

第五章 喀斯特山区土地利用变化 对生态服务的影响

第一节 喀斯特生态系统服务功能评估

利用 InVEST 模型评估喀斯特山区 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年和 2010 年的产水量、土壤保持、碳储量和营养截留量 4 项生态服务功能,分析喀斯特山区 1990—2010 年生态服务功能的时空变化情况。

一、喀斯特山区生态服务时空变化

(一)产水量的时空变化

水源供给是最重要的生态服务功能之一,是世界上应用最广泛的可再生资源,区域的产水量对人类生产生活与社会经济可持续发展有重要影响,区域产水量受土地利用变化和气候变化的共同影响。1990—2010 年,喀斯特山区产水量在空间上的分布情况和降雨量的分布情况一致,有由西北向东南方向递增的特征(图 5-1),产水量为 200~1900mm。

1990—2010 年,喀斯特山区产水量变化情况复杂。数量上,1990 年、1995 年、2000 年、2005 年和 2010 年年平均产水量分别为 992.60mm、954.52mm、986.42mm、860.51mm、968.10mm,呈波动减少的趋势。总体上,年平均产水量减少了 24.50mm (2.47%),空间上有由西北向东南方向呈条带状波动型增减。

从行政区划上看,1990 年,中部河池市和西南的百色市的年平均产水量最大,分别为 1279.06mm、1221.06mm,其次是东南部的贵港市(1176.22mm)、柳州市(1187.89mm)、来宾市(1179.07mm)和南部崇左市(1084.78mm)、南宁市(1159.52mm)在 1000~1200mm,中部黔南自治州(921.02mm)、西南部黔西南自治州(818.84mm)、东北部黔东南自治州(793.17mm)、西北部六盘水市(783.33mm)和安顺市(706.42mm)年平均产水量在 700~1000mm,东北部铜仁市、北部贵阳市、遵义市和西北部毕节市年平均产水量最小(表 5-1)。

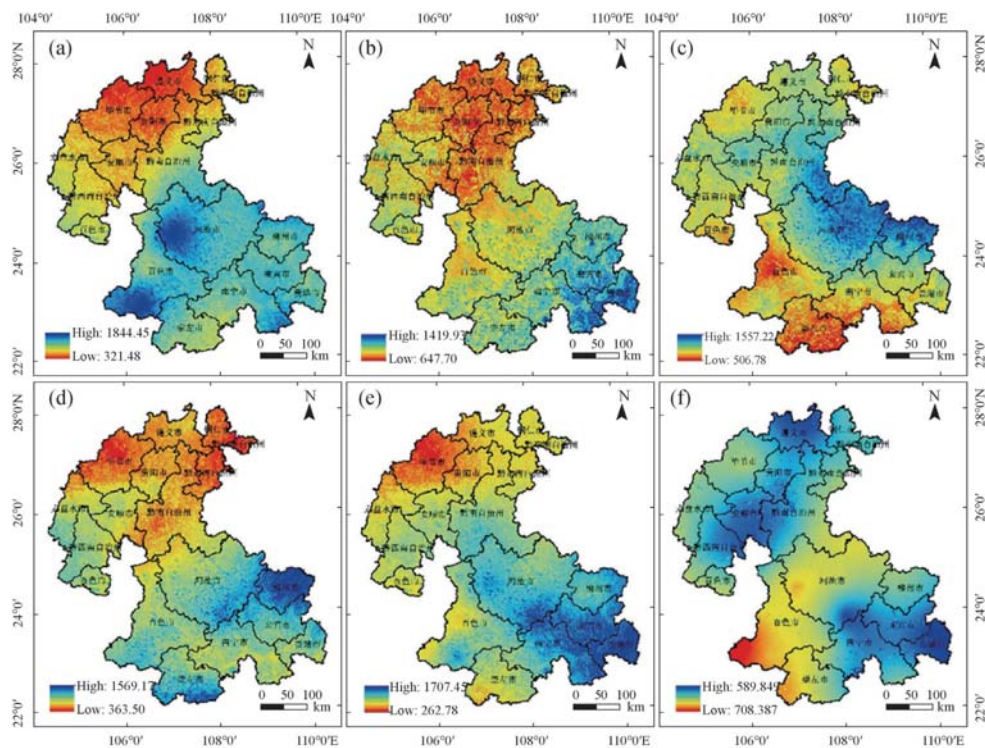


图 5-1 喀斯特山区(a)1990 年、(b)1995 年、(c)2000 年、(d)2005 年、(e)2010 年及
(f)1990—2010 产水量变化(单位:mm)

表 5-1 1990—2010 年喀斯特山区年平均产水量(mm)

	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年
安顺市	706.42	893.44	1020.86	778.68	883.46
百色市	1221.06	959.01	845.24	928.17	951.39
毕节市	558.96	860.03	908.15	579.71	513.99
崇左市	1084.78	1026.85	742.31	1058.69	868.47
贵港市	1176.22	1184.97	919.08	966.98	1449.54
贵阳市	560.92	823.57	1030.76	666.93	665.51
河池市	1279.06	962.28	1159.19	980.49	1143.17
来宾市	1179.07	1115.32	1022.75	1071.74	1340.49
柳州市	1187.89	1073.27	1228.96	1283.25	1176.36
六盘水市	783.33	943.05	974.49	820.88	749.72
南宁市	1159.52	1079.34	852.06	924.74	1251.13
黔东南自治州	793.17	849.12	1009.04	541.29	768.39

续表

	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年
黔南自治州	921.02	857.73	1101.28	677.41	937.29
黔西南自治州	818.84	953.29	938.17	893.18	896.01
铜仁市	698.24	858.81	919.80	547.99	751.15
遵义市	498.11	816.29	985.07	636.43	692.33

到 2010 年,喀斯特山区区域内各地区产水量发生了不同程度的变化,其中,东南部贵港市年平均产水量增量最大为 273.32mm(23.24%),东北部的来宾市,北部贵阳市、遵义市,西北部的安顺市增量皆在 100~200mm,分别为 161.42mm(13.69%)、104.59mm(18.65%)、194.22mm(38.99%)、177.04mm(25.06%),南部南宁市、东北部黔西南自治州、东北部铜仁市、中部黔南自治州,增量均在 0~100mm,分别为 91.62mm(7.90%)、77.17mm(9.42%)、52.19mm(7.58%)、16.27mm(1.77%)。而西南部百色市、南部崇左市减少最大,分别为 296.67mm(22.09%)、216.31mm(19.94%),其次是中部河池市,减少了 135.89mm(10.62%),西北部毕节市、六盘水市,东北部黔东南自治州,东南部柳州市减少的量均在 0~100mm,分别减少了 44.97mm(8.04%)、33.61mm(4.29%)、24.79mm(3.12%)、11.52mm(0.97%)。

(二) 土壤保持时空变化

土壤侵蚀是自然、人类活动、经济发展等因素叠加的结果,是全世界瞩目的环境问题。人类活动是造成土壤侵蚀的主要原因,同时也受气候的影响,土壤侵蚀显著减少农业生产率、增加洪水期的洪峰和污染物输移量,威胁基础设施安全、农作物收成等,土壤侵蚀还会导致下游河流泥沙淤积,缩短水利设施(如水库、防洪系统等)的使用寿命,而且还会增加水处理成本。

1990—2010 年,喀斯特山区土壤保持量在空间和时间上存在很大的差异。空间上,西北部、中部和西南部为土壤保持量的高值区,而北部、南部和东南部为土壤保持的低值区(图 5-2);时间上,喀斯特山区的年平均土壤保持量大致呈增长趋势,1990 年、1995 年、2000 年、2005 年和 2010 年年平均土壤保持量分别为 74294.7t/km²、78566.15t/km²、75842.31t/km²、101161.3t/km²、103590.2t/km²。

20 年间,喀斯特山区年平均土壤保持量增长了 29295.09t/km²(39.43%),中部和东南部坡度较大的区域土壤保持的增量最大在 40000t/km²以上,仅西北部和西南部的小部分区域出现了减少的情况,减少的量在 2000t/km²以上。

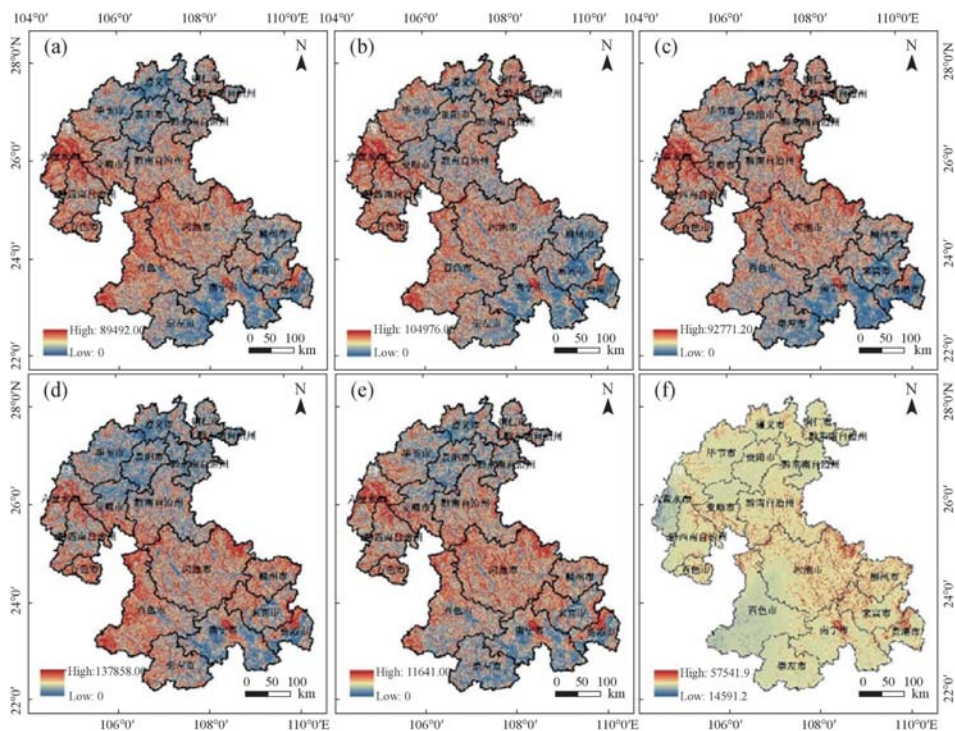


图 5-2 喀斯特山区(a)1990 年、(b)1995 年、(c)2000 年、(d)2005 年、(e)2010 年及 (f)1990—2010 土壤保持量变化(单位:t/km²)

从行政区划上看,1990 年,西北部六盘水市的年平均土壤保持量最大,为 209108.68t/km²,其次是西南部百色市(109997.92t/km²)、黔西南自治州(116408.37t/km²) 在 10 万 t/km² 以上,西北部的安顺市(84595.64t/km²)、毕节市(51293.18t/km²),东南部的贵港市(50573.72t/km²),中部地区河池市(97269.41t/km²)、黔南自治州(62679.19t/km²),东北部铜仁市(52321.81t/km²) 在 50000~100000t/km²,而南部崇左市(34062.62t/km²)、北部贵阳市(29798.22t/km²)、遵义市(27200.81t/km²),东南部柳州市(35991.48t/km²)、来宾市(47728.68t/km²)、南部南宁市(37379.91t/km²),东北部黔东南自治州(42800.33t/km²) 的年平均土壤保持量在 0~50000t/km²。

到 2010 年,喀斯特山区区域内大部分地区年平均土壤保持量均有不同程度的增长。其中,中部河池市、东南部来宾市、东南部柳州市年平均土壤保持量增量最大,均在 50000t/km² 以上,分别增加了 52686.18t/km² (54.17%)、51588.95t/km² (108.09%)、52992.88t/km² (147.24%);其次是东南部的贵港市,增长了 45445.59t/km² (89.96%),而南部南宁市、中部黔南自治州的年平均土壤保持量增量在 30000t/km² 以上,分别为 35310.60t/km² (94.46%)、32720.77t/km² (52.20%),西北部的毕节

市、安顺市,西南部黔西南自治州,东北部铜仁市,北部遵义市的年平均土壤保持增量均在 $20000 \sim 30000 \text{t}/\text{km}^2$, 分别为 $29627.46 \text{t}/\text{km}^2$ (35.02%)、 $21365.86 \text{t}/\text{km}^2$ (41.65%)、 $27964.66 \text{t}/\text{km}^2$ (24.02%)、 $23663.86 \text{t}/\text{km}^2$ (45.23%)、 $26100.63 \text{t}/\text{km}^2$ (95.96%), 而西南部百色市、南部崇左市、北部贵阳市、东北部黔东南自治州的年平均土壤保持增量较小, 在 $0 \sim 20000 \text{t}/\text{km}^2$, 分别增长了 $6734.88 \text{t}/\text{km}^2$ (6.12%)、 $11751.10 \text{t}/\text{km}^2$ (34.50%)、 $14616.28 \text{t}/\text{km}^2$ (49.05%)、 $13721.96 \text{t}/\text{km}^2$ (32.06%), 其中百色市最小, 而仅有西北部的六盘水市年平均土壤保持量在减少, 减少了 $2154.10 \text{t}/\text{km}^2$ (1.03%)。

表 5-2 1990—2010 年喀斯特山区年平均土壤保持量(t/km^2)

	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年
安顺市	84595.64	86413.85	81361.54	100326.04	114223.10
百色市	109997.92	106115.77	73812.68	171320.51	116732.80
毕节市	51293.18	74327.00	65116.38	47849.41	72659.03
崇左市	34062.62	53340.08	31608.88	87596.92	45813.72
贵港市	50573.72	41539.07	33313.74	94885.43	96019.31
贵阳市	29798.22	49561.36	51606.69	37825.57	44414.50
河池市	97269.41	79815.19	101724.78	129557.51	149955.59
来宾市	47728.68	37626.61	40937.04	106311.72	99317.63
柳州市	35991.48	30986.70	47046.97	117079.03	88984.36
六盘水市	209108.68	227020.63	205658.19	147315.91	206954.58
南宁市	37379.91	43767.89	35011.55	68398.72	72690.50
黔东南自治州	42800.33	64097.90	61661.89	36789.23	56522.29
黔南自治州	62679.19	60248.51	80069.61	74514.24	95399.96
黔西南自治州	116408.37	134423.31	111962.88	128310.65	144373.04
铜仁市	52321.81	106144.51	83862.22	58504.03	75985.67
遵义市	27200.81	61301.39	72606.64	41637.28	53301.44

