

浙中地区生态系统服务时空特征及其权衡/协同关系研究

沈杏雯¹, 李加林^{1,2,3*}, 田 鹏¹, 张海涛¹

(1. 宁波大学 地理科学与旅游文化学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波大学 东海研究院, 浙江 宁波 315211;
3. 宁波陆海国土空间利用与治理协同创新中心, 浙江 宁波 315211)

摘要: 基于浙中地区遥感、土壤、气象、数字高程模型(DEM)等多源数据, 采用 InVEST 模型定量评估研究区 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年、2020 年 5 期的产水量、碳储量、土壤保持 3 种关键生态系统服务的时空特征, 使用相关性分析与生态系统服务权衡协同度模型(ESTD), 探析生态系统服务之间的权衡/协同关系. 结果表明: (1) 40 年间, 浙中地区耕地、草地、未利用土地面积趋于下降, 林地、水域、城乡、工矿居民用地面积趋于增加. (2) 浙中地区生态系统服务多年间波动趋势各异, 产水量空间上的高值区集中在中部, 碳储量与土壤保持空间上的高值区主要在周边. (3) 林地、草地的碳储能力和土壤保持能力较强, 未利用土地、城乡、工矿居民用地的产水能力较强. (4) 在空间区域上, 浙中地区产水量与其他 2 项生态系统服务主要呈现负相关关系, 土壤保持与碳储量主要呈现正相关关系. (5) 在时间跨度上, 产水量与碳储量、土壤保持与碳储量在 40 年间的变化主要呈现权衡关系, 土壤保持与产水量在 40 年间的变化主要呈现协同关系. 充分考虑生态系统服务之间的权衡关系, 更有可能达成人与自然的双赢.

关键词: 生态系统服务; InVEST 模型; 权衡; 浙中地区

中图分类号: K903

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2022) 05-0091-09

生态系统服务(Ecosystem Services)是人类从生态系统中获得的各种惠益^[1], 根据评价和管理的需要, 将生态系统服务进行分类^[2]. 各种生态系统服务之间相互影响, 具有不同程度的权衡或者协同关系^[3]. 权衡(Trade-offs)是指某些生态系统服务的增加或减少, 会使其他类型生态系统服务出现减少或增加的情况; 协同(Synergies/Co-benefits)是指 2 种或 2 种以上的生态服务系统在发展过程中出现同时增加或同时减少的情况^[4]. 生态系统服务之间的权衡与协同关系, 导致并非每一种服务的效用都能达到最大化, 这就需要政府或社会的决策思考. 因此, 探究生态服务系统的时空变化特征, 厘清生态系统服务之间权衡/协同关系, 可以为后续生态系统保育提供研究基础, 为区域国土规划与生态补偿提供科学依据, 对平衡经济发展与生态

建设的关系具有重要意义.

生态系统服务及其权衡/协同关系已经成为当前许多生态经济学和环境经济学学者关注的焦点. 对生态系统服务评价的方法主要分为价值量与质量评估 2 种类型, 其中 InVEST 模型作为质量评估方法之一, 因其具备计算相对便利、结果可视化、适用范围广等优点^[5], 被广泛应用在流域^[6]、行政区^[7]、自然保护区^[8]等不同研究区域的生态系统服务功能评估中. 对生态系统服务权衡/协同的研究主要包括权衡与协同的类型识别、时空特征研究、驱动因素探析、管理决策确定等^[9]. 虽然国内外相关研究成果较为丰硕, 但在理论研究方面, 长时间序列的生态系统服务及其权衡/协同关系研究相对较少, 多数学者更为关注生态较为脆弱、生态经济发展更为重要的地区, 对东部沿海经济相对

收稿日期: 2021-11-01.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省哲学社会科学规划课题(16JDGH005).

第一作者: 沈杏雯(1997-), 女, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 生态系统服务. E-mail: 1746377283@qq.com

*通信作者: 李加林(1973-), 男, 浙江台州人, 博导/教授, 主要研究方向: 自然地理与资源开发. E-mail: nbnj2001@163.com

发达地区的研究较少. 在实证研究方面, 如何将现有的理论认识更好地向决策应用转化仍需进一步付诸实践, 以真正达到生态系统与经济效益的双赢, 实现协同效应^[10].

