

贵州山区公路沿线生态系统服务价值变化

郜红娟 韩会庆 王后阵

(1. 贵州师范学院 地理与旅游学院, 贵州 贵阳 550018;
2. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 为探讨山区公路沿线土地利用变化对生态系统服务价值 (Ecosystem service value: ESV) 的影响, 以贵州省麻江县 309 省道为例, 基于 1992、2002、2012 和 2032 年土地利用数据和中国陆地生态系统服务单位面积 ESV 系数, 对 309 省道沿线土地利用变化所引起的 ESV 变化进行估算。结果表明: 1) 研究期间, 耕地和草地持续减少, 建设用地不断增加, 而不同时期的林地、水域和未利用地或增或减。2) 1992—2032 年间, 除情景 B 外, 情景 A 和 C 的 ESV 均不断增加。各地类的 ESV 变化趋势与各地类面积变化一致。除情景 B 外, 情景 A 和 C 的各种 ESV 均不断增加。越靠近公路的缓冲区, ESV 变化越剧烈, 不同时期, 各缓冲区 ESV 变化存在差异。3) 快速经济发展、退耕还林政策、地形限制等是影响公路沿线 ESV 变化的主要因素。

关键词: 山区公路土地利用变化; 生态系统服务价值; 情景分析; 贵州省道

中图分类号: F301.2

生态系统为人类提供了食物、淡水、气候调节、水土保持、休闲娱乐、生物多样性等多种服务, 它们对人类和经济发展具有重要的贡献。然而, 过去几十年, 人类活动已使生态系统服务发生了快速、剧烈的改变, 并且越来越不能满足人们对生态系统服务的需求。目前, 生态系统服务主要受人口增长、经济发展、气候变化、技术改进等因素影响。而由人类活动引起的土地利用变化是生态系统服务改变的重要驱动因素, 它通过引起各种生态系统类型、面积以及空间分布格局的变化, 直接影响生态系统服务的种类和强度。

山区公路的建设推动了沿线经济的发展, 引起了沿线建设用地的快速增加。另一方面, 随着我国西部山区实施退耕还林还草政策实施, 导致大量耕地转为林地, 这也势必影响山区公路沿线土地利用变化的方向, 这种快速的土地利用转化将对公路沿线生态系统产生重要影响, 从而直接影响公路沿线生态系统服务供给水平。

目前, 针对公路沿线生态系统服务的研究主要集中于公路建设对生态系统服务损失的影响, 公路建设前后的 ESV 变化等。其研究方法主要采用 ESV 系数法和指标法。然而, 当前的研究多集中于平原地区, 较少涉及山区公路这一特殊类型, 而且多数研究关注公路建设前后公路沿线生态系统服务的研究, 很少关注未来山区公路沿线政策变化对生态系统服务的影响。贵州 309 省道麻江段地处我国西南喀斯特山区, 公路沿线地形以山地为主。近几十年, 受退耕还林还草工程以及西部大开发政策影响, 该区坡耕地大幅减少, 自然植被不断恢复, 建设用地大量

增加，土地利用的巨大变化势必影响该区生态系统功能，进而影响生态功能价值。因此以贵州省麻江县 309 省道为例，探讨山区公路沿线过去和未来土地利用变化对 ESV 的影响，以期为山区公路沿线土地利用优化和区域环境保护提供科学依据。

1. 材料与方法

1.1 研究区概况

309 省道麻江段位于贵州省的东南部，麻江县西部，东起杏山镇，经景阳乡、谷硐镇、坝芒乡进入贵定县，其中麻江段全长约 50km（图 1）。公路沿线高程介于 838-1793m 之间，东低西高，沿线地貌多以中山峡谷为主，地形起伏大。气候属亚热带季风湿润气候，年平均气温 14℃，年降雨量约 1300mm。