(三) 碳储量时空变化

生态系统有存储碳的能力, 森林、草地、沼泽以及其他生态系统总体的碳储量远超过大气中的碳含量。生态系统通过光合作用吸收碳, 将碳固定在土壤中, 并将一部分碳存储起来, 随着时间的推移, 生态系统还在不断吸收碳并固定到植物和土壤中, 从而在现有碳储存的基础上每年又额外吸收一定的碳, 区域的植被变化对碳储量有很大的影响。

1990—2010 年, 喀斯特山区碳储量空间分布总体呈现为由中部地区向两端递减趋势, 碳储量的高值区多分布于植被覆盖度较高的区域(图 5-3)。随着喀斯特山区

的土地利用变化,碳储量也随之改变,1990 年、1995 年、2000 年、2005 年和 2010 年年平均碳储量分别为 3083.96t/km²、3096.98t/km²、3078.84t/km²、3085.17t/km²、3073.62t/km²,呈波动减少的特征,20 年间,年平均碳储量减少了 10.34t/km² (0.34%),总体变化较小。空间上,碳储量的变化主要发生在土地利用发生变化的区域,区域的碳储量与土地利用变化关系密切。

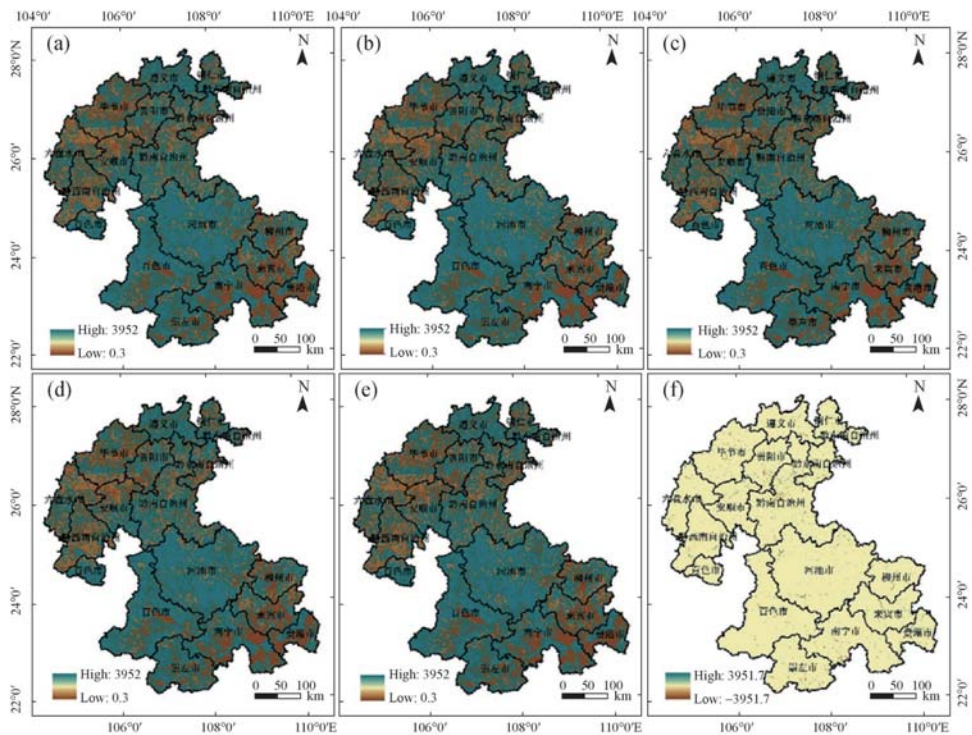


图 5-3 喀斯特山区(a)1990 年、(b)1995 年、(c)2000 年、(d)2005 年、(e)2010 年及 (f)1990—2010 碳储量变化(单位:t/km²)

从行政区划上看(表 5-3),1990 年,各地区的年平均碳储量差异较小,均在 2000~4000t/km²。其中,中部河池市年平均土壤保持量最大,为 3458.78t/km²,其次是西南部百色市、南部崇左市、中部黔南自治州、东北部铜仁市、北部遵义市,年平均碳储量均在 3000t/km² 以上,分别为 3384.29t/km²、3109.94t/km²、3107.53t/km²、3066.73t/km²、3322.71t/km²,而其他地区的年平均碳储量均在 2000~3000t/km²,其中,东南部贵港市最小为 2681.46t/km²,而西北部的安顺市、毕节市和六盘水市,北部贵阳市、东南部的柳州市和来宾市、南部的南宁市、东北部的黔东南自治州、西南部黔西南自治州年平均碳储量分别为 2932.36t/km²、2819.55t/km²、2826.62t/km²、2918.52t/km²、2885.46t/km²、2729.24t/km²、2911.21t/km²、2994.57t/km²、2813.60t/km²。

表 5-3 1990—2010 年喀斯特山区年平均碳储量 (t/km^2)

	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年
安顺市	2932.36	2935.47	2925.68	2938.73	2949.25
百色市	3384.29	3390.70	3376.53	3378.51	3366.47
毕节市	2819.55	2827.41	2815.77	2825.51	2816.72
崇左市	3109.94	3185.59	3107.77	3110.59	3101.59
贵港市	2681.46	2738.79	2723.78	2723.75	2705.08
贵阳市	2918.52	2930.15	2912.50	2914.23	2906.25
河池市	3458.78	3463.90	3452.60	3456.16	3442.88
来宾市	2729.24	2713.00	2737.86	2738.62	2728.45
柳州市	2885.46	2880.74	2881.59	2882.58	2866.95
六盘水市	2826.62	2835.61	2826.04	2829.18	2823.35
南宁市	2911.21	2910.85	2902.13	2897.45	2887.49
黔东南自治州	2994.57	2970.05	2981.49	3001.12	2991.12
黔南自治州	3107.53	3144.73	3087.88	3113.04	3091.54
黔西南自治州	2813.60	2821.67	2805.87	2811.27	2799.58
铜仁市	3066.73	3091.91	3068.70	3086.22	3076.57
遵义市	3322.71	3331.31	3320.88	3324.42	3309.38

到 2010 年,喀斯特山区大部分区域年平均碳储量均在减少,仅西北部的安顺市、东南部的贵港市和东北部的铜仁市在增长,增量分别为 $16.89\text{t}/\text{km}^2$ (0.58%)、 $23.63\text{t}/\text{km}^2$ (0.88%)、 $9.84\text{t}/\text{km}^2$ (0.32%)。而在减少的地区中,南部的南宁市年平均碳储量减少的最多,减少了 $23.72\text{t}/\text{km}^2$ (0.81%),其次是东南部的柳州市,减少了 $18.51\text{t}/\text{km}^2$ (0.64%),西南部百色市和黔西南自治州、北部贵阳市和遵义市、中部黔南自治州和河池市的减少量都在 $10\sim 20\text{t}/\text{km}^2$,分别为 $17.82\text{t}/\text{km}^2$ (0.53%)、 $14.02\text{t}/\text{km}^2$ (0.50%)、 $12.27\text{t}/\text{km}^2$ (0.42%)、 $13.33\text{t}/\text{km}^2$ (0.40%)、 $15.98\text{t}/\text{km}^2$ (0.51%)、 $15.90\text{t}/\text{km}^2$ (0.46%),而西北部的毕节市、南部崇左市、东南部来宾市、西北部六盘水市、东北部黔东南自治州的年平均碳储量减少量相对较小,在 $0\sim 10\text{t}/\text{km}^2$,分别为 $2.83\text{t}/\text{km}^2$ (0.10%)、 $8.35\text{t}/\text{km}^2$ (0.27%)、 $0.79\text{t}/\text{km}^2$ (0.3%)、 $3.27\text{t}/\text{km}^2$ (0.12%)、 $3.46\text{t}/\text{km}^2$ (0.12%),增量最小的为来宾市。

(四)营养截留时空变化

过多的营养盐和有毒物质进入水体,在水体内富集,会造成富营养化,影响水生生物正常生长,并通过食物影响人类健康,生态系统提供了截留部分营养和部分污染的能力,植物通过存储、转化等减少污染物向水体的输出,营养截留量越高,输入水体的营养物质就越少,水质净化功能越好。

本节所述的营养物质截留量为氮(N)和磷(P)的总截留量,除少量大于1000kg/km²的区域零星分布外,研究区绝大部分地区营养截留量都在1000kg/km²以下(图 5-4),由于受到土地利用和气候变化的共同影响,各时期营养截留量不同,数量上,1990 年、1995 年、2000 年、2005 年和 2010 年喀斯特山区年营养物质截留量分别为 613.01kg/km²、608.02kg/km²、615.60kg/km²、610.69kg/km²、605.90kg/km²,总体呈波动减少趋势,平均营养截留量减少了 7.12kg/km² (1.16%),变化相对较小。

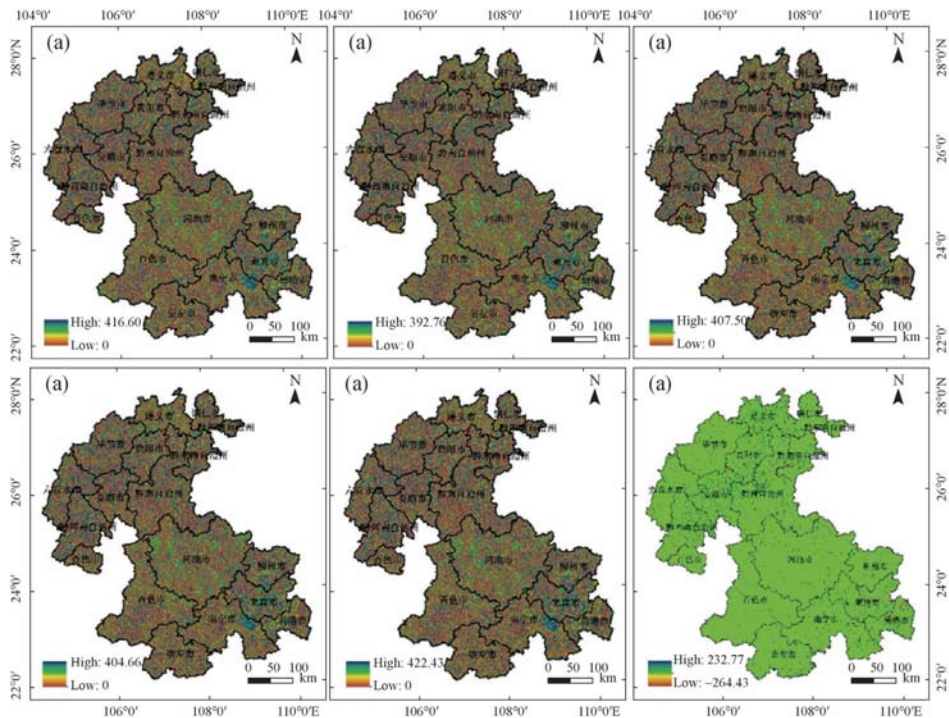


图 5-4 喀斯特山区(a)1990 年、(b)1995 年、(c)2000 年、(d)2005 年、(e)2010 年及 (f)1990—2010 营养截留量变化(单位:kg/km²)

从行政区划上看,1990 年,喀斯特山区年平均营养物质截留量最大的是西南部黔西南自治州和东南部来宾市,年平均营养物质截留量均在 800kg/km² 以上,分别为 801.76kg/km²、804.69kg/km²,其次是西北部的毕节市和西北部的六盘水市,年平均营养物质截留量在 700kg/km² 以上,分别为 762.24kg/km² 和 761.17kg/km²,而西北部安顺市、南部崇左市和南宁市、东南部贵港市和柳州市、北部贵阳市、东北部铜仁市和黔东南自治州的年平均营养物质截留量均在 500~700kg/km²,分别为 689.70kg/km²、578.50kg/km²、615.76kg/km²、660.98kg/km²、681.11kg/km²、607.76kg/km²、654.45kg/km²、630.92kg/km²,西南部百色市、中部河池市、北部遵

义市的年平均营养物质截留量相对较小,分别为 $497.47\text{kg}/\text{km}^2$ 、 $439.50\text{kg}/\text{km}^2$ 、 $474.41\text{kg}/\text{km}^2$,其中河池市最小。

表 5-4 1990—2010 年喀斯特山区年平均营养截留量(kg/km^2)

	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年
安顺市	689.70	710.53	724.00	709.98	693.36
百色市	497.47	477.61	473.87	488.66	480.86
毕节市	762.24	801.72	806.27	771.91	737.47
崇左市	578.50	535.07	551.53	585.88	567.79
贵港市	681.11	642.88	629.02	645.14	665.03
贵阳市	660.98	685.24	711.14	680.75	653.72
河池市	439.50	422.09	433.61	430.40	433.94
来宾市	804.69	813.81	782.36	801.63	808.15
柳州市	691.64	682.62	690.25	703.55	683.85
六盘水市	761.17	777.15	780.26	775.12	746.29
南宁市	615.76	600.04	587.47	602.39	613.20
黔东南自治州	654.45	666.04	676.70	627.70	641.81
黔南自治州	630.92	613.61	655.28	614.11	632.49
黔西南自治州	801.76	811.93	813.75	820.68	794.52
铜仁市	607.76	614.15	626.04	589.89	597.97
遵义市	474.41	499.27	515.34	495.94	488.77