浙中地区(以金华—义乌为主)被定义为浙江省第四大都市区, 作为浙江省重要的经济发展增长极和生态屏障, 在其加速发展过程中人类活动对其生态系统也在不断产生着重要影响^[11]. 浙中地区现有研究偏向于土地利用方面^[12], 关于生态系统服务相关研究的时间跨度一般较短, 且常忽略对生态系统服务权衡/协同关系的逻辑表述.

本研究通过大时间跨度、选取合适的生态系统服务权衡/协同关系分析方法, 探讨基于土地利用的浙中地区生态系统服务时空特征及其权衡/协同关系, 以期对生态系统保护与经济发展的差异化平衡及双赢提供参考.

1 研究区概况

借鉴文献^[11]中广义浙中地区的概念, 本文研究区包括金华全境、龙游县、缙云县、诸暨市(图1). 浙中地区在浙江省中偏西南部, 地貌主要为丘陵盆地, 盆地底部分布大小不一的冲积平原.

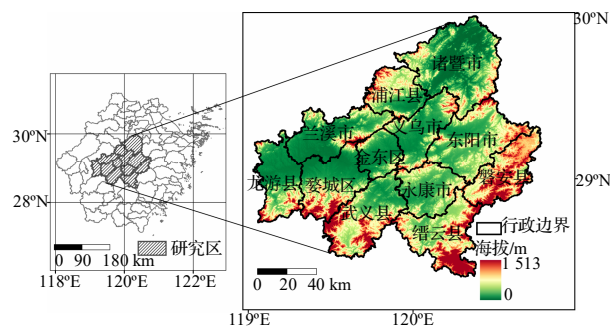


图1 浙中地区地理位置与高程

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

本文以1980年、1990年、2000年、2010年、2020年5期, 30 m分辨率的Landsat遥感影像目视解译生成的土地利用分类数据(<http://www.resdc.cn/>)为基础数据, 其他主要数据包括: (1) 30 m分辨率的数字高程模型(DEM)数据, 来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>); (2) 90 m分辨率5期年降水数据, 来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>); (3) 30 m分辨率5期年潜在蒸散发数据, 来源于CGIAR-CSI(<https://cgiarcsi.community/data/global-aridity-and-pet-database/>), 数据基于Penman-Montieth参考蒸散方程实现; (4) 1 km分辨率土壤数据, 来源于世界土壤数据库(HWSD)中国土壤数据集(v1.1)(<http://westdc.westgis.ac.cn/>).

(3) 30 m分辨率5期年潜在蒸散发数据, 来源于CGIAR-CSI(<https://cgiarcsi.community/data/global-aridity-and-pet-database/>), 数据基于Penman-Montieth参考蒸散方程实现; (4) 1 km分辨率土壤数据, 来源于世界土壤数据库(HWSD)中国土壤数据集(v1.1)(<http://westdc.westgis.ac.cn/>).

2.2 研究方法

采用InVEST模型对生态系统服务进行定量评估^[13].

2.2.1 产水量估算

InVEST模型具有可估算研究区每个子流域的产水量模块. 考虑降水、蒸散、土壤、植被等多种影响因素, 来确定每个栅格 x 的年产水量(Y_x), 其计算公式为:

$$Y_x = \left(1 - \frac{N_x}{P_x}\right) P_x, \quad (1)$$

式中: N_x 为单栅格年实际蒸散量; P_x 为单栅格年降水量.

