

喀斯特地区退耕还林工程下生态系统服务 变化与关系分析

高敏^{1,2}, 王勇^{1,2}, 高洁^{1,2}, 王家录³, 毛泳^{1,2}

(1.西南大学 地理科学学院, 重庆 400715; 2.三峡库区生态环境教育部重点实验室,
重庆 400715; 3.安顺学院资源与环境工程学院, 贵州 安顺 561000)

摘要:为了给新形势下退耕还林工程的实施提供科学的理论依据,以贵州省安顺市普定县为研究区域,借助生态系统服务和交易的估价权衡模型(InVEST)测度了普定县 1990 年、2000 年、2010 年、2017 年的土壤保持、产水量、碳储存和生境质量 4 项服务。结果表明:(1) 产水量、碳储量、土壤保持和生境质量服务在 3 个时段生态系统服务变化指数(ESCI)的结果各不相同,如持平 and 倍增。增益及损失范围在空间分布上不相同,同种生态系统服务在不同的时间段上分布也不相同。(2) 4 种主导生态系统服务的分布格局也显示出显著的空间差别:土壤保持主导服务主要分布在山地林地地区;产水量主导服务主要分布在山地林地、建设用地及裸地;碳储量主导服务主要分布在林区;生境质量主导服务分布在水域、林地、草地和耕地。(3) 普定县土壤保持与碳储存服务、土壤保持与生境质量服务、碳储存与生境质量都存在明显的协同关系;土壤保持与产水量存在较好的协同关系。(4) 普定县 4 类及 3 类生态系统服务热点区主要分布在林地和草地地区,且随着退耕还林(草)政策的全面开展,4 类及 3 类热点区面积逐年增加;0 类和 1 类服务热点区主要分布在普定县的建设用地、裸地及耕地地区。

关键词:生态系统服务; 权衡与协同关系; InVEST 模型; 热点区; 喀斯特地区

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0276-08

Analysis on Changes and Relationship of Ecosystem Services in Karst Area Under the Project of Returning Farmland to Forest

GAO Min^{1,2}, WANG Yong^{1,2}, GAO Jie^{1,2}, WANG Jialu³, MAO Yong^{1,2}

(1.College of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2.Key Laboratory of
Ecological Environment of Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Chongqing 400715, China;
3.School of Resources and Environmental Engineering, Anshun University, Anshun, Guizhou 561000, China)

Abstract:In order to provide scientific theoretical basis for the implementation of the project of returning farmland to forest under the new situation, Puding County of Anshun City, Guizhou Province was taken as the research area, four services such as soil conservation, water yield, carbon storage and habitat quality in 1990, 2000, 2010 and 2017 in Puding County were measured by using the value trade-off model of ecosystem services and transactions (InVEST). The results showed that: (1) the ecosystem service change indexes (ESCI) of water yield, carbon storage, soil conservation and habitat quality service in the three periods were different, some indexes remained stable, and the others doubled. The gain and loss ranges were not the same in terms of spatial distribution, and the same kinds of ecosystem services had not the same distributions in different time periods; (2) The distribution patterns of the four dominant ecosystem services also presented the significant spatial heterogeneity; the leading service of water yield mainly distributed in mountainous forestland, construction land and bare land; carbon storage services mainly distributed in forest areas; habitat quality leading services distributed in water body, forestland, grassland and cultivated land; (3) there

收稿日期:2019-05-05

修回日期:2019-06-04

资助项目:重庆市发展和改革委员会学术委员会研究课题(4080491);贵州省科技合作计划项目(黔科合 LH 字[2015]7702 号,黔科合 LH 字[2017]7059 号);贵州省科技计划院士工作站项目(黔科合平台人才[2016]5602);重庆市社会科学规划项目(2018PY60)

第一作者:高敏(1993—),女,山西太原人,硕士研究生,研究方向为地表环境与应用地理。E-mail:294453719@qq.com

通信作者:王勇(1975—),男,山西吕梁人,副教授,博士,主要从事地表环境与应用地理研究。E-mail:wy-ong@swu.edu.cn

were obvious synergistic relationships between soil conservation and carbon storage service, soil conservation and habitat quality service, carbon storage and habitat quality in Puding County; there was a good synergistic relationship between soil conservation and water yield; (4) multiple ecosystem service supply of type 4 and type 3 of hot spots in Puding County mainly distributed in the forest and grassland areas, and with the comprehensive development of the policy of returning farmland to forest (grass), type 4 and type 4 of hot spots area increased year by year; Type 0 and type 1 hot spots mainly distributed in the construction land and cultivated land areas of Puding County.