到 2010 年,区域内营养物质截留量发生了不同程度的变化,且大部分地区都呈减少的趋势。其中,西北部的毕节市减少的量最多,减少了 $24.76\text{kg}/\text{km}^2$ (3.25%),其次是西南部百色市、南部崇左市、东南部的贵港市、西北部六盘水市、东北部黔东南自治州,年平均营养物质截留较少量均在 $10\sim 20\text{kg}/\text{km}^2$,分别减少了 $16.60\text{kg}/\text{km}^2$ (3.34%)、 $10.72\text{kg}/\text{km}^2$ (1.85%)、 $16.08\text{kg}/\text{km}^2$ (2.36%)、 $14.88\text{kg}/\text{km}^2$ (1.96%)、 $12.64\text{kg}/\text{km}^2$ (1.93%)。而北部贵阳市、中部河池市、东南部柳州市、南部南宁市、西南部黔西南自治州、东北部铜仁市的年营养物质截留量减少的量较少,均在 $0\sim 10\text{kg}/\text{km}^2$,分别减少了 $7.26\text{kg}/\text{km}^2$ (1.10%)、 $5.56\text{kg}/\text{km}^2$ (1.27%)、 $7.79\text{kg}/\text{km}^2$ (1.13%)、 $2.55\text{kg}/\text{km}^2$ (0.41%)、 $7.24\text{kg}/\text{km}^2$ (0.90%)、 $9.79\text{kg}/\text{km}^2$ (1.61%),年平均营养物质截留量在增长的地区有西北部安顺市、东南部来宾市、中部黔南自治州、北部遵义市,分别增长了 $3.66\text{kg}/\text{km}^2$ (0.53%)、 $3.46\text{kg}/\text{km}^2$ (0.43%)、 $1.57\text{kg}/\text{km}^2$ (0.25%)、 $14.35\text{kg}/\text{km}^2$ (3.03%),增长量最多的是遵义市。

二、喀斯特山区生态服务功能与土地利用关系研究

(一)喀斯特山区土地利用变化与生态服务功能关系

1. 不同土地利用类型产水量差异

1990—2010 年,喀斯特山区产水量最大的是建设用地,年平均产水量为 1220.64mm,其次是未利用地,年平均产水量为 1059.56mm,然后是草地和耕地,分别为 1010.98mm 和 992.84mm,最小的是水域和林地,年平均产水量分别为 922.18mm 和 912.64mm,对比各类土地利用的产水量的大小可以看出,各土地利用类型的产水能力从大到小大致为:建设用地>未利用地>草地>耕地>水域>林地(表 5-5)。

表 5-5 1990—2010 年喀斯特山区不同土地利用类型年平均产水量(mm)

	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	平均
耕地	1007.57	1017.37	1022.72	901.65	1014.87	992.84
林地	973.56	903.56	939.94	820.03	926.10	912.64
草地	1015.74	1017.15	1092.86	916.61	1012.53	1010.98
水域	993.23	943.48	837.34	856.44	980.40	922.18
建设用地	1274.91	1247.34	1141.56	1165.37	1274.01	1220.64
未利用地	1007.50	1132.18	1065.87	972.53	1119.15	1059.45

建设用地的产水量最大,构成建设用地的混凝土、沥青、水泥等材料形成了不透水层,能够阻止降雨下渗,形成地表径流,且建设用地蒸散量小,水分消耗能力弱,故而产水量较大;未利用地的降雨除了会形成径流以外,有少许会下渗,未利用地无植被覆盖,土壤蒸发会消耗少量的水分,产水量略小于建设用地;草地有少量的植物、很小的根系,对降雨有很小的拦截作用,同时,植物蒸腾作用会消耗一部分降雨。耕地的产水量较小,一方面,灌溉、农作物蒸腾作用会消耗一定的水;另一方面,农作物有较浅的根系,对降雨有一定的拦截作用,不容易形成径流;水域包含了河流、湖泊、湿地、水库等,水利设施可以有效地拦蓄地表径流,存储过量的降水,不易形成径流,因而水域产水量较小。林地的产水量最小,则是因为林地的植物蒸腾作用消耗较多水分,并通过枯落物截持和土壤储蓄,将部分降水储存在森林生态系统内部,加之林地根系深,能吸收土壤深层水分和拦截降雨,所以林地吸收利用了大部分的降雨量,产水量很小。

2. 不同地类土壤保持差异

1990—2010 年,喀斯特山区年平均土壤保持量最大的是林地和草地,分别为 92760.90t/km²和 91200.73t/km²,其次是耕地和水域,年平均土壤保持量分别为 72841.22t/km²和 77729.71t/km²,年平均土壤保持量最小的是建设用地和未利用

地,仅有 56733.65t/km² 和 34306.74t/km²,土壤保持能力从大到小为:林地>草地>耕地>建设用地>水域>未利用地(表 5-6)。

表 5-6 1990—2010 年喀斯特山区不同土地利用类型年平均土壤保持量(t/km²)

	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	平均
耕地	64719.18	73485.15	68377.25	85372.91	89506.50	72841.22
林地	78162.99	80514.11	78345.65	110211.12	109704.27	92760.90
草地	80497.90	84168.64	84192.31	97536.21	110629.30	91200.73
水域	52413.35	53656.22	50861.83	97677.59	88208.32	77729.71
建设用地	41220.48	41383.91	39969.67	71869.52	67423.26	56733.65
未利用地	33032.78	31980.13	31567.83	52241.99	22710.99	34306.74

土壤保持能力与降雨量、土壤质地、植被覆盖度、地形等因素有关。林地的植物枝繁叶茂,能有效地防止溅蚀的发生,此外,林木的根系稳固,并与土壤结合,形成生物凝聚力,有利于稳定土壤,能有效地防止面蚀、沟蚀的形成和发展,因此,林地的发展有利于区域土壤保持;草地对土壤保持有明显作用,草本植物比其他植物种类更贴近地表,更能够起到保持表层土壤的作用,有效地防止表层土壤的侵蚀;耕地种植农作物对地表的覆盖可明显减轻风蚀、水蚀的发生,对于保持水土、防止侵蚀也发挥了较大的作用;水域有泥沙沉积,对土壤有一定程度的截留;建设用地形成了不透水层,能阻止降雨冲刷,在一定程度上减缓土壤侵蚀;未利用地的土壤保持能力最差,未利用地多为裸露的地表,几乎没有阻挡泥沙、减少侵蚀的能力。

3. 不同地类碳储量差异

喀斯特山区碳储量最大的是林地,年平均碳储量为 3952.00t/km²,其次是草地和耕地,分别为 2217.00t/km²、1948.00t/km²,建设用地、水域和未利用地年平均土壤保持量均较小,分别为 0.3t/km²、0.9t/km²、1.1t/km²,因此,不同土地利用类型的碳存储能力从大到小为:林地>草地>耕地>未利用地>水域>建设用地(表 5-7)。

表 5-7 1990—2010 年喀斯特山区不同土地利用类型年平均碳储量(t/km²)

	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	平均
耕地	1948.00	1948.00	1948.00	1948.00	1948.00	1948.00
林地	3952.00	3952.00	3952.00	3952.00	3952.00	3952.00
草地	2217.00	2217.00	2217.00	2217.00	2217.00	2217.00
水域	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
建设用地	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
未利用地	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10

区域的碳储量与植被覆盖度高度相关。林地植被茂盛,植被覆盖度高,通过光合作用将碳固定到植物和土壤中,林地有很高的固碳能力;草地有大量的草本植物,亦能通过光合作用将碳存储于植物和土壤之中,有较强的碳存储能力;耕地被农作物覆盖,且土壤水分能有效控制,加之农作物残余物进入土壤等有助于碳的存储;而未利用地植物稀少,多为裸地,只能吸收存储少量碳;水域水生生物会吸收一部分碳;建设用地多为不透水层,植被覆盖度低,故而碳储量最小。

4. 不同地类营养截留差异

喀斯特山区草地、林地和耕地的年平均营养截留量较大,皆在 600kg/km² 以上,其中草地的年平均营养截留量最大,为 650.12kg/km²,其次是林地,为 617.91kg/km²,耕地年平均营养截留量最小,为 610.82kg/km²,而水域、建设用地和未利用地的年平均营养截留量相对较小,皆在 200kg/km² 以下,分别为 160.27kg/km²、166.91kg/km²、90.90kg/km²,营养截留能力从大到小为:草地>林地>耕地>建设用地>水域>未利用地(表 5-8)。

表 5-8 1990—2010 年喀斯特山区不同土地利用类型年平均营养截留量(kg/km²)

	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	平均
耕地	612.40	615.47	609.27	609.88	607.10	610.82
林地	621.18	609.72	624.92	617.55	616.18	617.91
草地	644.17	649.78	656.74	652.44	647.48	650.12
水域	162.27	161.98	156.67	159.66	160.77	160.27
建设用地	162.34	166.72	166.68	170.72	168.08	166.91
未利用地	97.64	77.94	98.22	97.08	83.60	90.90

草地根系较浅,可以通过吸收和吸附降水中的污染物质,达到截留营养物质、净化水质的目的,且效果明显;林地对化学物质具有吸附、调节和滤储的作用,植被在生长过程中不断地从周围环境中吸收氮、磷、钾等营养物质,并通过储存、转化等形式移除污染物,从而减少其向河流、湖泊等水体的输出。同时,土壤能够储存、吸附某些可溶性污染物,净化污染物;耕地能够截留土壤中的氮、磷等营养物质向水体输入,减缓水体富营养化进程;营养物质最终会随着降雨进入水域,水域的自然稀释、扩散、氧化还原等反应可以净化污染物,并且,水域中的植物、藻类、微生物可以吸附水中的悬浮颗粒和化合物等,将水域中氮、磷等营养物质有选择地吸收、分解、同化或排出,达到净化水质的效果;而未利用地和建设用地植被较少,会吸收小部分的营养物质,净化能力相对较弱。

(二)喀斯特山区不同地类生态服务功能差异

同一生态系统中不同的生态系统服务功能变化程度不一,计算各类生态系统的各项生态服务功能多年平均值所占百分比,结果如表 5-9 所示。

表 5-9 不同生态系统各生态服务功能百分比

	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
产水量	0.1623	0.1491	0.1653	0.1507	0.1996	0.1731
土壤保持	0.1858	0.2209	0.2230	0.1622	0.1244	0.0839
碳储量	0.2399	0.4867	0.2731	0.0001	0.0000	0.0001
营养截留	0.2659	0.2690	0.2830	0.0698	0.0727	0.0396

耕地、林地和草地的各项生态服务功能百分比比较大;耕地的产水量、土壤保持、碳储量和营养截留 4 项生态服务功能相对均衡,均在 0.2 左右,营养截留能力最大为 0.2659,其次是碳存储能力(0.2399),而产水能力(0.1623)和土壤保持能力(0.1858)相当;林地的四项生态系统服务功能除产水量外均较大,其中碳存储能力最强为 0.4867,营养截留能力和土壤保持能力相当,分别为 0.2690、0.2209,最小的是产水能力,为 0.1491;草地的四项生态服务功能与耕地类似,四项功能相对比较均衡,营养截留能力(0.2830)和碳存储能力(0.2731)略大于其他两项,草地的产水能力(0.1653)则最小。

与耕地、林地和草地的生态服务功能相比较,水域、建设用地和未利用地的各项生态服务功能百分比皆较小,都不超过 0.2,水域的产水能力(0.1507)和土壤保持能力(0.1622)相当,营养截留能力(0.0698)略小于产水能力和土壤保持能力,水域碳存储能力(0.0001)极小;建设用地的产水能力(0.1996)很强,其他三项生态服务功能百分比均较小,均在 0.15 以下,碳存储能力最小几乎为 0,未利用地的除产水能力(0.1731)较大之外,其他三项生态系统服务功能都很小,均在 0.1 以下。

1990—2010 年,耕地的各项生态服务功能百分比,除土壤保持量波动较大以外,其他三项生态服务功能的年际变化均不明显(图 5-5);林地的四项生态服务功能相对稳定,变化较小;草地除土壤保持能力呈先减少后增加的趋势外,其他三项功能相对稳定,变化较小。水域的土壤保持能力大致呈增长的趋势,其他三项功能变化较小;建设用地产水能力和土壤保持能力大致呈增长的趋势,而其他两项生态系统服务功能相对稳定;未利用地的土壤保持能力波动较大,增加后有急剧减小,而其他 3 项生态系统服务功能变化不大。

三、喀斯特山区生态服务功能梯度效应

生态服务功能受自然和社会经济等因素影响,生态服务存在梯度效应,不同梯度的生态服务功能存在较大差异,本节将喀斯特山区分为 0~500m、500~1000m、1000~1500m、1500m 以上四个梯度,以下依次将 0~500m、500~1000m、1000~1500m、1500m 以上四个梯度作为第一、二、三、四梯度,分析各项生态服务功能在各梯度上的差异。



图 5-5 1990—2010 年喀斯特山区不同生态系统的生态服务功能变化

(一) 产水量的梯度效应

从表 5-10 可以看出,产水量在梯度上存在较为明显的差异。1990—2010 年,大致上有海拔越高产水量越小的规律,且有海拔越高差异越小的趋势。

表 5-10 1990—2010 年喀斯特山区产水量梯度差异(mm)

	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	平均
第一梯度	1172.38	1051.91	971.70	1029.82	1160.81	1077.32
第二梯度	1048.67	914.41	1014.40	803.17	955.77	947.28
第三梯度	753.90	876.44	990.69	721.33	794.74	827.42
第四梯度	720.01	909.13	935.10	745.86	686.32	799.29

1990 年,第一梯度年平均产水量为 1172.38mm,从第一梯度到第四梯度,在上一梯度的基础上,第二梯度的增量为-123.71mm(-10.55%),第三梯度的增量为-294.76mm(-28.11%),第四梯度的增量为-33.89mm(-4.50%);1995 年,从第一梯度到第四梯度,年平均产水量在上一梯度基础上的增量分别为-137.50mm(-13.07%)、-37.97mm(-4.15%)、32.70mm(3.73%);2000 年,在上一梯度的基础上,年平均产水量的增量分别为 42.70mm(4.39%)、-37.97mm(-4.15%)、-55.59mm(-5.61%);2005 年,第二、三、四梯度在上一梯度的基础上的增量分别为-226.65mm(-22.01%)、-81.84mm(-10.91%)、24.53mm(3.40%);2010 年,第二、三、四梯度在上一梯度的基础上的增量分别为-204.04mm(-17.66%)、-161.85mm(16.85%)、-108.43mm(-13.64%)。