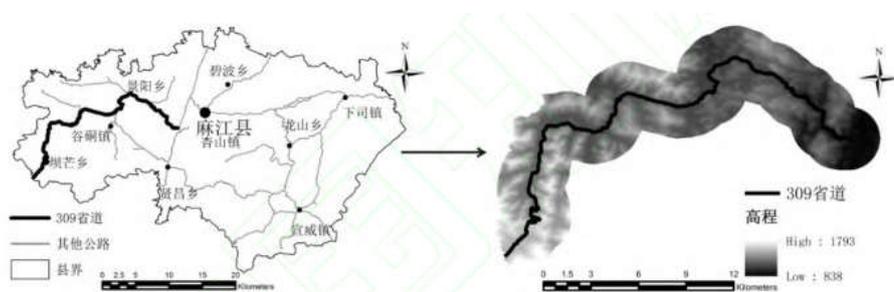


图 1 研究区位
Fig. 1. Study area location

1.2 数据来源及处理

由于地形的限制，根据专家意见及实地调研，将 309 省道影响范围界定为沿线 2km。然后利用 ArcGIS 软件将公路影响范围划分为 4 个缓冲区，即：0-500、500-1000、1000-1500 和 1500-2000m。

公路沿线土地利用数据来源于麻江县国土资源局提供的 1992、2002 和 2012 年土地利用数据库。采用中国土地资源分类系统，将 3 期土地利用类型划分为耕地、林地、草地、建设用地、水域和未利用地（图 2）。

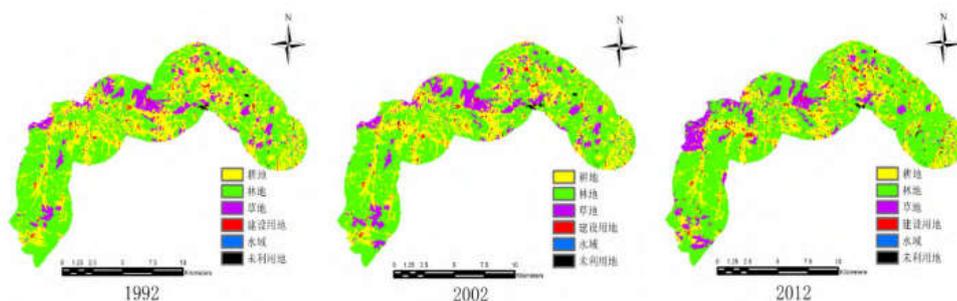


图 2 1992, 2002 和 2012 年公路沿线土地利用图
Fig. 2. Land use maps along the road for 1992, 2002 and 2012

公路、城镇、河流分布数据来源于 2005 年贵州省地图集；人口密度和农田产量数据来源于黔东南州 2010 年人口普查资料和麻江县统计年鉴（1991—2013）；土壤类型分布数据来源于麻江县农业区划（1989 年）。高程与坡度数据来自美国国家航空航天局(NASA)公布的 ASTERGDEM 数据，空间分辨率为 30m×30m。将 3 期土地利用、城镇、河流、人口密度、土壤类型、坡度和高程等数据转为分辨率为 70m 的栅格数据，然后，将土地利用和所有驱动因素导入 CLUE-S 模型进行土地利用模拟和预测。

1.3 CLUE-S 模型

CLUE-S 模型主要包括情景设置和政策限制、土地利用类型转换设置、土地利用需求及位置特征等 4 个部分。

1.3.1 情景设置及政策限制

将未来不同土地空间政策分为 3 种情境，即：照常情境 A，基于 1992—2012 年土地利用变化趋势，推断 2013 年至 2032 年土地利用变化趋势；加快经济增长情境 B，优先满足建设用地在经济发展的需求；积极保护情境 C，加快退耕还林还草工程实施，减少建设用地占用耕地、林地和草地。政策限制主要考虑了基本农田保护区和自然保护区。