对植被相关的土地利用/覆被变化(LULC), 式中 N_x/P_x 部分采用文献^[14-15]提出的Budyko曲线表达式计算:

$$\frac{N_x}{P_x} = 1 + \frac{T_x}{P_x} - \left[1 + \left(\frac{T_x}{P_x}\right)^{w_x}\right]^{1/w_x}, \quad (2)$$

式中: T_x 为单栅格年潜在蒸散量; w_x 为表征单栅格自然气候土壤特性的非物理参数.

$$T_x = K_c(L_x)Q_x, \quad (3)$$

式中: $K_c(L_x)$ 为与单栅格植被类型(L_x)相关的植物(植被)蒸散系数; Q_x 为单栅格年参考蒸散量.

$$w_x = Z \frac{W_x}{P_x} + 1.25, \quad (4)$$

式中: W_x 为单栅格土壤有效含水量, mm, 数据主要参考文献^[16], 剔除相差大的个别数据, 其余计算平均值用以修正; Z 为Zhang系数, 取6.5^[17].

$$W = \min(D_{\text{soildepth}}, D_{\text{rootdepth}})W_{\text{PAWC}}, \quad (5)$$

式中: $D_{\text{soildepth}}$ 为土层厚度; $D_{\text{rootdepth}}$ 为根系深度; W_{PAWC} 为植物有效水分含量(单位体积田间持水量与凋萎系数之间的差), 具体参见文献^[18]、中国土壤数据库管理与共享平台(<http://www.soilinfo.cn/map/index.aspx>)、中国土壤数据库(<http://vdb3.soil.csdb.cn/>).

对于其他 LULC (开放水域、城市、湿地), 单栅格年实际蒸散量直接从 Q_x 计算得到, 其上限由降水量决定, 计算公式为:

$$N_x = \min(K_c(L_x)Q_x, P_x). \quad (6)$$

2.2.2 碳储量估算

土地上的碳储量主要依据 4 个碳“池”计算:

$$C = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{dead}} + C_{\text{soil}}, \quad (7)$$

式中: C 为碳储量; C_{above} 为地上碳储量; C_{below} 为地下碳储量; C_{dead} 为死亡有机质碳储量; C_{soil} 为土壤碳储量。

参考文献[19-20], 以各地类的碳密度值来计算 4 个碳“池”的碳储量。

2.2.3 土壤保持估算

沉积物输送模块是在输入空间分辨率 DEM 栅格下工作的空间显式模型。对于每个单栅格, 模型首先计算侵蚀的沉积物量, 然后计算沉积物输送比(SDR), 即实际到达集水区出口的土壤流失比例^[21]。土壤保持量可以理解为潜在的土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量之间的差, 栅格 x 的年土壤保持量(A_x)通过修正通用土壤流失方程式计算:

$$A_x = R_x U_x V_x (1 - G_x S_x), \quad (8)$$

式中: R_x 为单栅格降雨侵蚀力; U_x 为单栅格土壤可蚀性; V_x 为单栅格坡度梯度因子; G_x 为单栅格作物管理因子; S_x 为单栅格水土保持措施因子^[22-23]。

$$R_x = 0.0534 P_x^{1.6548}, \quad (9)$$

$$U_x = f_x(\text{csand})f_x(\text{cl-si})f_x(\text{orgc})f_x(\text{hisand}), \quad (10)$$

式中: U_x 计算参见文献[24]中 William 方程; $f_x(\text{csand})$ 、 $f_x(\text{cl-si})$ 、 $f_x(\text{orgc})$ 、 $f_x(\text{hisand})$ 分别表示单栅格粗砂、粉粒与黏粒、有机碳、砂含量对土壤可蚀性因子的贡献程度。

利用植被覆盖度估算 G 方法^[25], f_c 为植被覆盖率, 其计算公式为:

$$G = \begin{cases} 1, & f_c = 0, \\ 0.6508 - 0.3436 \lg f_c, & 0 < f_c < 78.3\%, \\ 0, & f_c \geq 78.3\%. \end{cases} \quad (11)$$

2.2.4 生态系统服务权衡/协同关系评估方法

在研究区内选取合适的采样点, 进行相关性分析, 探究 3 种关键生态系统服务 5 期中两两之间的相关关系。为了更好地评估生态系统服务之间的权衡协同关系, 参考文献[26], 引用生态系统服