总体上,从各梯度年平均产水量的多年平均数来看,在上一梯度的基础上,第二、三、四梯度的年平均产水量分别增长了-130.04mm(-12.07%)、-119.86mm(12.65%)、-28.14mm(3.40%)。

出现这种差异的主要原因有两个:一是区域降雨量决定区域的产水量,喀斯特山区从西北到东南海拔逐渐降低,而东南部为近海岸地区,降雨量较大,西北地区属内陆,降雨量较之东南地区相对较小;二是建设用地是产水量的主要贡献者,低海拔地区经济相对发达,因而建设用地面积较大,而海拔越高,林地和草地面积逐渐增多,植被越来越多,不利于水源的供给。因此,喀斯特山区随着海拔的增加,产水量逐渐减小。

(二) 土壤保持的梯度效应

相较于产水量在梯度上有明显的规律可循,喀斯特山区的土壤保持量在梯度上的变化则复杂得多,从低到高 4 个梯度,大致有先增加后减少的趋势。

1990 年、1995 年、2000 年(表 5-11),第一梯度和第三梯度的年平均土壤保持量要小于二、四梯度,其中第四梯度最大,第一梯度最小。1990 年,从第一梯度到第四梯度,在上一梯度的基础上,第二梯度的年平均土壤保持量增长量为 27852.38t/km²(46.09%),第三梯度的年平均土壤保持量增长量为-15825.47t/km²(-17.93%),

第四梯度的年平均土壤保持量增长量为 $19221.08\text{t}/\text{km}^2$ (26.53%); 1995 年, 第二、三、四梯度在前一梯度基础上年平均土壤保持量的增量分别为 $31704.81\text{t}/\text{km}^2$ (53.56%)、 $-6833.65\text{t}/\text{km}^2$ (-7.52%)、 $19918.61\text{t}/\text{km}^2$ (23.69%)。2000 年, 第二、三、四梯度在前一梯度基础上的年平均土壤保持量增量分别为 $33018.05\text{t}/\text{km}^2$ (57.45%)、 $-10997.10\text{t}/\text{km}^2$ (-12.15%) 和 $14303.27\text{t}/\text{km}^2$ (17.99%)。

表 5-11 1990—2010 年喀斯特山区土壤保持梯度差异 (t/km^2)

	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	平均
第一梯度	60428.56	59198.39	57476.96	111719.18	100809.77	77926.57
第二梯度	88280.94	90903.20	90495.00	115589.03	117866.88	100627.01
第三梯度	72455.47	84069.55	79497.90	78152.77	93252.78	81485.69
第四梯度	91676.55	103988.17	93801.17	71894.40	95854.07	91442.87

2005 年和 2010 年第一、二梯度的平均土壤保持量大于第三、四梯度。2005 年, 从低到高 4 个梯度的年平均土壤保持量呈先增加后减少的趋势, 且减少的量逐渐减小, 第一梯度的年平均土壤保持量最大, 第二、三、四梯度在前一梯度基础上的年平均土壤保持量增量分别为 $3869.86\text{t}/\text{km}^2$ (3.46%)、 $-37436.26\text{t}/\text{km}^2$ (-32.39%) 和 $-6258.37\text{t}/\text{km}^2$ (-8.01%)。2010 年, 从低到高 4 个梯度的年平均土壤保持量呈波动性减小的趋势, 第一梯度年平均土壤保持量为 $100809.77\text{t}/\text{km}^2$, 第二、三、四梯度在前一梯度基础上的年平均土壤保持量增量分别为 $17057.11\text{t}/\text{km}^2$ (16.92%)、 $-24614.10\text{t}/\text{km}^2$ (-20.88%) 和 $2601.29\text{t}/\text{km}^2$ (2.79%)。

总体上, 从各梯度年平均土壤保持量的多年平均数来看, 从第一梯度到第四梯度, 在前一梯度的基础上, 第二、三、四梯度的年平均产水量分别增长了 $22700.44\text{t}/\text{km}^2$ (29.13%)、 $-19141.32\text{t}/\text{km}^2$ (-19.02%) 和 $9957.18\text{t}/\text{km}^2$ (12.22%)。根据 INVEST 模型的原理可以发现, 区域土壤保持量的大小最终取决于区域降雨量的大小, 降雨量越大, 土壤侵蚀量越大; 同时, 潜在的土壤侵蚀量同步变大, 所以土壤保持量也随之增大, 因此造成土壤保持量在空间上的差异。

(三) 碳储量的梯度效应

喀斯特山区碳储量在梯度上有明显的规律, 从低到高 4 个梯度的年平均碳储量呈先增加后减少的趋势, 且减少的量逐渐降低。其中, 第二、三梯度年平均碳储量均在 $3000\text{t}/\text{km}^2$, 第二梯度的年平均碳储量最大, 第一、四梯度的年平均碳储量均在 $2900\sim 3000\text{t}/\text{km}^2$, 第四梯度年平均碳储量最小(表 5-12)。

1990 年, 第一梯度年平均碳储量为 $2981.47\text{t}/\text{km}^2$, 第二、三、四梯度在前一梯度的基础上年平均土壤保持量增量分别为 $319.11\text{t}/\text{km}^2$ (10.70%)、 $-279.25\text{t}/\text{km}^2$ (-8.46%)、 $-86.53\text{t}/\text{km}^2$ (-2.86%); 1995 年, 第二、三、四梯度的年平均土壤保持量增量分别为 $311.65\text{t}/\text{km}^2$ (10.39%)、 $-277.13\text{t}/\text{km}^2$ (-8.37%)、 $-91.48\text{t}/\text{km}^2$

(-3.02%);2000年,第二、三、四梯度在前一梯度的基础上年平均土壤保持量增量分别为 $312.51\text{t}/\text{km}^2$ (10.48%)、 $-281.59\text{t}/\text{km}^2$ (-8.55%)、 $-79.15\text{t}/\text{km}^2$ (-2.63%);2005年,第二、三、四梯度在前一梯度的基础上年平均土壤保持量增量分别为 $318.97\text{t}/\text{km}^2$ (10.70%)、 $-271.98\text{t}/\text{km}^2$ (-8.24%)、 $-86.47\text{t}/\text{km}^2$ (-2.86%);2010年,第二、三、四梯度在前一梯度的基础上年平均土壤保持量增量分别为 $321.55\text{t}/\text{km}^2$ (10.85%)、 $-265.30\text{t}/\text{km}^2$ (-8.08%)、 $-72.10\text{t}/\text{km}^2$ (-2.39%)。

表 5-12 1990—2010 年喀斯特山区碳储量梯度差异 (t/km^2)

	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	平均
第一梯度	2981.47	2998.91	2980.73	2980.33	2963.77	2981.04
第二梯度	3300.57	3310.56	3293.24	3299.30	3285.32	3297.80
第三梯度	3021.32	3033.43	3011.65	3027.32	3020.01	3022.75
第四梯度	2934.80	2941.95	2932.49	2940.85	2947.91	2939.60

从各梯度多年平均数据来看,从第一梯度到第四梯度,在上一梯度的基础上,第二、三、四梯度年平均碳储量的增量分别是 $316.76\text{t}/\text{km}^2$ (10.63%)、 $-275.05\text{t}/\text{km}^2$ (-8.34%)、 $-83.15\text{t}/\text{km}^2$ (-2.75%)。

林地、草地和耕地是碳储量的主要贡献者,且林地贡献量远大于草地和耕地,在第二梯度林地和耕地面积较大,而越往上,林地和耕地逐渐减小,高海拔地区草地居多,故而海拔越高碳储量逐渐减小。

(四)营养截留的梯度效应

喀斯特山区营养截留量也有一定的梯度效应(表 5-13),海拔从低到高 4 个梯度的年平均营养截留量呈现出波动减少的趋势,其中,第一梯度的年平均营养截留量最大值均在 $650\text{kg}/\text{km}^2$ 以上,其次是第三梯度,年平均营养截留量均在 $600\text{kg}/\text{km}^2$ 以上,而第四梯度的年平均营养截留量最小,多在 $500\text{kg}/\text{km}^2$ 以下。

1990 年,第一梯度年平均营养截留量最大,在前一梯度的基础上,第二梯度的年平均营养截留量增量为 $-121.17\text{kg}/\text{km}^2$ (-17.56%),第三梯度的增量为 $50.03\text{kg}/\text{km}^2$ (8.80%),第四梯度的增量为 $-208.69\text{kg}/\text{km}^2$ (-33.72%);1995 年,第二、三、四梯度在前一梯度的基础上年平均营养截留量分别增长了 $-104.55\text{kg}/\text{km}^2$ (-15.65%)、 $69.40\text{kg}/\text{km}^2$ (12.31%)、 $-212.93\text{kg}/\text{km}^2$ (33.63%);2000 年,在前一梯度的基础上,第二、三、四梯度年平均营养截留量分别增加了 $-90.40\text{kg}/\text{km}^2$ (-13.54%)、 $69.95\text{kg}/\text{km}^2$ (12.12%)、 $-224.60\text{kg}/\text{km}^2$ (-34.71%);2005 年,在前一梯度的基础上,第二、三、四梯度年平均营养截留量的增量分别为 $-121.58\text{kg}/\text{km}^2$ (-17.81%)、 $66.23\text{kg}/\text{km}^2$ (11.80%)、 $-211.25\text{kg}/\text{km}^2$ (-33.68%);2010 年,在前一梯度的基础上,第二、三、四梯度年平均营养截留量的增长量分别为 $-119.59\text{kg}/\text{km}^2$ (-17.55%)、 $52.36\text{kg}/\text{km}^2$ (9.32%)、 $18.72\text{kg}/\text{km}^2$ (3.05%)。

表 5-13 1990—2010 年喀斯特山区营养截留量梯度差异(kg/km²)

	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	平均
第一梯度	689.94	668.26	667.61	682.67	681.62	678.02
第二梯度	568.77	563.71	577.21	561.09	562.03	566.56
第三梯度	618.80	633.10	647.16	627.32	614.38	628.15
第四梯度	410.11	420.18	422.56	416.07	633.10	460.40

总的来说,第二、三、四梯度的多年平均营养截留量在前一梯度的基础上分别增加了-111.46kg/km²(-16.44%)、61.59kg/km²(10.87%)、-167.75kg/km²(-26.71%)。营养截留量不仅与区域的植被覆盖度有关,还与区域气候、土地利用等因素有关。从土地利用方面来说,林地、草地和耕地是喀斯特山区营养截留量的主要贡献者,草地的贡献量最大,耕地和林地的贡献量相当,从而影响喀斯特山区营养截留量;从气候方面来讲,温度直接影响蒸散量,喀斯特山区的降雨量差异较大,海拔较高的地区降雨量较小,而海拔较低的地区降雨量较高,故而海拔较高的地方营养截留量较大,海拔低的地方营养截留量相对较小。

第二节 喀斯特山区生态服务功能权衡分析

生态系统服务是一个复杂的生态过程,受到诸多因素的影响。因而,生态服务功能在时间和空间上都呈现出复杂的、非线性的变化,且无规律可循。本节运用生产可能性边界曲线来说明喀斯特山区产水量、土壤保持、碳储量和营养截留量四项生态服务功能的两两之间在空间上的权衡。

一、产水量与土壤保持的关系

从产水量和土壤保持的生产可能性边界曲线可以看出,产水量和土壤保持量存在权衡关系,随着土壤保持量的增加,产水量逐渐减小。根据生产可能性边界概念,将产水量作为土壤保持的机会成本,不同梯度想要获得一定的土壤保持量,所付出的机会成本不一。可以看出(图 5-6),在第一和第二梯度,随着土壤保持量的增加,产水量减少的量不断增加。在第一梯度,要实现 20000t 土壤保持量的增长,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点减少的产水量分别是 42mm、114mm、186mm(图 5-6a);在第二梯度,要实现 20000t 土壤保持量的增长,从 a 点到 b 点,从 b 点到 c 点、c 点到 d 点减少的产水量分别为 102.6mm、109.2mm、150mm(图 5-6b)。

在第三梯度,随着土壤保持量的增加,产水量减少的量不断减少,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点分别减少 149.6mm、111.2mm、77.6mm,则能实现 20000t 土壤保持量的增长(图 5-6c)。