Keywords: ecosystem services; trade-offs and synergies; InVEST model; hot spot area; karst region

生态系统服务是指人类从生态系统所获得的所有益处,包括供给服务、调节服务、支持服务和文化服务^[1]。生态系统服务具有很强的地域性,喀斯特地区因地质背景复杂、岩溶作用强烈等特殊的生态环境导致生态系统具有环境容量低、敏感度高、稳定性差等特点^[2]。近年来,随着喀斯特地区社会经济的发展,城市化的加剧以及对生态系统需求的不断增加,该区域的水土流失、石漠化、旱涝等自然灾害加剧,生态系统功能退化,提供服务的能力下降,喀斯特生态系统是世界上的一个典型的脆弱生态系统^[3]。

随着国家的重视和人们生态意识的提高,1999年实施退耕还林工程。通过恢复植被、减少水土流失、增加碳储存和改善生态环境,从而恢复受干扰的生态系统,减轻人类对自然生态系统的压力、改善生态系统服务^[4]。然而生态系统是一个整体,某一服务功能的减少或增强会导致其他生态系统服务功能朝相反方向变化(权衡),或者朝同一方向变化(协同),这种复杂的相互关系可能会超出可承受的范围,产生不可逆的影响^[5-7]。因此,明晰生态系统服务之间权衡和协同关系不仅是国际生态学、地理学等学科研究的热点^[8],同时对促进区域多种生态系统服务的协调发展,提高生态系统管理效率,稳定脆弱的生态系统,合理进行国土规划,实现区域经济发展与生态环境保护的“双赢”等具有重要意义。目前,在其他地区各生态系统服务的相互关系研究较多^[9-14],但在喀斯特地区大多数研究结果都局限于退耕还林(草)工程对单一生态系统服务的价值的影响^[15-18],对多种生态系统服务的相互关系研究较少^[19-20]。因此,准确、全面地评价喀斯特地区退耕还林(草)工程下生态系统服务的变化和权衡与协同关系,为生态恢复以及新形势下退耕还林工程的实施提供依据和指导。

普定县位于贵州省安顺市,是我国典型的喀斯特地区,石漠化、水土流失等情况严重。2000年国家林业局确定贵州省普定县是退耕还林(草)试验县。从此,退耕还林工程在此县全面展开。本文基于 InVEST 模型研究 1990 年、2000 年、2010 年及 2017 年的产水量、土壤保

持、碳储存及生境质量 4 种生态系统服务,并探索时空演变特征。基于 3S 技术探讨该区主导生态系统服务在退耕还林(草)前后的时空分布特征以及识别 4 种生态系统服务的热点区。采用相关系数法对 4 种服务之间的权衡和协同进行探究。为喀斯特地区退耕还林(草)工程的进一步实施提供理论支持。并为该地区及相关地区的可持续发展提供决策。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

普定县城位于贵州省的西南部($105^{\circ}27'49''$ — $105^{\circ}58'51''$ E, $26^{\circ}26'36''$ — $26^{\circ}31'42''$ N)(图 1),距安顺市 28 km。辖区总面积为 1 079.93 km²。截至 2017 年,普定县共有 3 个街道、6 个镇、3 个民族乡,总人口数为 50.54 万人,人口密度达到 313 人/km²。地处云贵高原东坡,地势东北西最高,南部次之,中部河谷流域最低,海拔 1 058~1 806 m,岩溶地貌发育非常典型,岩溶面积占全县总面积的 84%,境内植被以亚热带种类为主,农作物以水稻、玉米为主,属于亚热带季风性气候,年平均气温是 15.1℃,年平均日照时数是 1 165 h,无霜期 289 d,年平均降水 1 378 mm,属全省降雨中心地区之一^[21]。

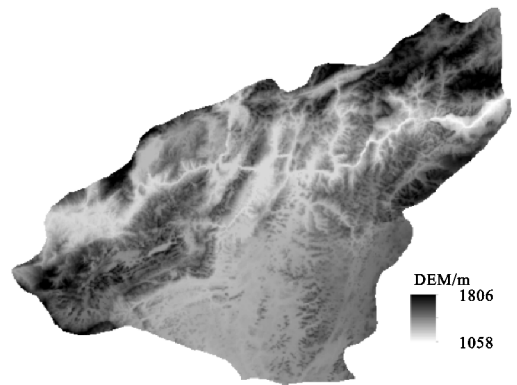


图 1 研究区 DEM

1.2 数据来源

本文应用 InVEST 模型中的产水量、土壤保持、碳储存和生境质量 4 个模块。InVEST 模型所涉及的土地利用类型数据,气象数据来源于普定县国土资

源局、安顺市气象局、中国气象数据网;土壤数据来源于“黑河计划数据管理中心”并经实地调研纠正所得(<http://westdc.westgis.ac.cn>);DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。

2 研究方法

2.1 生态系统服务测算

2.1.1 产水量服务 本文采用 InVEST 模型中的产水模块计算普定县的产水量。该模块基于水量平衡原理,利用降雨量减去实际蒸散发后的水量得出每个栅格的产水量^[22],计算公式如下:

$$Y(x) = \left[1 - \frac{AET(x)}{P(x)} \right] \times P(x) \quad (1)$$

式中: $Y(x)$ 为栅格单元 x 的年产水量(mm); $AET(x)$ 为栅格单元 x 的年实际蒸发量(mm); $P(x)$ 为栅格单元 x 的年降水量(mm)^[22]。