1.3.2 土地利用类型转换设置

土地利用类型的转换弹性范围介于 0 和 1 之间，弹性越高，土地利用类型越难以转入 [12]。具体设置过程包括：（1）根据 1992—2012 年公路沿线历史土地利用变化特点，发现林地、耕地和未利用地之间的转化突出，因此将其赋值 0.4-0.6 之间；其次，由于水域和建设用地很难转为其他地类，因此将其赋值 0.8-1 之间；最后，鉴于草地转为其他地类不突出，因此，将其赋予 0.7。（2）由于不同情境设置的差异，其土地利用变化特点有所不同。情境 A 土地利用变化保持原历史特点。情境 B 为满足经济发展需要，大量耕地转为建设用地，耕地转为林地，草地比例较小。情境 C 为实现可持续发展，环境保护力度不断加大，这导致耕地转为林地和草地较为突出，而转为建设用地面积较小。鉴于不同情境土地利用变化的差异，将其土地利用类型转换弹性进行了设置（表 1）。

表 1 不同情境土地利用类型转换弹性

情境 type	耕地 Farmland	林地 Woodland	草地 Grassland	建设用地 Built-up land	水域 Water body	未利用地 Unused land
A	0.5	0.5	0.7	0.9	0.8	0.5
B	0.4	0.4	0.7	1	0.9	0.6
C	0.4	0.6	0.7	0.8	0.9	0.4

1.3.3 土地利用需求

在情境 A 中，以土地利用历史变化为基础，利用线性趋势法的方式来推断出 2032 年土地利用需求；基于《麻江县土地利用总体规划（2006—2020 年）》和未来经济增长速度，利用线性插值法推断出情境 B 的 2032 年土地利用需求；根据未来退耕还林工程实施情况，推

断出情境 C 的 2032 年土地利用需求。

1.3.4 区位特征

在本研究中，位置特征包括高程、坡度、土壤类型、公路、城镇、河流、人口密度等。它们是引起土地利用变化的重要因素。位置特征通过逻辑回归模型进行分析：

$$\text{Log} \left(\frac{P_i}{1 - P_i} \right) = \beta_0 + \beta_1 X_{1,i} + \beta_2 X_{2,i} \dots \dots + \beta_n X_{n,i}$$

其中： P_i 是一个网格单元为考虑土地利用类型上的位置发生的概率； i 和 X 是区位因素；该系数 β 通过当前土地利用格局作为因变量的逻辑回归模型进行估算。

利用 ROC 曲线对 Logistic 逐步回归方程的拟合度进行检验，ROC 介于 0.5-1 之间，值越接近 1，说明回归方程对土地利用分布的解释意义越好，相反，越接近 0.5，说明回归方程对土地利用分布的解释意义越差，一般情况，当 ROC 大于 0.7 时，说明回归方程对土地利用分布具有较好的解释意义。该研究中耕地、林地、草地、建设用地、水域和未利用地的 ROC 值分别为 0.83、0.85、0.74、0.89、0.91 和 0.86，其值均大于 0.7，说明确定的驱动因素具有较好的解释能力，可以满足模拟需要。

1.3.5 模拟精度检验

利用 Kappa 系数进行模拟精度检验，其公式为：

$$\text{kappa} = \frac{(P_a - P_c)}{(P_p - P_c)} \quad (1)$$

式中： P_a 等于正确模拟的比例； P_c 等于随机情况下期望的正确模拟比例； P_p 等于理想分类情况下正确模拟的比例。

1.4 ESV 评估

首先，确定研究区生态系统类型及其功能。该区属亚热带喀斯特山区生态系统，根据地物特征将生态系统类型划分为：森林、草地、耕地、河流、人工表面（建设用地）和未利用地 6 种生态系统类型。其中森林生态系统主要提供林木产品、林副产品、森林游憩、涵养水源、固碳释氧、养分循环、净化循环、土壤保持、维持多样性的功能；草地生态系统提供净初级物质生产、碳蓄积与碳汇、调节气候、涵养水源、水土保持、改良土壤、维持生物多样性等功能；耕地提供粮食生产、调节气候、涵养水源、维持营养物质循环、保持水土等功能；河流生态系统提供供水、水产品生产、休闲娱乐、调蓄洪水、蓄积水分、净化功能、生物多样性维持等