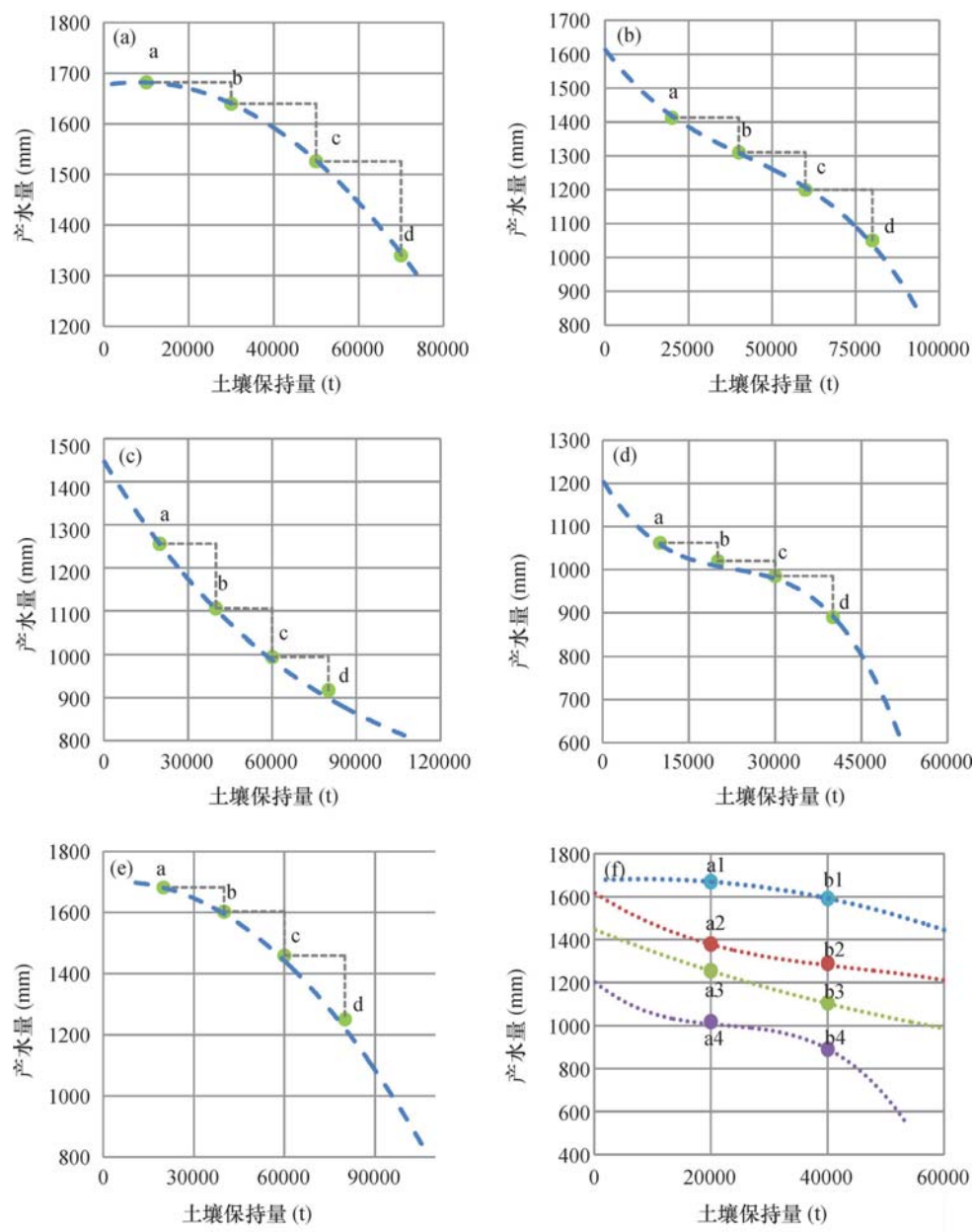


图 5-6 产水量与土壤保持量的生产可能性边界

(a)第一梯度;(b)第二梯度;(c)第三梯度;(d)第四梯度;(e)喀斯特山区;(f)四个梯度对比

而在第四梯度,随着土壤保持量的增加,产水量减少的量有先减少后增加的趋势,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点分别减少 85.2mm、70mm、190mm 的产水量即能实现 20000t 土壤保持量的增长(图 5-6d)。

从整个喀斯特山区产水量和土壤保持量的生产可能性边界来看(图 5-6e),随着土壤保持量的增加,产水量减少的量也不断增加,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点分别减少 80.00mm、144.00mm、208.00mm 的产水量则可以实现 20000t 土壤保持量的增长。

对比四个梯度的产水量与土壤保持量的生产可能性边界曲线,大小依次是:第一梯度>第二梯度>第三梯度>第四梯度(图 5-6f)。而想要获得 20000t 土壤保持量的增长,第一梯度要减少的产水量最小为 78mm(从点 a1 到点 b1),第二梯度要减少 102.6mm 的产水量(从点 a2 到点 b2),第三梯度减少的量最多,为 149.6mm(从点 a3 到点 b3),第四梯度减少的产水量则为 130mm(从点 a4 到点 b4)。

二、产水量与碳储量的关系

从产水量和碳储量的生产可能性边界曲线可以看出(图 5-7),产水量和碳储量存在权衡关系,随着碳储量的增加,产水量不断减少,将产水量作为碳储量的机会成本,不同梯度,想要获得一定的碳储量,所付出的机会成本不一。

在第一、二、三梯度,随着碳储量的增加,产水量减少的量不断增加,在第一梯度,要实现 1000t 碳储量的增长,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点产水量的减少量分别为 3.38mm、15.02mm、26.66mm(图 5-7a);在第二梯度,要实现 1000t 碳储量的增长,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点产水量分别减少 47.10mm、124.58mm、202.06mm(图 5-7b);在第三梯度,要实现 1000t 碳储量的增长,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点的产水量分别为 56.67mm、84.25mm(图 5-7c)。

在第四梯度,随着碳储量的增加,产水量减少的量不断减小,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点分别减少 47.78mm、35.92mm、24.06mm 即能实现 1000t 碳储量的增长(图 5-7d)。

总体上,喀斯特山区碳储量的不断增加会使得产水量减少,且减少的量不断增加(图 5-7e),要实现 1000t 碳储量的增长,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点则要分别减少产水量 3.38mm、15.02mm、26.67mm 才能实现 1000t 碳储量的增长。

对比喀斯特山区不同梯度产水量与碳储量的生产可能性边界曲线可以看出:第一梯度>第二梯度>第三梯度>第四梯度(图 5-7f)。在四个梯度,要实现 1000t 碳储量的增长,第一梯度减少的产水量最小,为 30.03mm(从点 a1 到点 b1),第二梯度产水量减少的量最多,为 249.14mm(从点 a2 到点 b2),第三梯度次之,为 168.49mm(从点 a3 到点 b3),而第四梯度则要减少 71.84mm(从点 a4 到点 b4)。

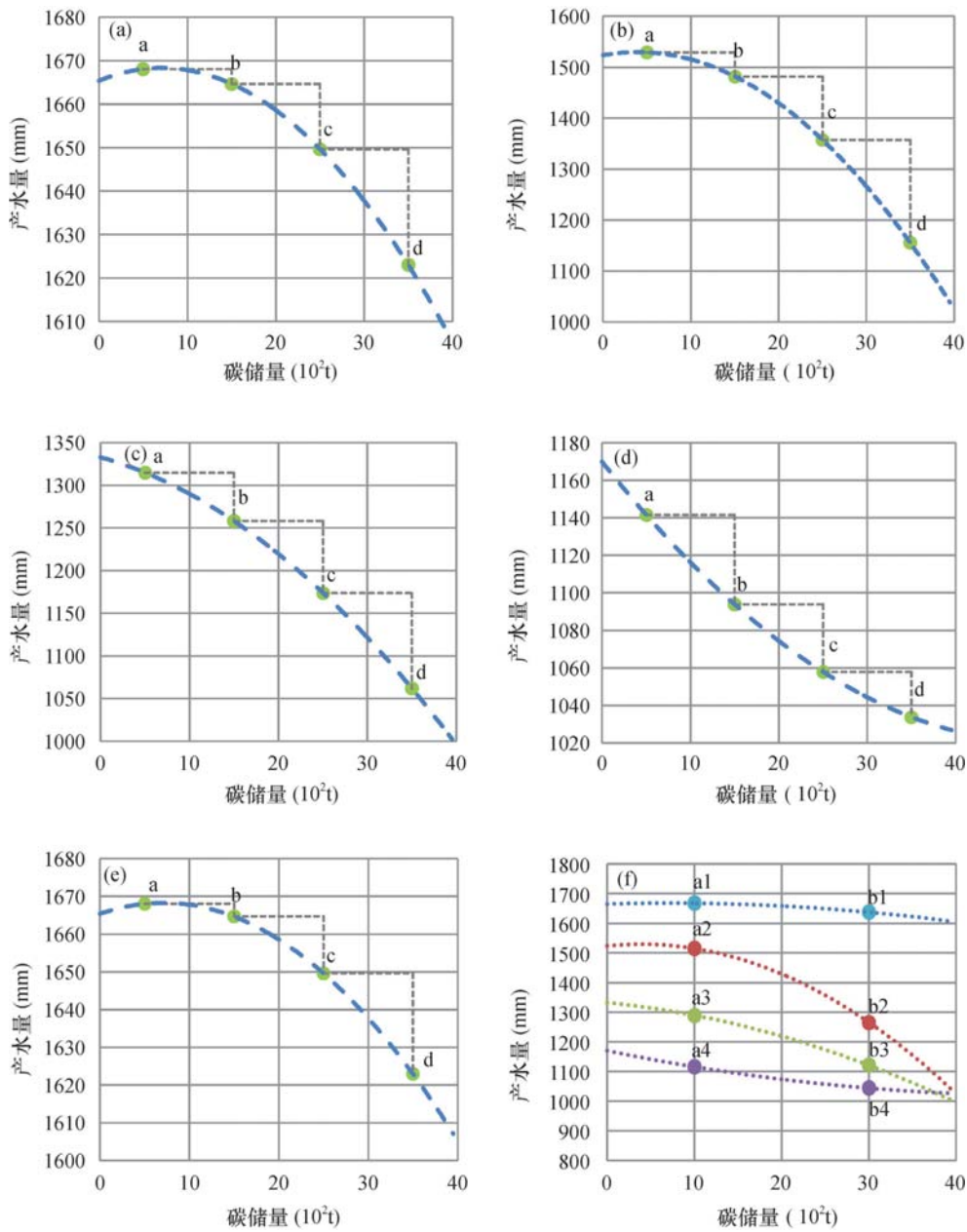


图 5-7 产水量与碳储量的生产可能性边界曲线

(a)第一梯度;(b)第二梯度;(c)第三梯度;(d)第四梯度;(e)喀斯特山区;(f)四个梯度对比

三、产水量与营养截留的关系

从产水量和营养截留量的生产可能性边界可以看出(图 5-8),产水量和营养截留量存在权衡关系,随着营养截留量的增加,产水量不断减少,根据生产可能性边界概念,将产水量作为营养截留量的机会成本,不同梯度想要获得一定的营养截留量,所付出的机会成本不一。

在第一梯度,随着营养截留量的增加,产水量减少的量不断增加,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点分别减少 33.29mm、97.29mm、161.29mm 能实现 $100 \times 10^2 \text{ kg}$ 营养截留量的增长(图 5-8a)。

在第二梯度,随着营养截留量的增加,产水量减少的量不断减少,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点分别减少 242.6mm、218.6mm、194.6mm 可以实现 $100 \times 10^2 \text{ kg}$ 营养截留量的增长(图 5-8b)。

在第三梯度,与第二梯度相似,随着营养截留量的增加,产水量减少的量不断减少,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点分别减少 273.13mm、177.13mm、81.13mm 则可以实现 $100 \times 10^2 \text{ kg}$ 营养截留量的增长(图 5-8c)。

在第四梯度,随着营养截留量的增加,产水量减少的量不断增加,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点分别减少 190.56mm、225.56mm、260.56mm 可以实现 $100 \times 10^2 \text{ kg}$ 营养截留量的增长(图 5-8d)。

产水量和营养截留的关系存在差异。总的来说,随着营养截留量的增加,喀斯特山区产水量减少的量有逐渐增加的趋势,从图 5-8e 可以看出,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点分别减少 59.18mm、95.18mm、131.18mm 可以实现 $100 \times 10^2 \text{ kg}$ 营养截留量的增长。

对比喀斯特山区不同梯度产水量与营养截留的生产可能性边界曲线可以看出:第一梯度>第二梯度>第三梯度>第四梯度(图 5-8f)。要实现 $100 \times 10^2 \text{ kg}$ 营养截留量的增长,第一梯度要减少 94.09mm 的产水量(从点 a1 到点 b1),减少的量最少,第二梯度减少的产水量为 206.6mm(从点 a2 到点 b2),第三梯度减少的产水量则为 181.93mm(从点 a3 到点 b3),而第四梯度减少的产水量最多,为 243.06mm(从点 a4 到点 b4)。

四、土壤保持与碳储量的关系

从土壤保持和碳储量的生产可能性边界曲线可以看出(图 5-9),喀斯特山区土壤保持量和碳储量存在协同关系,随着碳储量的增加,土壤保持量不断增加,将土壤保持量作为碳储量的机会成本,不同梯度想要获得一定的碳储量付出的机会成本不一。

