质学报, **81**(1): 127-138.
- 贵州省土壤普查办公室. 1994. 贵州土壤. 贵阳: 贵州科技

出版社.

- 黄昌勇. 2000. 土壤学. 北京: 中国农业出版社.
- 解宪丽,孙波,周慧珍,等. 2004. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析. 土壤学报, **41**(1): 35-43.
- 李景阳,王朝富,樊廷章. 1991. 试论碳酸盐岩与喀斯特成土作用. 中国岩溶, **10**(1): 29-38.
- 李阳兵,王世杰,李瑞玲. 2004. 岩溶生态系统的土壤. 生态环境, **13**(3): 434-438.
- 王绍强,朱松丽. 2000. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. 地理学报, **55**(5): 533-544.
- 王世杰,卢红梅,周运超,等. 2007. 茂兰喀斯特原始森林土壤有机碳的空间变异性与代表性土样采集方法. 土壤学报, **34**(3): 475-483.
- 韦启璠. 1996. 我国南方喀斯特区土壤侵蚀特点及防治途径. 水土保持研究, **3**(4): 72-76.
- 乌当区综合农业区划编写组. 1989. 乌当区综合农业区划. 贵阳: 贵州省人民出版社.
- 吴应科. 1998. 西南岩溶区岩溶基本特征与资源环境、社会、经济综述. 中国岩溶, **17**(2): 141-150.
- 袁道先,蔡桂鸿. 1988. 岩溶环境学. 重庆: 重庆出版社.
- 周德全,王世杰,刘秀明. 2005. 石灰土(碳酸盐岩风化壳)形成地球化学过程研究. 地球与环境, **33**(2): 31-38.
- 周政贤. 1987. 茂兰喀斯特森林科学考察集. 贵阳: 贵州人民出版社.
- Chen JS, Chiu CY. 2000. Effect of topography on the composition of soil organic substances in a perhumid sub-tropical montane forest ecosystem in Taiwan. *Geoderma*, **96**: 19-30.
- Ogle SM, Breidt FJ, Eve MD, *et al.* 2003. Uncertainty in estimating land use and management impacts on soil organic carbon storage for US agricultural lands between 1982 and 1997. *Global Change Biology*, **9**: 1521-1542.

作者简介 涂成龙,男,1978年生,副研究员,主要从事土壤环境地球化学研究。E-mail: chenglongtu@163.com
责任编辑 魏中青