；未利用地生态系统提供有机质生产、固碳释氧、水土保持、营养物质积累、生物多样性保育、景观游憩等功能。根据不同生态系统类型生态功能特点将研究区生态系统

其次，根据各生态系统类型的特点，将生态系统类型与土地利用类型进行衔接，森林生态系统等同于林地、草地生态系统等同于草地、河流生态系统等同于水域、人工表面生态系统等同于建设用地、耕地生态系统等同于耕地、未利用地生态系统等同于未利用地。

再次，根据谢高地等[13]在 Costanza 等的研究成果上对全球 ESV 系数进行了调整，提出了适合中国的陆地生态系统单位面积 ESV 当量。由于谢高地等的研究成果是以中国陆地生态系统平均状态为基础，忽视了地区差异。目前的修订方法主要是依据研究区单位面积农田每年自然粮食产量的经济价值进行修订。其中，针对山区而言，文献[14-15]报道，研究者根据研究区特点，对谢高地的 ESV 当量进行了修正，并成功应用于区域生态系统服务价值评估中。因此，笔者参照此方法，对贵州省麻江段 309 省道沿线 ESV 当量进行修正。具体为：1992 至 2012 年麻江县平均粮食产量 4100kg/hm²（水稻与玉米）²，2012 年价格为 2.79 元/kg，从而得知麻江县单位面积农田每年自然粮食产量的经济价值为 11438 元/hm²，根据谢高地当量表计算方法（食物生产价值为当年平均粮食单产市场价值的 1/7），得到研究区食物生产的生态经济价值为 1230 元，最后根据各生态服务功能的比例，获得其他生态服务功能的当量表（表 2），使其符合研究区特点。

$$ESV = \sum (A_k \times VC_k) \quad (2)$$

式中： A_k 为第 k 种土地利用面积， VC_k 为 ESV 系数。

表 2 研究区 ESV 系数

Table 2 ESV of unit area of each land use categories in study area 元/(hm²·a)

服务类型	服务项目	耕地	林地	草地	建设用地	水域	未利用地
Type	item	farmland	woodland	grassland	built-up land	water body	unused land
供给服务	食物生产	1634	163	490	0	163	16
	原材料	163	4248	82	0	16	0
	气体调节	817	5719	1307	0	0	0
调节服务	气候调节	1454	4412	1471	0	752	0
	水源涵养	980	5229	1307	0	33301	29
	废物处理	2680	2141	2141	0	29706	27
支持服务	土壤形成与保护	2386	6373	3186	0	16	48
	生物多样性保护	1160	5327	1781	0	4069	394
文化服务	娱乐文化	16	2092	65	0	7092	0
	合计	11291	35703	11830	0	75115	515

2. 结果与分析

2.1 土地利用变化

1992-2012 年间，林地、草地、建设用地和未来用地不断增加，耕地持续降低，而水域呈波动变化。另外，不同时间阶段地类变化速度有所不同，如 1992-2002 年间草地增加较快，而建设用地则在 2002-2012 年间增加较快。

2012-2032 年间，不同情境的土地利用变化差异较大（表 3 和图 3）。情景 A 的土地利用变化呈现林地和建设用地增加，耕地、草地、水域和未利用地降低；情景 B 建设用地大幅增加（146.5%），其他地类均呈降低趋势。情景 C 与情景 A 的地类变化较为相似，不同之处在于情景 C 较情景 B 的林地增幅明显（16%），未利用地和草地降幅突出（-79.8%和-45.5%），建设用地增幅较小（26%）。