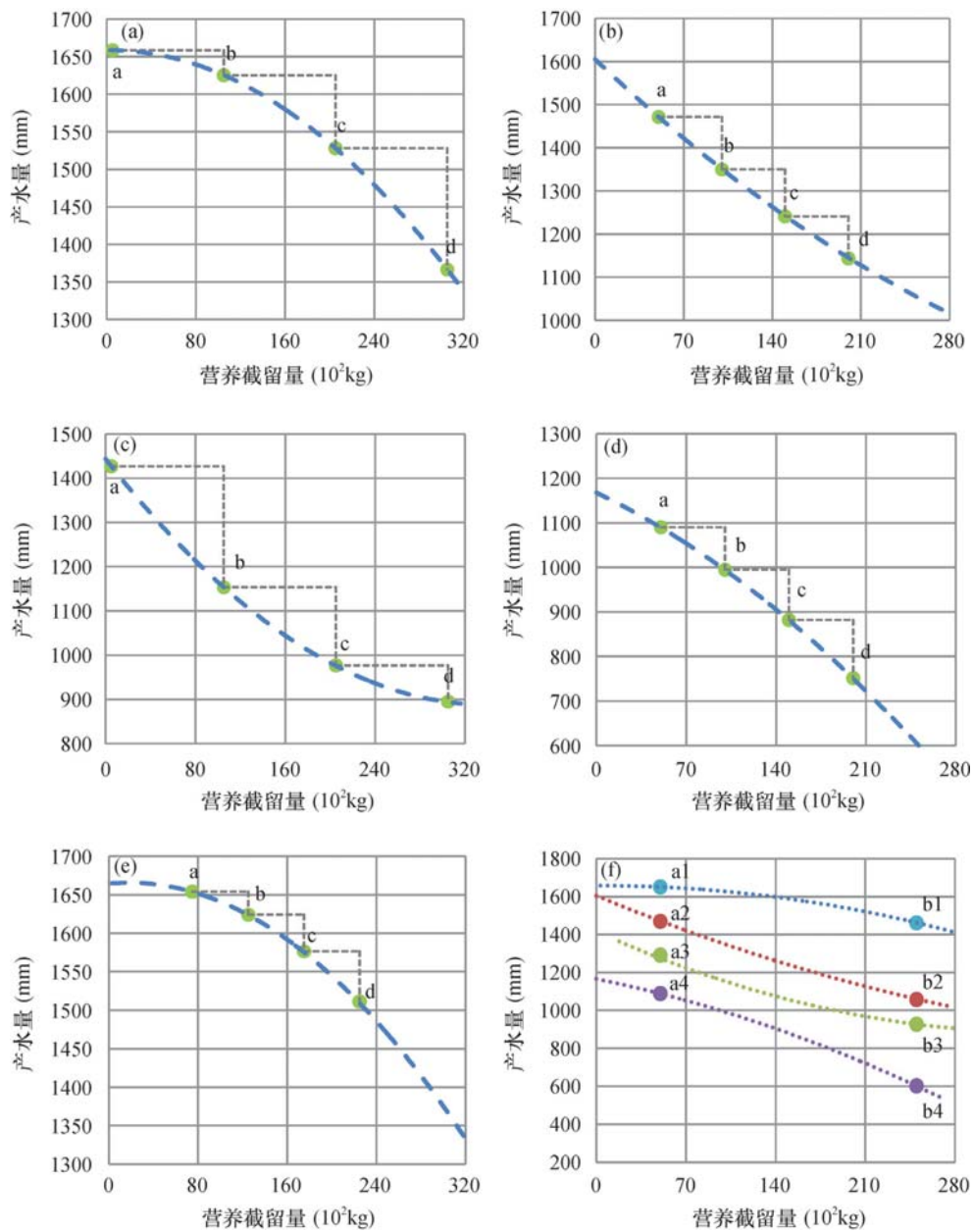


图 5-8 产水量与营养截留量的生产可能性边界曲线

(a)第一梯度;(b)第二梯度;(c)第三梯度;(d)第四梯度;(e)喀斯特山区;(f)四个梯度对比

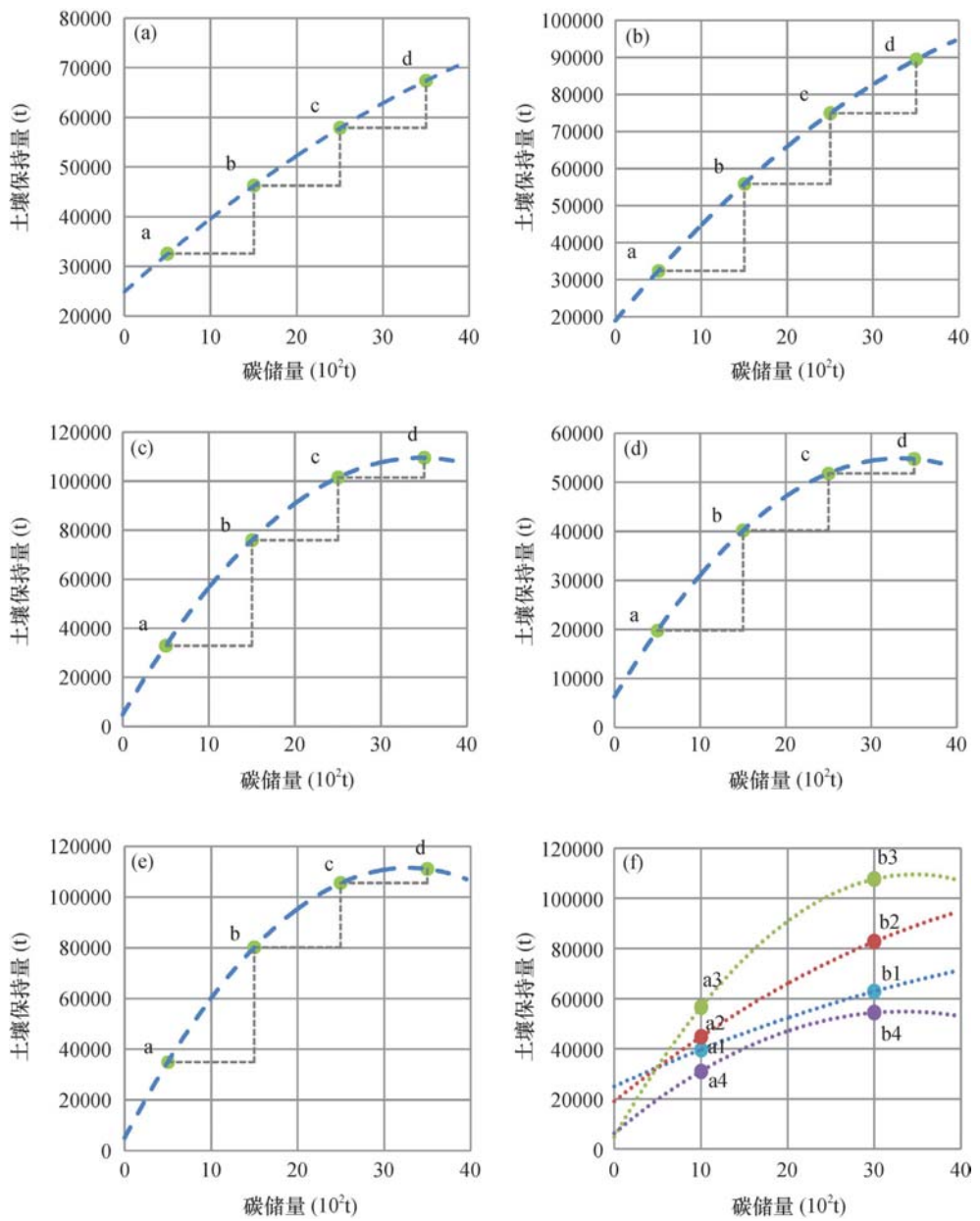


图 5-9 土壤保持量和碳储量的生产可能性边界曲线

(a)第一梯度;(b)第二梯度;(c)第三梯度;(d)第四梯度;(e)喀斯特山区;(f)四个梯度对比

在各个梯度,随着碳储量的增加,土壤保持量的增加量有不断减少的趋势。在第一梯度,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点增加 1000t 的碳储量,土壤保持量则分别增加 13702.8t、11635.6t、9568.4t(图 5-9a);在第二梯度,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点增加 1000t 碳储量,土壤保持量的增长量分别为 23499.8t、18999.6t、14499.4t(图 5-9b);在第三梯度,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点增加 1000t 的碳储量,土壤保持量分别增加 43036.8t、25551.6t、8066.4t(图 5-9c);在第四梯度,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点增加 1000t 碳储量,土壤保持量则分别增加 20405.2t、11658.4t、2911.6t(图 5-9d)。

总体上,随着碳储量的增加,土壤保持量也逐渐增加,且增加的量会越来越小。从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点增加 1000t 碳储量,土壤保持量的增量分别为 45137.00t、25346.00t、5555.00t。对比不同梯度的生产可能性边界曲线可以看出:第三梯度>第二梯度>第一梯度>第四梯度,增加 1000t 碳储量,第一梯度可以实现 23271t 土壤保持量的增加(从点 a1 到点 b1),第二梯度则可以实现 37999.2t 土壤保持量的增长(从点 a2 到点 b2),第三梯度增加的土壤保持量最多,为 51103.2t(从点 a3 到点 b3),而第四梯度土壤保持量的增量为 23316.8t(从点 a4 到点 b4)。

五、土壤保持与营养截留的关系

从土壤保持和营养截留量的生产可能性边界曲线可以看出(图 5-10),喀斯特山区土壤保持量和营养截留量存在权衡关系,随着土壤保持量的增加,营养截留量不断减少,将营养截留量作为土壤保持量的机会成本,不同梯度想要获得一定的土壤保持量,所付出的机会成本不一。

在第一、二、四梯度,随着土壤保持量的增加,营养截留量减少的量不断减少。在第一梯度,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点分别减少 $108.65 \times 10^2 \text{ kg}$ 、 $40.95 \times 10^2 \text{ kg}$ 、 $14.47 \times 10^2 \text{ kg}$ 的营养截留量可以实现 20000t 土壤保持量的增长(图 5-10a);在第二梯度,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点分别减少 $66.4 \times 10^2 \text{ kg}$ 、 $46.41 \times 10^2 \text{ kg}$ 、 $27.05 \times 10^2 \text{ kg}$ 的营养截留量则可以实现 20000t 土壤保持量的增长(图 5-10b);在第四梯度,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点分别减少营养截留量 $154.14 \times 10^2 \text{ kg}$ 、 $108 \times 10^2 \text{ kg}$ 、 $52 \times 10^2 \text{ kg}$,可以实现 20000t 土壤保持量的增长(图 5-10c)。

而在第三梯度,随着土壤保持量的增加,营养截留量减少的量逐渐增加,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点分别减少营养截留量 $40 \times 10^2 \text{ kg}$ 、 $44 \times 10^2 \text{ kg}$ 、 $48 \times 10^2 \text{ kg}$,可以实现 20000t 土壤保持量的增长(图 5-10d)。

总的来说,随着土壤保持量的增加,营养截留量的减少的量在逐渐减少,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点分别减少 $80 \times 10^2 \text{ kg}$ 、 $49 \times 10^2 \text{ kg}$ 、 $42 \times 10^2 \text{ kg}$ 的营养截留量可以实现 20000t 土壤保持量的增长(图 5-10e)。

对比喀斯特山区土壤保持与营养截留的生产可能性边界曲线,大致有第二梯度>第三梯度>第一梯度>第四梯度的趋势(图 5-10f),要获得 20000t 土壤保持量的增

长,第一梯度减少的营养截留量为 $54.69 \times 10^2 \text{ kg}$ (从点 a1 到点 b1),第二梯度减少的营养截留量为 $44 \times 10^2 \text{ kg}$ (从点 a2 到点 b2),第三梯度减少的量为 $46.62 \times 10^2 \text{ kg}$ (从点 a3 到点 b3),第四梯度减少的量最少,为 $33.33 \times 10^2 \text{ kg}$ (从点 a4 到点 b4)。

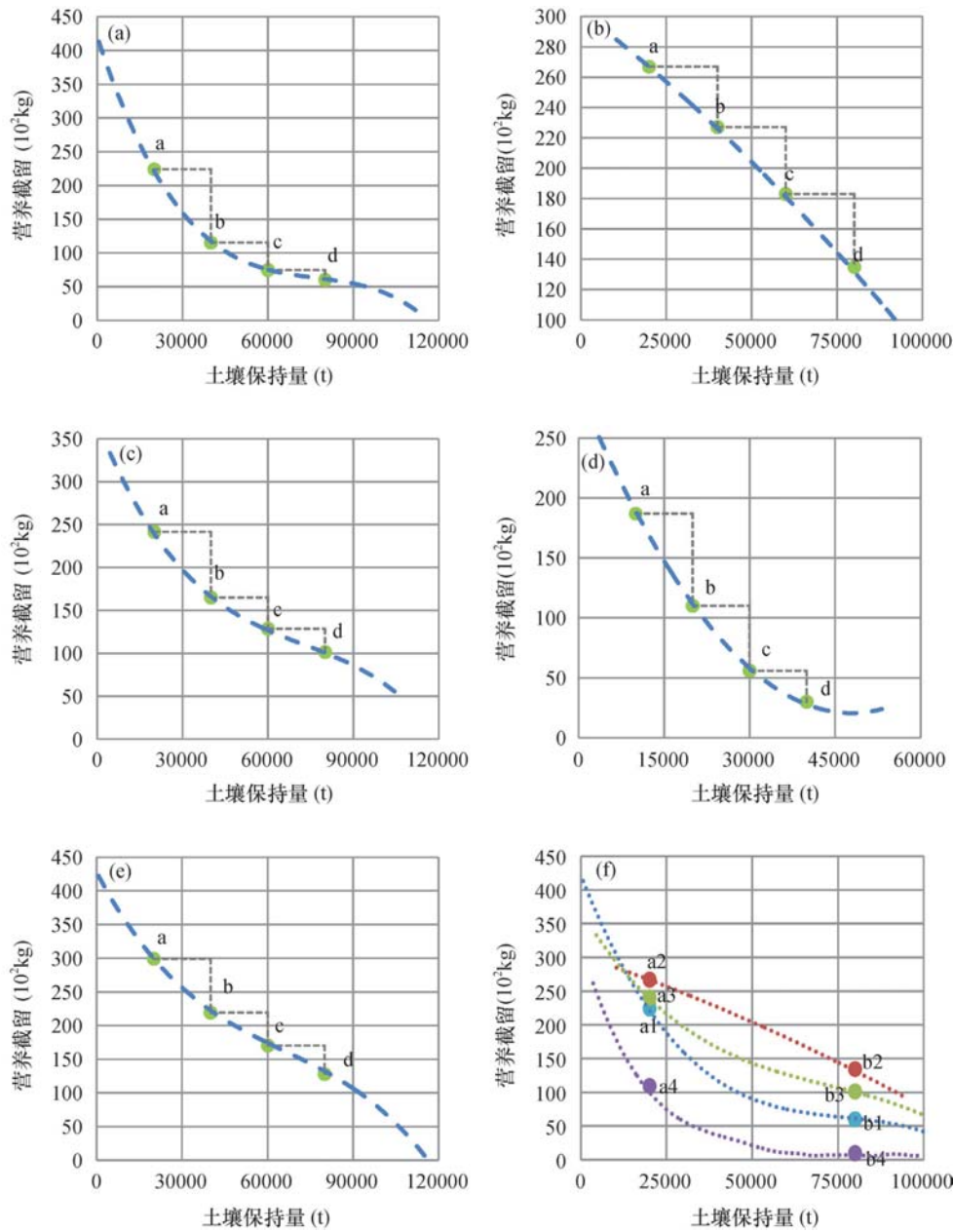


图 5-10 土壤保持量与营养截留生产可能性边界曲线

(a)第一梯度;(b)第二梯度;(c)第三梯度;(d)第四梯度;(e)喀斯特山区;(f)四个梯度对比

从研究结果可以看出,产水量和营养截留量为权衡关系,产水量和土壤保持量为权衡关系,而土壤保持量和营养截留量也存在权衡的关系,其主要原因在于:首先,土壤保持和营养截留量在数量上差异较大,高值极高,低值较小;其次,土壤保持量极值分布和营养截留极值在空间分布上存在较大差异,营养截留量的高值区主要分布于河流沿岸区域,海拔较高的区域则为营养截留量低值区,而土壤保持量的高值区主要则分布于海拔较高的区域,河流沿岸等海拔较低的区域土壤保持量相对较小,因而导致了土壤保持量高值区的营养截留量较小,土壤保持量低值区的营养截留量较大,所以两者的生产可能性边界曲线表现为减函数,存在权衡关系。