2.1.2 土壤保持服务 土壤保持模块不仅可以根据土壤流失方程计算潜在土壤流失和实际土壤侵蚀,还可以估算地块自身产生的沉积物保留量与该地块拦截上游地块的沉积物量之和^[22]。计算公式如下:

$$SRET = (RKLS - USLE) + ups_retain \quad (2)$$

$$RKLS = R \times K \times LS \quad (3)$$

$$USLE = R \times K \times LS \times C \times P \quad (4)$$

式中: $SRET$ 为地块沉积物保持量(t); ups_retain 为拦截上游地块的沉积物量(t); $RKLS$ 为潜在土壤流失量(t); $USLE$ 为实际土壤侵蚀量(t); R (根据章文波算法^[23])为多年平均降雨侵蚀力 $[MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$; K, LS, C, P 分别为土壤可蚀性因子、坡长坡度因子、植被覆盖因子、水土保持措施因子^[24]。

2.1.3 碳储量服务 陆地生态系统碳储量模块取决于 4 大碳库,即:地上生物碳(C_{above})、地下生物碳(C_{below})、土壤碳(C_{soil})和死亡有机碳(C_{dead})^[22]。碳储存模块使用土地利用/覆盖类型或植被类型作为评估单元,并且 4 个碳库是将平均碳密度乘以每个评估单位的面积,以估算区域生态系统碳储量。计算公式如下:

$$C_{tot} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (5)$$

式中: C_{tot} 为总的碳储量(t/hm^2)。模型所需碳库表中的碳密度数据,主要参考相近区域的相关文献所得^[25-26]。

2.1.4 生境质量服务 生境质量模块是根据一个地区土地利用方式和格局的情况建立的。该模块的生境质量是在计算生境退化程度上进行的^[27]。生境质量计算公式如下:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^2} \right) \right] \quad (6)$$

式中: D_{xj} 为生境退化程度; Q_{xj}, H_j 分别为土地利用类型

图 j 中栅格 x 的生境质量和生境属性; k 为半饱和常数,通常设定为生境退化程度最大值的 $1/2^{[27]}$ 。

2.2 生态系统服务变化指数(ESCI)

生态系统服务变化指数(ESCI)表示各生态系统服务在一定时间段内的相对增益或损失。ESCI 值为 0 表示生态系统服务即无增益也无减损;为负数时表示减损状态;正数时表示增益状态^[28]。其计算公式为:

$$ESCI_x = \frac{ES_{CURX} - ES_{HISX}}{ES_{HISX}} \quad (7)$$

式中: $ESCI_x$ 为单个生态系统服务变化指数; ES_{CURX} , ES_{HISX} 为最后和初始状态下的生态系统服务^[28]。

2.3 主导生态系统服务

本文使用 z -score 方法^[29]来标准化 4 种生态系统服务,并利用 Envi 软件的波段运算功能计算出各栅格中 4 种生态系统服务的最大值,以此代表各栅格的主导生态系统服务,并对其进行空间化制图。

2.4 相关性分析

计算生态系统服务之间的相关系数矩阵,并在 SPSS 20.0 中测试回归系数。当生态系统服务间的相关系数为正,且通过 0.10(或 0.05)水平的显著性检验,生态系统服务之间存在协同关系;相反,如果为负时,为权衡关系。

2.5 生态系统服务热点区

将普定县的产水量、土壤保持、碳储量和生境质量服务超过当年平均值的区域认定为这种服务的热点。其中,“1,2,3,4 类服务热点”对应的是能够提供超过区域平均值的 1,2,3,4 类服务的区域^[30]。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务变化状况

为了了解普定县退耕还林(草)政策下 1990—2017 年的 4 种生态系统服务的变化情况,将 1990 年、2000 年和 2010 年数据作为生态系统服务的初始状况,2000 年、2010 年和 2017 年数据作为生态系统服务的最终状况。获得了 1990—2000 年、2000—2010 年和 2010—2017 年 3 个时段的 4 种生态系统服务的 ESCI(表 1)。利用 ArcGIS 10.2 对 4 种生态系统服务的 ESCI 进行空间化制图(图 2)。

表 1 2000—2017 年普定县 4 种生态系统服务的 ESCI

时间段	土壤保持	产水量	碳储存	生境质量
1990—2000 年	(-0.69, 2.05)	(-0.43, 0.83)	[-1, 4]	[-1, 0.44]
2000—2010 年	(-0.73, 2.12)	(-0.43, 1.42)	[-1, 3.4]	[-1, 0.43]
2010—2017 年	(-0.72, 2.31)	(-0.47, 0.85)	[-1, 1.83]	[-1, 0.41]

土壤保持在 3 个时段内 ESCI 的数值及总体分

布格局大致相似,3 个时段的增益面积、无增益无损失面积、损失面积比例见表 2。3 个时段无增益无损失面积比例最大,损失面积比例最小。3 个时段增益地区主要集中在普定县草地、林地及灌丛覆被处,并与坡度大于 25°所在地相吻合,这与该县在坡度大于 25°地方实施退耕还林政策有关。既无增益也无损失范围主要集中在普定县较为平坦的中部、南部及西北部的土壤保持量较低的耕地地区。损失地区主要集