表 3 研究区土地利用变化
Table 3 Land use changes in study area

时间	耕地		林地		草地		建设用地		水域		未利用地	
	Farmland		Woodland		Grassland		Built-up land		Water body		Unused land	
time	面积/hm ²	变化/%	面积/hm ²	变化/%	面积/hm ²	变化/%	面积/hm ²	变化/%	面积/hm ²	变化/%	面积/hm ²	变化/%
1992	4842.2		7573.4		1246.6		239.6		89.7		38.2	
2002	4353.2	-10.1	7891.9	4.2	1399.0	12.2	250.4	4.5	87.2	-2.7	48.0	25.6
2012	3926.9	-9.8	8226.1	4.2	1402.4	0.3	324.4	29.6	99.0	13.5	51.0	6.2
情景 A	3039.0	-22.6	9239.0	12.3	1077.0	-23.2	552.2	70.2	93.6	-5.4	28.9	-43.3
情景 B	3554.5	-9.5	8140.9	-1	1400.9	-0.1	799.7	146.5	91.1	-7.9	42.6	-16.3
情景 C	3206.1	-18.4	9540.8	16	764.9	-45.5	408.7	26	99.0	0	10.3	-79.8

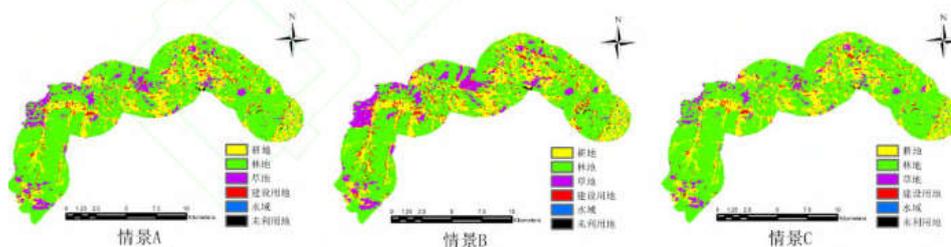


图 3 2032 年公路沿线不同情境土地利用图

Fig. 3. Land use maps along the road for 2032 under different scenarios

2.2 ESV 变化

从整体上看，1992-2012 年间，研究区 ESV 不断增加。而 2012-2032 年间，不同情境的 ESV 变化差异较大（表 4），如情景 A 和情景 C 的 ESV 增加（6.04%和 8.62%），而情景 B 的 ESV 降低（-2.17%）。

从各地类的 ESV 变化看，1992-2012 年间，林地、草地、水域和未利用地的 ESV 增加

，而耕地呈下降趋势。2012-2032 年间，情景 A 和情景 C 的草地、耕地、水域和未利用地的 ESV 下降，而林地的 ESV 增加。然而，情景 B 中，各种地类的 ESV 均下降。

表 4 1992-2032 年研究区 ESV 变化
Table 4 Chm2nges of ESV from 1992 to 2032

时间 time	耕地		林地		草地		建设用地		水域		未利用地		合计	
	Farmland		Woodland		Grassland		Built-up land		Water boby		Unused land		Total	
	ESV	变化	ESV	变化	ESV	变化	ESV	ESV	变化	ESV	变化	ESV	变化	
1992	54.67		270.39		14.75		0.00		6.74		0.02		346.57	
2002	49.15	-10.10	281.77	4.21	16.55	12.22	0.00		6.55	-2.73	0.02	25.64	354.04	2.16
2012	44.34	-9.79	293.70	4.23	16.59	0.25	0.00		7.43	13.48	0.03	6.12	362.09	2.27
情景 A	34.31	-22.61	329.86	12.31	12.74	-23.20	0.00		7.03	-5.45	0.01	-43.27	383.95	6.04
情景 B	40.13	-9.48	290.65	-1.04	16.57	-0.10	0.00		6.85	-7.92	0.02	-16.35	354.22	-2.17
情景 C	36.20	-18.36	340.63	15.98	9.05	-45.46	0.00		7.43	0.00	0.01	-79.81	393.32	8.62