六、碳储量与营养截留的关系

从碳储量和营养截留量的生产可能性边界曲线可以看出(图 5-11),碳储量和营养截留量存在协同关系,随着碳储量的增加,营养截留量不断增加,将营养截留量作为土壤保持量的机会成本,不同梯度想要获得一定的土壤保持量,所付出的机会成本不一。

在第一梯度,随着碳储量的增加,营养截留量的增量逐渐减少,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点分别增加 $104.26 \times 10^2 \text{ kg}$ 、 $99.64 \times 10^2 \text{ kg}$ 、 $95.02 \times 10^2 \text{ kg}$ 的碳储量可以实现 1000t 碳储量的增长(图 5-11a)。

而在第二、三、四梯度,随着碳储量的增加,营养截留量的增量有逐渐增加的趋势。在第二梯度,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点分别增加 $53.41 \times 10^2 \text{ kg}$ 、 $68.63 \times 10^2 \text{ kg}$ 、 $83.85 \times 10^2 \text{ kg}$ 的碳储量可以实现 1000t 碳储量的增长(图 5-11b);在第三梯度,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点分别增加 $54.78 \times 10^2 \text{ kg}$ 、 $80.90 \times 10^2 \text{ kg}$ 、 $107.02 \times 10^2 \text{ kg}$ 的碳储量可以实现 1000t 碳储量的增长(图 5-11c);在第四梯度,从 a 点到 b 点、b 点到 c 点、c 点到 d 点分别增加 $56.68 \times 10^2 \text{ kg}$ 、 $67.33 \times 10^2 \text{ kg}$ 、 $77.99 \times 10^2 \text{ kg}$ 的碳储量可以实现 1000t 碳储量的增长(图 5-11d)。

总的来说,随着碳储量的增加,营养截留量的增量不断增加,即从 a 点到 b 点,b 点到 c 点、从 c 点到 d 点分别增加 $61.29 \times 10^2 \text{ kg}$ 、 $100.67 \times 10^2 \text{ kg}$ 、 $140.05 \times 10^2 \text{ kg}$ 的碳储量可以实现 1000t 碳储量的增长(图 5-11e)。

从各个梯度碳储量与营养截留量的生产可能性边界曲线可以看出:第一梯度略大于其他三个梯度,而二、三、四梯度的生产可能性边界曲线相差不大(图 5-11f)。总体上,增加 1000t 碳储量,第一梯度增加的营养截留量最多,为 $99.64 \times 10^2 \text{ kg}$ (从点 a1 到点 b1),第三梯度的增长量次之,为 $80.90 \times 10^2 \text{ kg}$ (从点 a3 到点 b3),第二和第四梯度营养截留量的增长量相当,分别为 $68.63 \times 10^2 \text{ kg}$ (从点 a2 到点 b2)、 $67.33 \times 10^2 \text{ kg}$ (从点 a4 到点 b4)。

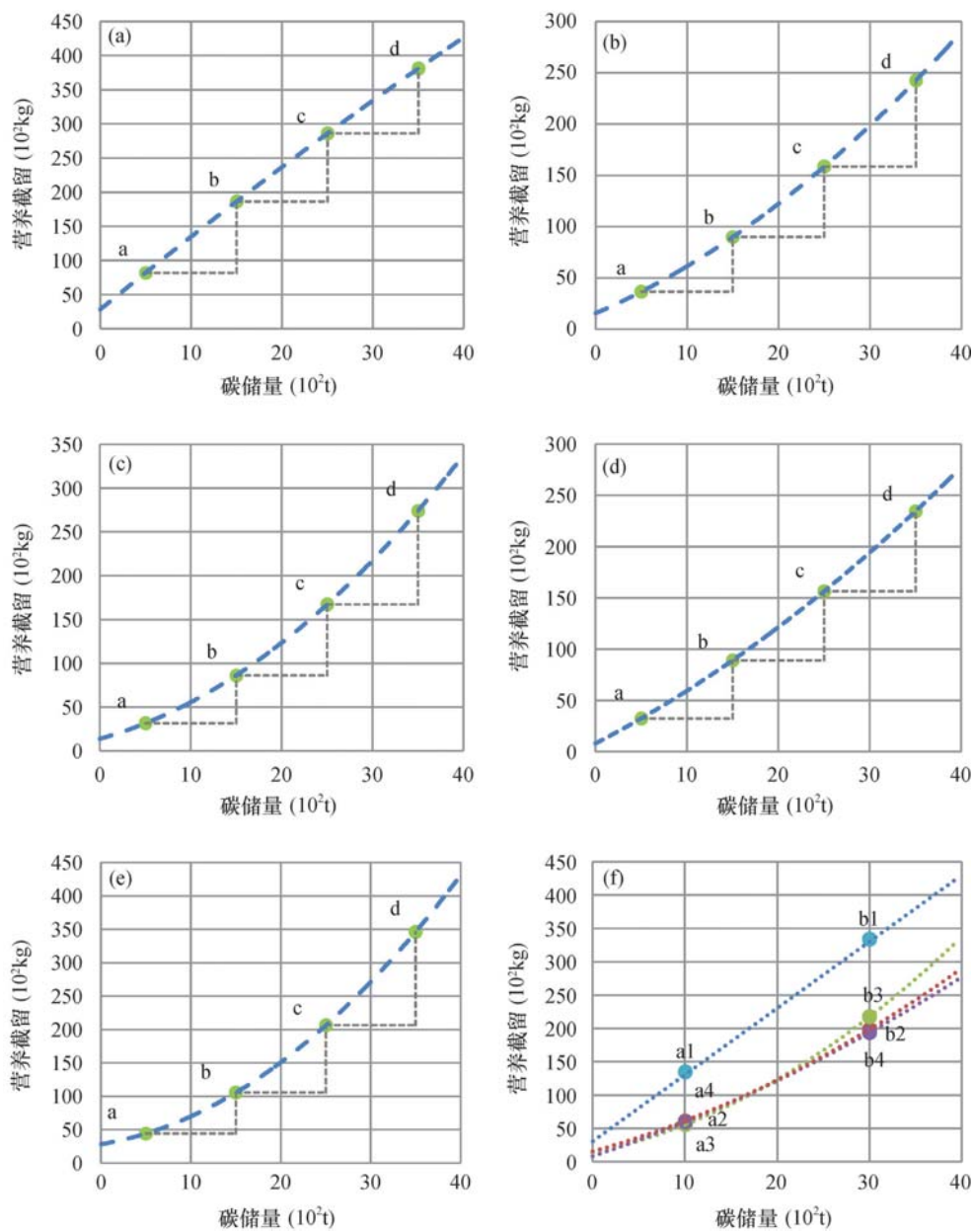


图 5-11 碳储量与营养截留量的生产可能性边界曲线

(a)第一梯度;(b)第二梯度;(c)第三梯度;(d)第四梯度;(e)喀斯特山区;(f)四个梯度对比

第三节 未来土地利用变化模拟及其影响

本节模拟了不同情景下喀斯特山区生态服务功能空间分布,寻求生态服务功能的最佳总体效益,评估未来情景下喀斯特山区生态服务功能的变化,对喀斯特山区生态系统保护、水土流失和石漠化治理、土地利用规划和生态系统管理决策等提供理论支持,为喀斯特山区生态保护与社会经济协调发展战略提供科学依据,有利推进喀斯特山区可持续发展。

一、喀斯特山区土地利用变化情景模拟

根据 CLUE-S 模拟原理,本节利用 2005 年和 2010 年喀斯特山区土地利用现状图,模拟喀斯特山区不同情景下 2030 年的土地利用变化情况。

首先,进行驱动因子的选取。不同驱动因素对土地利用变化的影响与控制作用是不同的。为了更为清晰地刻画与揭示不同因素对土地利用变化的控制与影响作用,本节选取了 DEM、人口、GDP、距河流距离、到国道的距离、到省道的距离、到铁路距离、到城镇居民点的距离、到农村居民点的距离、土壤类型、地貌类型作为土地利用驱动因子,如图 5-12 所示。

运用逐步回归的方法,对每类地类和驱动因子进行回归运算,将不能解释土地利用格局的变量从回归结果中剔除,并对每种地类的回归方程拟合度进行 ROC 曲线检验,根据曲线下的面积来判断计算出的地类概率分布格局与真实土地利用格局的一致性。一般认为,当 ROC 值大于 0.7 时,所选取的驱动因子对土地利用格局具有较好的解释能力,经计算,六类土地利用类型驱动因子 ROC 检验值均在 0.7 以上,说明本节所选的驱动因子对土地利用格局具有较好的解释,可以进行预测。

其次,检验模型的准确性。利用喀斯特山区 2005 年土地利用空间分布图模拟喀斯特山区 2010 年实际的土地利用空间分布图,再用喀斯特山区 2010 年实际的土地利用空间分布图进行精度验证,本节利用 Kappa 指数定量验证模拟精度,其计算公式如下:

$$\text{Kappa 系数} = (P_o - P_c) / (P_p - P_c) \quad (5-1)$$

式中, P_o 为正确模拟的比例, P_c 为随机情况下期望的正确模拟比例, P_p 为理想分类情况下正确的模拟比例,Kappa 系数在 0.85 以上,说明模拟结果较为理想,经计算,模拟结果的 Kappa 系数为 0.9087,说明模拟结果良好。

最后,进行情景模拟。本节主要对以下三个情景进行模拟。

(1) 自然增长情景:该情景下,土地利用变化主要依照 2005—2010 年的变化速率,基于 2005 年喀斯特山区土地利用数据,模拟 2030 年喀斯特山区的土地利用变化情况。该情景下,面积分配大致为:耕地 25.29%、林地 57.48%、草地 12.97%、水域 1.52%、建设用地 2.72%、未利用地 0.02%。

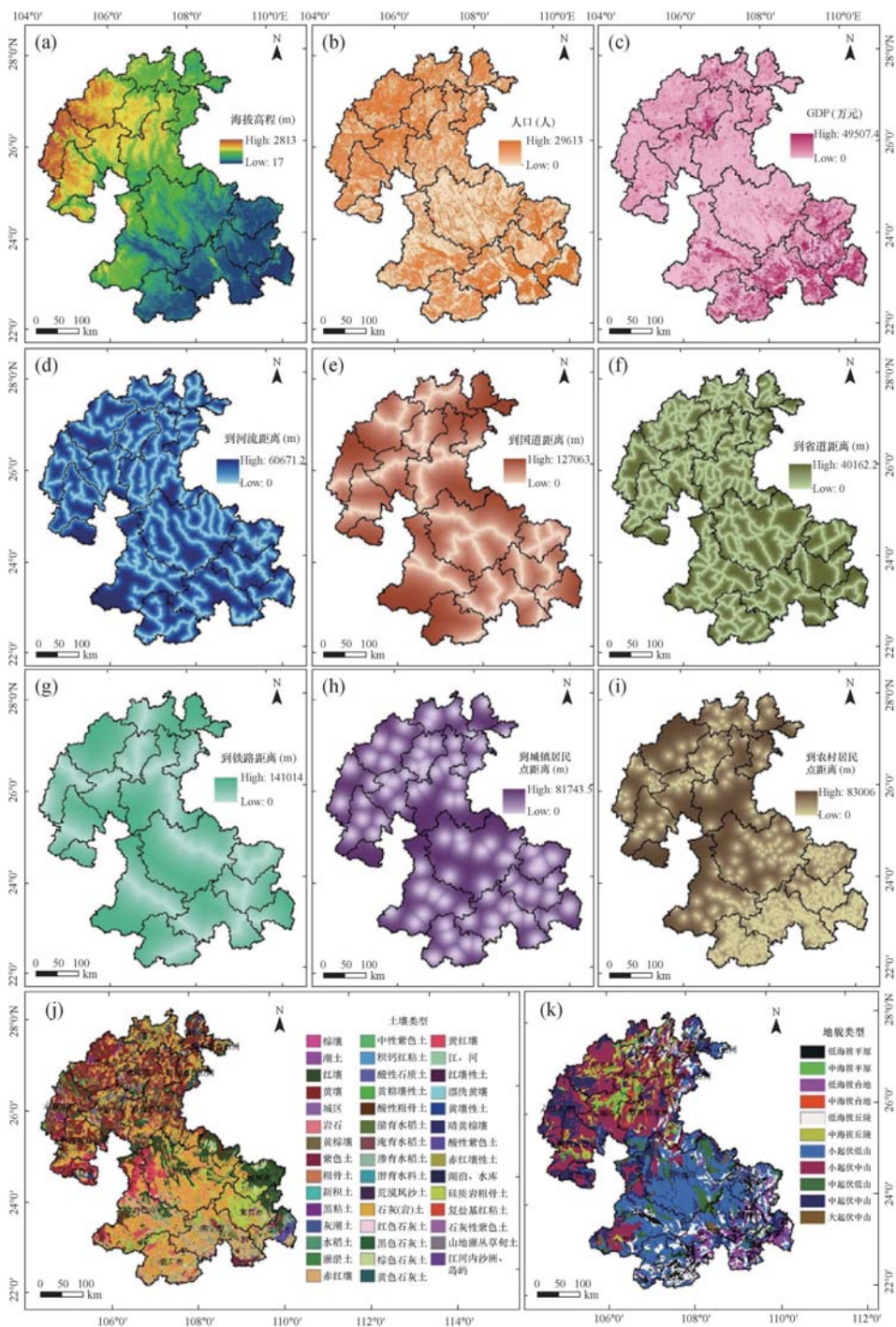


图 5-12 土地利用驱动因子分布图

(2)经济发展情景:在该情景下,主要以发展经济为主,建设用地和耕地的面积呈大幅度增长趋势,而林地和草地则有不同程度的减少。该情景下,面积分配大致为:耕地 30%、林地 53%、草地 10.98%、水域 1%、建设用地 5%、未利用地 0.02%;

(3)生态保护情景:该情景主要以保护生态环境为主,该情景下,林地和草地的面积增长速率较快,耕地面积有所减少,建设用地缓慢增长,面积分配大致为:耕地 20%、林地 60%、草地 15.5%、水域 1%、建设用地 3.48%、未利用地 0.02%。