中在中部、最南部的小部分地区及西南地区,这些地区主要为城市建设用地,且随着西南及南部村落的发展,损失面积逐渐扩大。损失区除集中地外,还呈现分散的形式分布在普定县的各个地区,这些分散地区也主要位于村落及公路建设用地处。1990—2000 年时段的中部流域地区出现了较大面积的损失,是由于在 1990 年此地为耕地和草地,还未建成水库,水库的土壤保持能力小于耕地及草地地区。

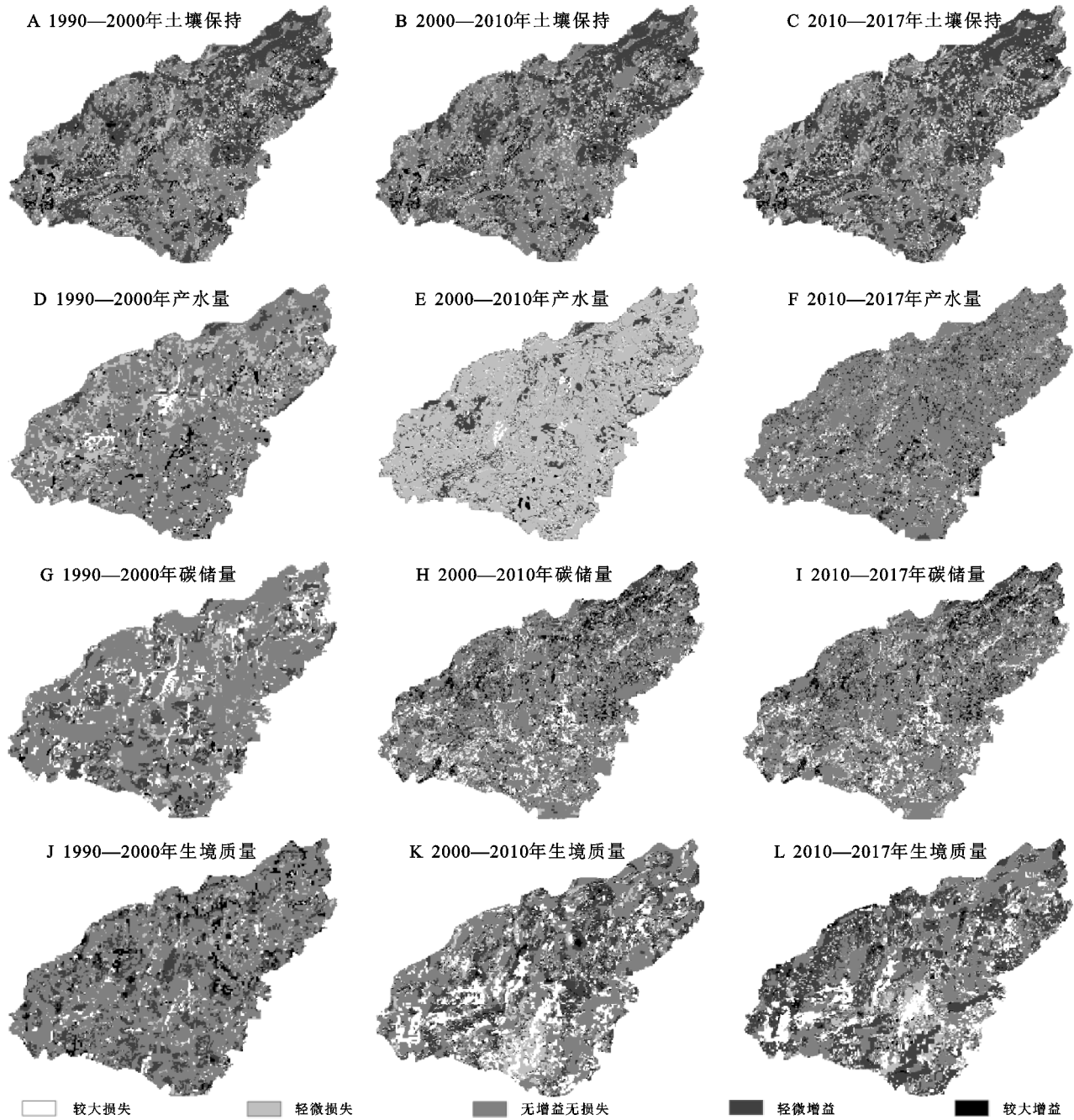


图 2 研究时段内普定县各生态系统服务 ES-CI 空间分布

产水量在 3 个时段内 ES-CI 的最小值变化较小,最大值变化较大,表明局部地区的产水量服务变化明显。3 个时段增益面积、无增益无损失面积、损失面积比例见表 2,增益面积比例在逐渐减小,无增益无

损失面积比例除 2000—2010 年时段外,其余两时段所占面积比例最大。产水量在不同的时段内 ES-CI 的分布格局变化明显。1990—2000 年增益地区主要集中在普定县的东北部、中部、西南部及南部小部分