注：ESV 单位为 10^6 元，变化指后期与前期的增减比例，%。

林地变化是引起 ESV 变化的主要因素，情景 A、情境 C 的 ESV 增加以及情景 B 的 ESV 减少与其林地的增减规律一致。情景 C 的 ESV 增加量 > 情景 A 的 ESV 增加量 > 情景 C 的林地增加量 > 情景 A 的增加量有关，这说明林地增加对 ESV 增加具有正面效应。其次，由于建设用地 ESV 系数为 0，因此建设用地扩展对 ESV 增加具有负面效应。与情境 C 相比，情景 A 的 ESV 增加量较小，且建设用地扩张较快，这会对该区生态环境产生较大压力，从而影响该区可持续发展。由于情景 B 的 ESV 呈降低趋势，尽管能满足该区建设用地扩张的需要，但环境的恶化很难使其实现可持续发展。与情境 A 与情境 B 相比，情景 C 建设用地增加量较小，且林地面积增加最大，从而使得情景 C 的 ESV 增加最大，ESV 的大幅增加为该区可持续发展提供良好的基础条件，综上所述，情景 C 为该区未来土地利用调整最优方案（图 4）。

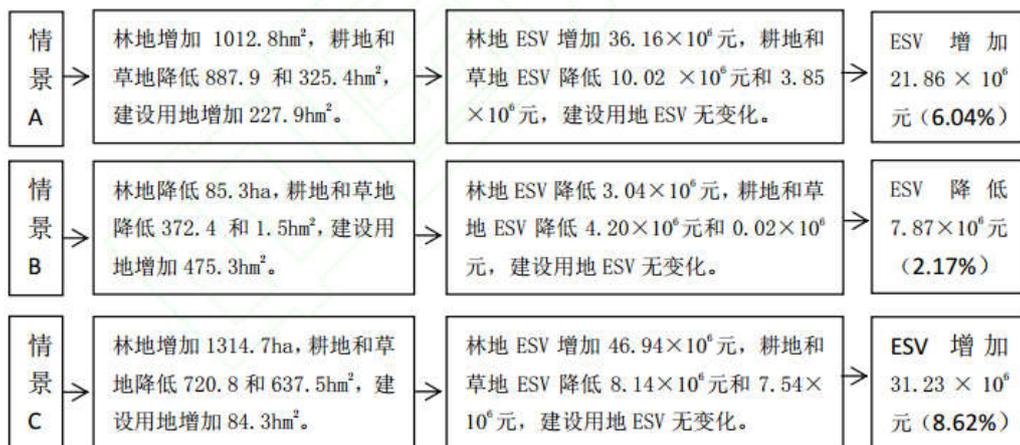


图 4 不同情境 ESV 变化主要因素比较分析

Fig 4Comparative analysis of driving factors for ESV chm2nge under different scenarios

从 ESV 分类角度看，1992-2012 年间，供给服务、调节服务、支持服务和文化服务均持续增加。2012—2032 年间，情景 A 和情景 C 的各种 ESV 也不断增加，而情景 B 却均下降。另外，整个研究期间，支持服务与调节服务在 ESV 变化中一直起着主导作用（图 5）

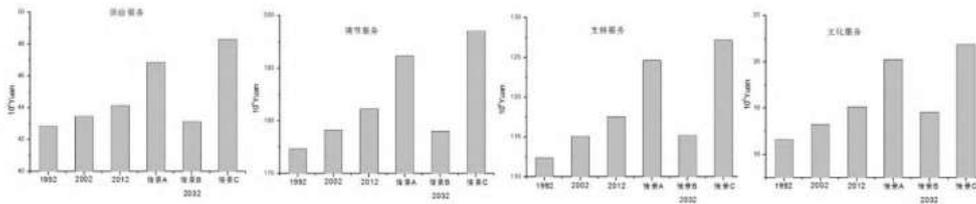


图 5 1992-2032 年 MA 分类下的 ESV 变化

Fig. 5. ESV changes under MA classification system from 1992 to 2032

不同距离缓冲区的 ESV 变化存在较大差异。随着距离的增加，公路沿线 ESV 变化基本上趋于缓慢，而 0-500m 范围的 ESV 变化最为突出。从各时间段来看，1992-2012 年的 ESV 变化主要体现在 0-500m 和 1000-1500m，而 2012-2032 年的 ESV 变化在各距离缓冲区均较明显（图 6）。