模拟结果如图 5-13 所示。

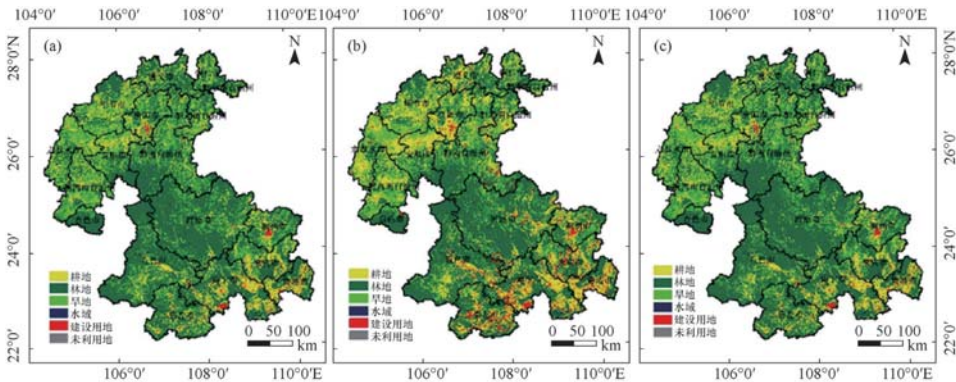


图 5-13 喀斯特山区土地利用空间分布情景模拟
(a)自然增长情景;(b)经济发展情景;(c)生态保护情景

三种情景下各类土地利用类型面积不同,空间分布不一。自然增长情景下,较之 2010 年土地利用情况,中部地区林地大面积增加,北部、南部和东南地区建设用地面积有所增加,相应的草地和耕地面积有所减少,耕地的分布更为集中;经济发展情景下,与 2010 年土地利用情况相比,区域内南部、东南部、北部和西北部地区耕地和建设用地有大面积的增加,且分布更加集中,相应的,草地和林地的面积有大面积减少;生态保护情景下,区域内林地面积有大范围的增长,草地和建设用地也有少量的增长,耕地面积有所减少且分布更加集中。

二、喀斯特山区生态服务功能模拟

在其他参数保持 2010 年的参数不变,并改变土地利用的情况下,运用 InVEST 模型评估上述 3 种情景下产水量、土壤保持、碳储量和营养截留四项生态服务功能,并将 2010 年的生态服务功能作为实际情景与其他三种模拟情景进行比较分析。

不同情景下,由于土地利用情况不一,各项生态服务功能存在较大的差异。

空间上,喀斯特山区自然增长情景、经济发展情景和生态保护情景下产水量均有由西北向东南逐渐增加的趋势;土壤保持量高值区分布于喀斯特山区西北部、中

部和西南部地区,土壤保持量低值区则分布于而北部、南部和东南部区域为;碳储量空间分布总体呈现为由中部地区向两端递减趋势,碳储量的高值区分布于植被覆盖度较高的区域;营养截留量的高值区(大于 $1000\text{kg}/\text{km}^2$)零星分布于整个喀斯特山区,而区域内绝大部分地区营养截留量都在 $1000\text{kg}/\text{km}^2$ 以下(图 5-14)。

与实际情景相比,各情景情况如下。

(1)自然增长情景。西北六盘水市和安顺市、北部遵义和贵阳市、东南部贵港市和柳州市、西部黔西南自治州以及南部南宁市的平均产水量均有不同程度的增加,增长量在 $0\sim 10\text{mm}$,而其他区域则有不同程度的减少,减少的量在 $0\sim 12\text{mm}$;中部黔南自治州和河池市、西北部毕节市和安顺市、东南部来宾市、西南部百色市平均土壤保持量均在增长,增长量在 $200\sim 1400\text{t}/\text{km}^2$,而其他区域平均土壤保持量则在减少,减少量在 $0\sim 1500\text{t}/\text{km}^2$;东南部柳州市和来宾市、西南部百色市、西北部毕节市、中部黔南自治州和河池市、东北部黔东南自治州和铜仁市、南部崇左市平均碳储量均在增加,增长量在 $0\sim 200\text{t}/\text{km}^2$,其他区域平均碳储量均在减少,减少量在 $0\sim 150\text{t}/\text{km}^2$;东北部黔东南自治州、东南部贵港市、西北部六盘水市和安顺市、北部贵阳市和遵义市、西部黔西南自治州的平均营养截留量均在增加,增长量在 $0\sim 100\text{kg}/\text{km}^2$,其他区域的平均营养截留量则在减少,减少量在 $0\sim 100\text{kg}/\text{km}^2$ 。

(2)经济发展情景。喀斯特山区平均产水量均在增长,其中西北部六盘水市、北部贵阳市、南部崇左市的平均产水量增加量均在 26mm 以上;西南部百色市、西部黔西南自治州、南部崇左市和东南部来宾市的平均土壤保持量均在增加,增长量在 $0\sim 1500\text{t}/\text{km}^2$,而其他区域的平均土壤保持量均在减少,减少量在 $0\sim 5000\text{t}/\text{km}^2$;喀斯特山区平均碳储量均在减少,其中,北部贵阳市和遵义市、西北部六盘水市平均碳储量减少最多,减少量均在 $400\text{t}/\text{km}^2$ 以上;东南部来宾市和西南部百色市的平均营养截留量在减少,减少的量在 $0\sim 50\text{kg}/\text{km}^2$,而其他区域平均营养截留量皆在增加,增长量在 $0\sim 200\text{kg}/\text{km}^2$ 。

(3)生态保护情景。西北部六盘水市、北部遵义和贵阳市、东南部贵港市以及西部黔西南自治州的平均产水量均有不同程度的增加,增长量在 $0\sim 12\text{mm}$,而其他的区域年平均产水量均有不同程度的减少,减少的量在 $0\sim 15\text{mm}$;中部黔南自治州和河池市、东南部柳州市和来宾市、西北部毕节市和安顺市、西南部百色市、东北部铜仁市、南部南宁市平均土壤保持量呈增长趋势,增长量在 $0\sim 1800\text{t}/\text{km}^2$,其他区域平均土壤保持量则在减少,减少量在 $0\sim 1800\text{t}/\text{km}^2$;北部贵阳市和遵义市、西北部六盘水市和安顺市、东南部贵港市平均碳储量均在减少,减少量在 $0\sim 200\text{t}/\text{km}^2$,其他区域平均碳储量则在增加,增加量在 $0\sim 250\text{t}/\text{km}^2$;西北部六盘水市和安顺市、西部黔西南自治州、北部贵阳市和遵义市的平均营养截留量均在增加,增长量在 $0\sim 100\text{kg}/\text{km}^2$,其他区域平均营养截留量均在减少,减少量在 $0\sim 150\text{kg}/\text{km}^2$ 。

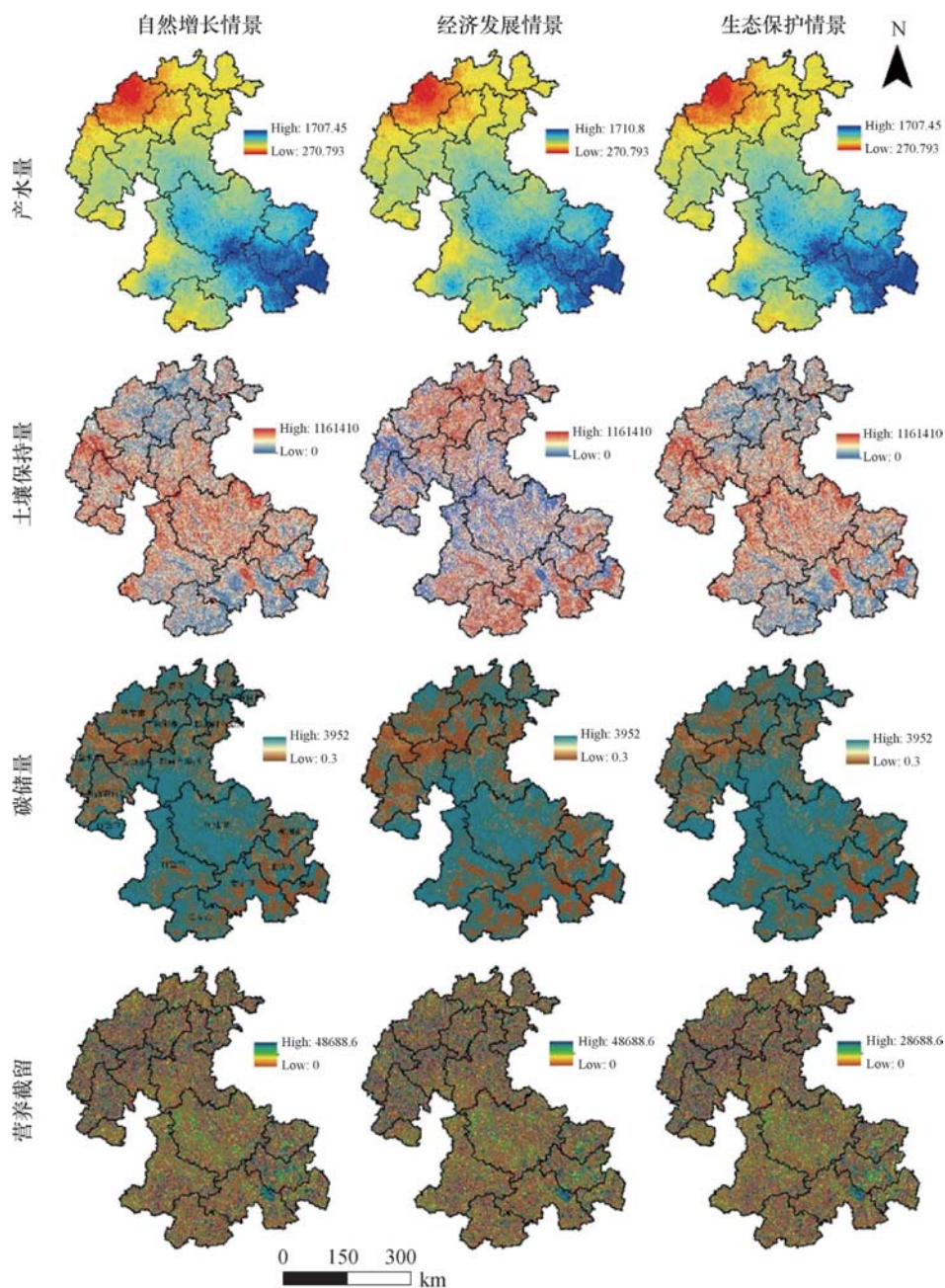


图 5-14 不同情境下喀斯特山区生态服务功能评估

从表 5-14 可以看出,与实际情景相比,经济发展情景下,区域平均产水量、平均土壤保持量、平均碳储量、平均营养截留量分别增加了 19.96mm (1.34%)、-368.92t/km² (-0.36%)、-198.87t/km² (-6.47%)、45.51kg/km² (7.51%);自然增长情景下,平均产水量、平均土壤保持量、平均碳储量、平均营养截留量分别增加了 -2.86mm (-0.30%)、414.66t/km² (0.40%)、42.04t/km² (1.36%)、-20.29kg/km² (-3.35%);生态保护情景下,平均产水量、平均土壤保持量、平均碳储量、平均营养截留量分别增加了 -4.76mm (-0.49%)、659.36t/km² (0.64%)、69.38t/km² (2.25%)、-36.37kg/km² (-6.00%)。

表 5-14 不同情景下平均生态系统服务功能

	平均产水量(mm)	平均土壤保持量 (t/km ²)	平均碳储量 (t/km ²)	平均营养截留量 (kg/km ²)
实际情景	968.1007	103590.1908	3073.6179	605.8956
自然增长情景	965.2426	104004.8554	3115.6567	585.6046
生态保护情景	963.3418	104249.5465	3143.0041	569.5278
经济发展情景	981.0664	103221.2688	2874.7468	651.4087

各情景下,区域平均产水量情况为:经济发展情景>实际情景>自然增长情景>生态保护情景;平均土壤保持量情况为:生态保护情景>自然增长情景>实际情景>经济发展情景;平均碳储量情况为:生态保护情景>自然增长情景>实际情景>经济发展情景;平均营养截留量情况为:经济发展情景>实际情景>自然增长情景>生态保护情景;平均生境质量情况为:生态保护情景>自然增长情景>实际情景>经济发展情景。

从生态服务功能的总体效益来看,将模拟的生态服务数据进行标准化,自然增长情景略大于生态保护情景,但是生态保护情景和自然增长情景均小于实际情景,而总量最高的是经济发展情景,为 2.2668,经济发展情景的总体效益最高(表 5-15)。由此可见,总体上,经济发展情景下更加有利于喀斯特山区生态服务功能的发展。

表 5-15 生态系统服务功能情景模拟标准化数据

	产水量	土壤保持	碳储量	营养截留	总量
实际情景	0.2682	0.5295	0.7862	0.4439	2.0279
自然增长情景	0.1072	0.8255	0.8981	0.1963	2.0272
生态保护情景	0.0000	1.0000	1.0000	0.0000	2.0000
经济发展情景	1.0000	0.2668	0.0000	1.0000	2.2668

生态保护情景下,建设用度和耕地面积比重加大,建设用地的比重越大,区域的产水量越大,经济发展有利于产水量的增加,然而经济发展是以减少林地面积和破

坏生态环境为代价,这与我国实行的“退耕还林还草”政策有悖。事实上,“退耕还林还草”政策的推行,在很大程度上减缓了喀斯特山区的水土流失状况和石漠化速率,但是林地的增加会对喀斯特山区的产水量带来负面影响,林地的增加使得产水量减少,即改善了区域的水土流失情况,但是降低了区域的产水功能,导致了生态服务功能之间的权衡,面对水资源紧缺、水土流失、石漠化日益严重等问题,协调好区域土壤保持功能和产水量功能尤为重要,在进行生态建设的同时,要结合区域的产水量变化,提出综合的水土流失治理方案,发挥水资源的最大效用,加大水资源的环保执法力度,防治水污染,提高水利投资,增强节水意识,同时,通过实施生态工程、人工改良退化草地等措施促进节约用水能力,增加供水量,有效地解决区域水供给问题。