地区,这些地区主要为城市建设用地、裸地地区。建设用地产水量大是由于下垫面为硬质地表,下渗几乎为零。裸地产水量大是由于该地基岩裸露,无土壤和植被的覆盖,难以涵养水源。1990—2000 年损失地区主要集中在北部大部分地区。其中,中部流域地区出现了较大面积的损失,是由于在 1990 年还未建成水库,原本的耕地及草地产水量大于水库。2000—2010 年全县呈现大面积的损失。因为 InVEST 模型的产水模块是基于水量平衡原理的,年降水量是极度敏感因子,降雨量的多少对产水量有着很大的影响。2010 年平均降雨量少于 2000 年平均降雨量(减少 300 mm 左右),因此产水量较少,ESCI 出现减损状态。2010—2017 年全县由大面积损失转为大面积的无增益无损失状态。因为 2017 年降雨量相较于 2010 年相持平,因此无增益无损失面积比例较大。增益地区在东南部也有所增加,与此地城镇化发展有关。

碳储存在 3 个时段内 ESCI 的最小值无变化,最大值变化较大,相差 1 倍多,表明局部地区的碳储存服务变化大。3 个时段增益面积、无增益无损失面积、损失面积比例见表 2,3 个时段无增益无损失面积比例最大。碳储存在 3 个时段的空间分布上表现出南北相反的分布格局:1990—2000 年增益地区分布在南部及西南部地区的耕地地区,随着南部及西南部城镇化的发展,碳储存服务降低,在 2000—2010 年及

2010—2017 年时段转为损失地区。无增益无损失范围主要集中在耕地及草地地区。1990—2000 年损失地区分布在中部流域地段及东北部地区,流域地段是由于 1990 年水库未修建,水体的碳储量低于原本耕地的碳储量,以及普定县政府实施的流域附近退耕种草政策有关,而草地的碳储量低于农田的碳储量^[25-26]。东北部地区由于持续的毁林开荒,农田碳储量低于林地的碳储量,因而呈现减损状态。2000—2010 年及 2010—2017 年东北及西北部地区碳储量呈现增益状态,是由于退耕还林政策的实施,土地利用类型由耕地、裸地转为了林地。

生境质量在 3 个时段内 ESCI 的数值变化不明显,增益面积、无增益无损失面积、损失面积比例见表 2,除 2000—2010 年时段损失面积比例最大外,其余两时段无增益无损失面积比例最大。3 个时段 ESCI 时空分布的增益范围都主要分布在水体、林地、草地所在地。无增益无损失主要集中在耕地所在地。损失地区主要分布在南部、西南部、东部的建设用地和西部及东部的裸地处。1990—2000 年损失所占面积较小,到 2000—2010 年时,损失范围明显增大,面积增加,这个时段为该地迅速发展时期,并从发展中心向南部及西南部拓展,生境质量呈现连片式恶化,但在 2010—2017 年的发展时段里,可以看出这种连片式的恶化得以缓解和隔断,根据土地利用转移结果,这与此地植树种草有着很大的关系。

表 2 2000—2017 年普定县 4 种生态系统服务所占面积比例 %

项目	增益面积比例			无增益无损失面积比例			损失面积比例		
	1990—2000 年	2000—2010 年	2010—2017 年	1990—2000 年	2000—2010 年	2010—2017 年	1990—2000 年	2000—2010 年	2010—2017 年
土壤保持	34.3	26.1	29.6	58.9	68.1	63.9	7.3	6.1	5.6
产水量	7.4	7.9	5.7	45.4	2	91.2	7.4	90.1	3.1
碳储存	15.2	24.8	29.0	61.8	37.1	38.1	22.9	24.9	33.2
生境质量	30.1	31.0	36.9	64.0	37.3	40.7	6.3	32.7	22.0

3.2 主导生态系统服务

4 种主导生态系统服务的分布格局也展现出显著的空间差异(图 3),但在 4 个年份中各主导生态系统分布格局大致相同。以土壤保持服务为主导的地区呈东北—西南走向贯穿普定县中部及最北部。这些地区为普定县坡度大于 25°的山地林地地区。以产水量服务为主导的地区主要分布在城镇、村落和裸地地区,2000 年后在西部及东北部的地区,以产水量服务为主导的地区逐步被碳储量服务和生境质量服务替代。根据土地利用转移矩阵结果,西部的小部分栅格处土地利用方式由裸地转化为了林地,东北部由裸地转化为了草地。以碳储量服务为主导的地区从 2010—2017 年分布范围逐渐扩大,主要呈条带状分布在林地,且随着退耕还林面积的增加,碳储量分布

也在不断扩大。以生境质量服务为主导的地区无论在 1990 年还是 2017 年都占据着较大的面积,在全县的各个方位都有分布。水域、林地、草地、农田都有以生境质量为主导的服务。4 种主导生态系统服务的面积比例见表 3。4 个年份中以生境质量为主导的服务所占面积比例最大。以产水量为主导的服务所占面积比例最小。在 2000 年实施退耕还林(草)工程后,产水量主导的生态系统服务面积比例在逐年降低,以碳储量主导的生态系统服务比例在逐年增加。土壤保持主导的服务和生境质量主导的服务所占比例面积未发生较明显的变化。