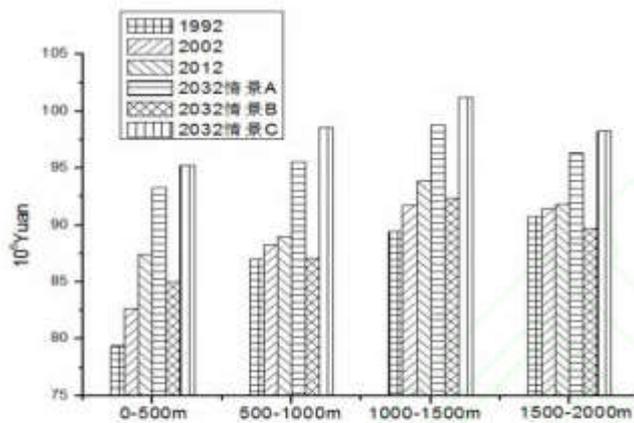


图 6 公路沿线不同距离缓冲区 ESV 变化

Fig. 6. ESV changes in buffer zone along the road

3. 讨论

1) 1992—2012 年间，林地、草地、建设用地和未来用地增加，耕地降低，而水域波动变化。2012—2032 年间，情景 A 林地和建设用地增加，耕地、草地、水域和未利用地降低；情景 B 只有建设用地呈增加趋势；情景 C 未利用地、草地和耕地大幅减少，林地增加突出，而建设用地增加相对缓慢，水域无变化。

2) 1992—2012 年间，研究区 ESV 增加。而在 2012—2032 年间，情景 A 和情景 C 的 ESV 增加，而情景 B 的 ESV 降低；1992—2032 年间，耕地、草地和水域 ESV 降低，除情景 B 外，其他情景林地 ESV 增加，而未利用地 ESV 波动变化；1992—2032 年情景 A 和情景 C 的各种 ESV 均不断增加，而情景 B 却均下降。此外，支持服务与调节服务在 ESV 变化中一直起着主导作用；越靠近公路的缓冲区，ESV 变化越剧烈。1992—2012 年的 ESV 变化主要表现在 0-500m 和

1000-1500m 缓冲区，而 2012—2032 年的 ESV 变化在各距离缓冲区均较明显。

山区公路沿线土地利用剧烈变化反映了人类活动对环境的影响。2000 年，我国开始实施西部大开发计划，西部山区经济发展进入了一个快速增长阶段。山区公路的建设加速了沿线经济发展，使得公路沿线大量耕地转化为建设用地。此外，自 1990s 起，长江和珠江上游防护林计划，退耕还林还草政策逐渐开始实施，这导致大量耕地转化为林地，从而引起研究区 1992-2012 年 ESV 持续增加，其中，林地、建设用地和耕地面积的变化是引起 ESV 变化的主导因素。另外，限制了建设用地的布局，因此建设用地的变化多集中于距离更近的缓冲区（坡度较缓，离公路越近），从而使得 0-500mESV 变化最为突出，而较远的缓冲区变化较慢。其次，未来不同情境 ESV 的变化特点也体现了不同土地利用政策对生态环境的影响，如，情景 C 以保护环境为目标，鼓励自然植被的恢复，控制建设用地扩张，因此其 ESV 呈快速增加趋势，而情景 B 以满足经济发展为目标，建设用地的快速扩张以及自然植被的缩减，势必引起其 ESV 的降低。今后山区公路沿线的发展应根据不同情境 ESV 变化规律选择合适的发展方案，实现经济、生态的可持续发展。

该研究的 ESV 的计算方法以谢高地等的价值系数为基础，简便、快速，能够很好地比较不同时期 ESV 变化规律，但忽略了生态系统的异构性，缺乏生态系统的非线性动态分析。因此，在今后的研究中宜采用多种方法进行比较，以提高评估的准确性。