3.3 生态系统服务的权衡与协同

普定县土壤保持与碳储存、土壤保持与生境质量、碳储存与生境质量具有明显的协同关系。基于 0.01 水

平的显著性检验,1990 年、2000 年、2010 年、2017 年三者相关系数见表 4。土壤保持与产水量表现出较

好的协同关系,并通过了 0.05 水平上的显著性检验,相关系数见表 4。

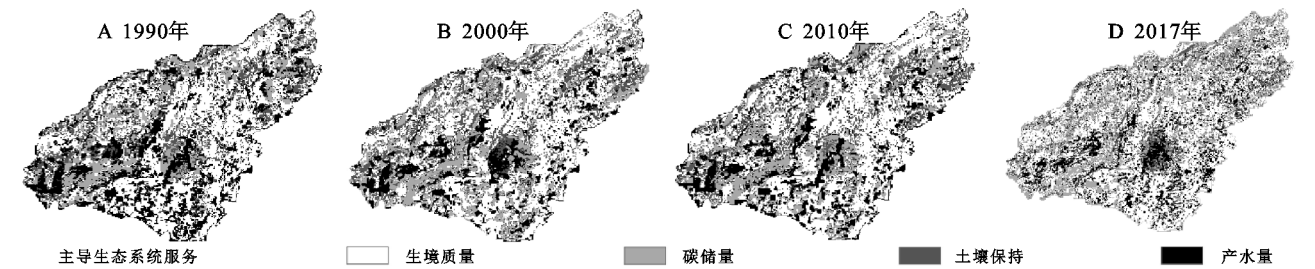


图 3 主导生态系统服务分布情况

表 3 主导生态系统服务面积比例变化 %

项目	1990 年	2000 年	2010 年	2017 年
土壤保持	20.7	20.4	20.8	18.8
产水量	16.9	15.8	11	10.7
碳储量	16.3	16.8	18.5	22.8
生境质量	47.7	47	49.7	48.1

在退耕还林(草)的政策下,普定县土地利用情况的改变,直接导致了其各项生态系统服务功能的变化,进而影响了生态系统服务的权衡与协同作用。林地、草地在裸地地区面积的增加导致研究区碳储量的增加,生境质量得到改善,同时也提高了土壤抗雨水冲蚀的能力,土壤保持量得到了提升。同时,降水、温

度等自然因素也将驱动生态系统服务之间的变化。其余的未呈现显著的权衡与协同关系,可能是由于其他土地利用类型的存在,导致在整体上关系并不明显。例如城市建成区的地表一般由沥青、水泥等构成,下渗几乎为零,因此产水量大。但城市地区的碳储存低,土壤保持少,生境质量差。随着建设用地规模的扩展,建设用地对普定县生态系统服务的权衡与协同关系影响更为明显。植树造林等可以在不同程度上增加生态系统服务的稳定性,使各项生态系统服务之间朝着协同的方向发展,而城镇化的快速发展使各项生态系统服务之间产生更多的竞争,将不利于生态系统的平衡。

表 4 1990 年、2000 年、2010 年、2017 年普定县生态系统服务相关系数

项目	土壤保持				产水量				碳储存				生境质量			
	1990 年	2000 年	2010 年	2017 年	1990 年	2000 年	2010 年	2017 年	1990 年	2000 年	2010 年	2017 年	1990 年	2000 年	2010 年	2017 年
土壤保持	1.00	1.00	1.00	1.00	0.59*	0.58*	0.53*	0.51*	0.76**	0.82**	0.81**	0.83**	0.90**	0.86**	0.88**	0.88**
产水量					1.00	1.00	1.00	1.00								
碳储存									1.00	1.00	1.00	1.00	0.87**	0.84**	0.84**	0.84**
生境质量													1.00	1.00	1.00	1.00

注: * 表示 0.05 水平上显著, ** 表示 0.01 水平上显著。

3.4 热点区识别

为进一步分析 4 种生态系统服务在空间上供给能力的差异,对多重服务热点区进行了统计(表 5)及空间化制图(图 4),1990 年、2000 年、2010 年、2017 年 4 类服务热点区中 0 类和 1 类服务热点区所占比重最大。这与当地是石漠化较为严重的生态环境相符合。1990—2017 年,4 类、3 类服务热点区的面积都有所增加,其中 2010 年 4 类和 3 类服务热点区的面积是 1990 年的两倍,2017 年 4 类和 3 类服务热点区的面积是 2010 年的两倍,反映出在县区实行退耕还林(草)后生态环境在不斷改善。从空间分异来看,研究区的南部(马官镇、城关镇、化处镇)由于城镇的分布及大面积耕地的存在,提供的生态系统服务能力比其他地区弱;2010—2017 年南部及东部地区 1 类服务热点区面积在扩展,主要是产水服务功能的上升,也表现出城镇化的加快,但

在 2017 年时,城镇周围出现了 2 类和 3 类服务热点区,从土地利用转移中可知,林地和草地面积在建成区的周围增加,表明普定县的退耕还林(草)政策的全面开展及人们对城镇健康发展意识的提高。研究区 4 类和 3 类服务热点区主要集中在山地林地地区和草地地区,且呈现逐年增加的趋势。在 2017 年这一空间变化表现更为明显,这和该县在 2000 年后实施退耕还林有着密切的关系。

表 5 多重服务热点区面积比例 %

分类	1990 年	2000 年	2010 年	2017 年
4	3.1	6.1	11.3	22.2
3	3.3	6.3	11.6	23.5
2	27.1	21.8	18	18.3
1	37.3	28.7	24.7	29.6
0	29.2	37.1	34.4	6.4

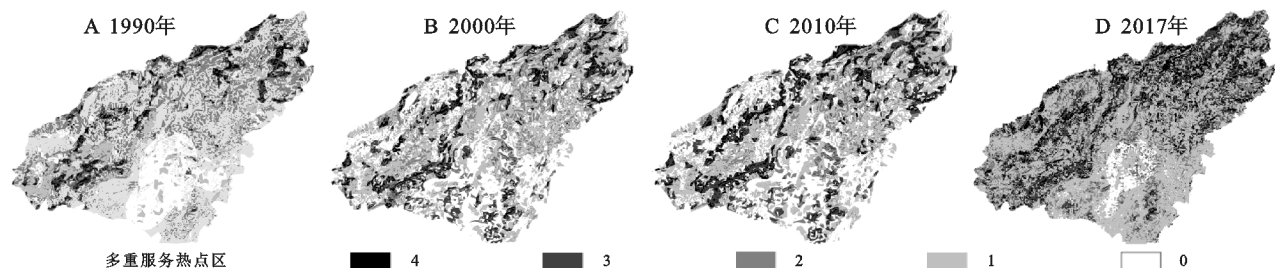


图 4 2000—2017 年普定县多重生态系统服务热点区

4 结论与不足

(1) 1990—2017 年, 4 种生态系统服务的 ESCI 的值域及时空变化迥异; 其值域表现出不同的变化, 如多年持平、年际倍增和年际倍减。在相同时间段内, 4 种生态系统服务各自的增益及损失状态在空间分布上表现出明显的差异性。在不同的研究时段内, 同种生态系统服务的增益及损失状态也不相同。

(2) 4 种主导生态系统服务的分布格局也展现出显著的空间差异, 但在 4 个年份中各主导生态系统分布格局大致相同。在 2000 年实施退耕还林(草)工程后, 以产水量为主导的生态系统服务范围在缩小, 以碳储量主导的生态系统服务范围不断扩大。

(3) 相关系数法分析表明, 普定县土壤保持与碳储存、土壤保持与生境质量、碳储存与生境质量具有明显的协同关系。土壤保持与产水量表现出较好的协同关系。

(4) 生态系统服务空间热点制图显示, 普定县存在多重生态系统服务供给的热点区, 主要集中在山地林地地区和草地地区。随着退耕还林(草)政策的全面开展, 4 类及 3 类热点区面积逐年增加。

然而, 本文在利用 InVEST 模型测算 4 种生态系统服务时, 有些参数的设置参考了环境状况相近地区的文献数据, 这在一定程度上导致了误差的存在。并且, InVEST 模型更多依赖于土地利用类型, 并且对每一类型进行相同的赋值, 这也会使模拟结果产生误差。因此, 要全面了解喀斯特地区的生态系统服务还需做出进一步的努力。

参考文献:

- [1] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and Water Synthesis[M]. Washington D C: World Resources Institute, 2005.
- [2] 苏维词. 贵州喀斯特山区生态环境脆弱性及其生态整治[J]. 中国环境科学, 2000, 20(6): 547-551.
- [3] 张殿发, 王世杰, 李瑞玲. 贵州省喀斯特山区生态环境脆弱性研究[J]. 地理学与国土研究, 2002, 18(1): 77-79.
- [4] Feng X, Fu B, Lu N, et al. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau[J]. Scientific Reports, 2013, 3, DOI:10.1038/srep02846.
- [5] Rodriguez J P, Douglas B T, Bennett E M, et al. Trade-offs across Space, Time, and Ecosystem Services[J/OL]. Ecology and Society, 2006, 11(1): 28. <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art28/>.
- [6] Foley J A. Global consequences of land use[J]. Science, 2005, 309(5734): 570-574.
- [7] Leea H, Lautenbacha S. A quantitative review of relationships between ecosystem services [J]. Ecological Indicators, 2016, 66: 340-351.
- [8] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 等. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7219-7231.
- [9] 王蓓, 赵军, 胡秀芳. 石羊河流域生态系统服务权衡与协同关系分析[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7582-7595.
- [10] 武文欢, 彭建, 刘焱序, 等. 鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析[J]. 地理科学进展, 2017, 36(12): 1571-1581.
- [11] 王壮壮, 张立伟, 李旭谱, 等. 流域生态系统服务热点与冷点时空格局特征[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 823-834.
- [12] 潘竟虎, 李真. 干旱内陆河流域生态系统服务空间权衡与协同作用分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 280-289.
- [13] Qiao X N, Gu Y Y, Zou C G, et al. Trade-offs and synergies of ecosystem services in the Taihu Lake Basin[J]. Chinese Geographical Science, 2018, 28(1): 86-99.
- [14] Yang X, Zhou Z, Li J, et al. Trade-offs between carbon sequestration, soil retention and water yield in the Guanzhong—Tianshui Economic Region of China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(10): 1449-1462.
- [15] 张婷, 侍昊, 徐雁南, 等. 退耕还林对喀斯特地区土地利用景观格局影响的量化评价[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(3): 34-43.
- [16] 郇红娟, 张朝琼, 王后阵, 等. 岩溶山区生态服务价值对退耕还林(草)工程的响应[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2014, 32(6): 21-24.
- [17] 焦树林, 艾其帅. 黔中喀斯特地区退耕还林项目的碳汇

经济效益分析[J].生态经济,2011,244(10):69-72.

[18] 张博胜.退耕还林工程驱动下的中国西南喀斯特山区土地利用变化及其生态效应研究:以云南省文山县为例[D].昆明:云南财经大学,2010.

[19] Tian Y, Wang S, Bai X, et al. Trade-offs among ecosystem services in a typical Karst watershed, SW China [J]. Science of The Total Environment, 2016, 566: 1297-1308.

[20] Yanqing L, Wei S. Trade-off Analysis of Ecosystem Services in a Mountainous Karst Area, China [J]. Water, 2018,10(3).DOI:10.3390/w10030300.

[21] 陈洪元.贵州喀斯特山区雨洪资源高效利用方法:以普定县陈家寨喀斯特石漠化示范区为例[J].贵州科学, 2015,33(5):22-26.

[22] 钱彩云,巩杰,张金茜,等.甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系[J].地理学报,2018,73(5): 868-879.

[23] 章文波,付金生.不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力 [J].资源科学,2003,25(1):37-38.

[24] 李默然,丁贵杰.贵州黔东南主要森林类型碳储量研究 [J].中南林业科技大学学报,2013,33(7):119-124.

[25] 罗怀良,袁道先,陈浩.南川市三泉镇岩溶区农田生态系统有机碳密度[J].生态环境,2008,17(5):2014-2018.

[26] 解宪丽,孙波,周慧珍,等.中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J].土壤学报,2004,41(1):35-43.

[27] 褚琳,张欣然,王天巍,等.基于 CA-Markov 和 Invest 模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测[J].应用生态学报,2018,29(12):4106-4118.

[28] 李晶,李红艳,张良.关中一天水经济区生态系统服务权衡与协同关系[J].生态学报,2016,36(10):3053-3062.

[29] 刘竞妍,张可,王桂华.综合评价中数据标准化方法比较研究[J].数字技术与应用,2018,36(8):84-85.

[30] 武文欢,彭建,刘焱序,等.鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析[J].地理科学进展,2017,36(12):1571-1581.



(上接第 275 页)

[19] 商慧敏,郝敏,李悦,等.胶州湾滨海湿地生态系统服务价值变化[J].生态学报,2018,38(2):421-431.

[20] 陈端吕,陈哲夫,彭保发.土地利用生态服务价值与经济协调发展的协调及空间分异:以西洞庭湖区为例[J].地理研究,2018,37(9):1692-1703.

[21] 徐丽芬,许学工,罗涛,等.基于土地利用的生态系统服务价值当量修订方法:以渤海湾沿岸为例[J].地理研究,2012,31(10):1775-1784.

[22] 刘永强,廖柳文,龙花楼.土地利用转型的生态系统服务价值效应分析:以湖南省为例[J].地理研究,2015,34(4):691-700.

[23] 满苏尔·沙比提,娜斯曼·那斯尔丁,阿尔斯朗·马木提.托尔木峰国家级自然保护区土地利用/覆被生态服务价值变化分析[J].地理研究,2016,35(11):2116-2124.

[24] 虎陈霞,杨空,郭旭东,等.嘉兴市土地利用时空变化与生态服务价值评估[J].农业现代化研究,2018,39(3): 503-510.

[25] 王宽,蔡正华,齐增湘,等.2000—2013 年衡阳市土地利用格局转变对生态系统服务的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(7):1060-1070.

[26] 朱会义,李秀彬.关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J].地理学报,2003,58(5):643-650.

[27] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].自然资源学报,2008,23(5): 911-919.

[28] 谢高地,肖玉,甄霖,等.我国粮食生产的生态服务价值研究[J].中国生态农业学报,2005,13(3):10-13.

[29] 王壮壮,张立伟,李旭谱,等.流域生态系统服务热点与冷点时空格局特征[J].生态学报,2019,39(3):1-12.

[30] Bai Y, Xu H, Ling H. Eco-service value evaluation based on eco-economic functional regionalization in a typical basin of northwest arid area, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2014,71(8):3715-3726.