务权衡协同度(ESTD)模型, 评估研究区多年间生态系统服务变化量之间相互作用的方向和程度。

$$E_{mn} = (H_{mb} - H_{ma}) / (H_{nb} - H_{na}), \quad (12)$$

式中: E_{mn} 为第 m 、 n 种生态系统服务权衡协同度; H_{mb} 为 b 时刻第 m 种生态系统服务的变化量; H_{ma} 为 a 时刻第 m 种生态系统服务的变化量; H_{nb} 为 b 时刻第 n 种生态系统服务的变化量; H_{na} 为 a 时刻第 n 种生态系统服务的变化量; E_{mn} 为负值时, 表示 2 种生态系统服务为权衡关系, E_{mn} 为正值时, 表示 2 种生态系统服务为协同关系, E_{mn} 绝对值表征相较于第 n 种生态系统服务的变化, 第 m 种生态系统服务变化的程度。

3 结果分析

3.1 1980—2020 年浙中地区土地利用类型

图 2(a)和(b)分别为 1980 年、2020 年浙中地区土地利用类型, 图 2(c)为 40 年间浙中地区主要土地利用变化。结合表 1 可知, 浙中地区土地利用类型在地理分布上呈现区域性差异。

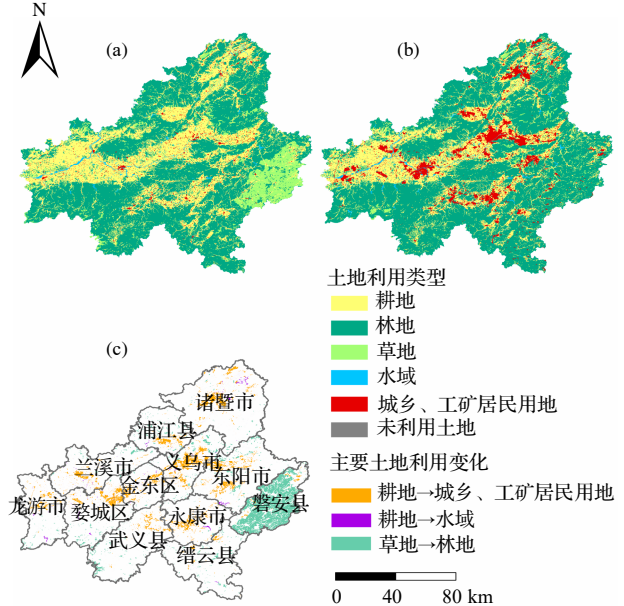


图2 1980—2020 年浙中地区土地利用变化

耕地主要分布在盆地底部冲积平原, 1980—2020 年间, 耕地面积从 4963.00 km^2 减少至 4121.31 km^2 , 大部分转化为城乡、工矿居民用地, 占减少面积的 78.6%。林地主要分布在丘陵地区, 研究期间林地面积从 9061.41 km^2 增加至 9944.41 km^2 , 大部分由草地转化而来。草地主要分布在低

表1 1980—2020年浙中地区土地利用转移矩阵

km²

1980 年地类	2020 年地类						总计
	耕地	林地	草地	水域	城乡、工矿居民用地	未利用土地	
耕地	3 960.66	158.22	8.28	47.97	787.74	0.13	4 963.00
林地	118.22	8 713.55	98.73	10.34	118.28	2.28	9 061.41
草地	14.66	1 056.71	236.92	0.28	21.07	0.34	1 329.99
水域	14.44	2.73	0.11	174.05	6.55	0	197.87
城乡、工矿居民用地	13.24	8.02	0.23	0.63	294.53	0	316.64
未利用土地	0.09	5.18	0.36	0	1.14	2.00	8.78
总计	4 121.31	9 944.41	344.63	233.28	1 229.31	4.75	15 877.69

山丘陵地区,1980年主要集中在磐安县内,至2020年则零星分布于研究区内丘陵低地,共计减少883.00 km²。水域主要汇聚在地势相对低洼处,研究期间水域面积从197.87 km²增加至233.28 km²,由耕地转化而来的水域面积最大,占增加面积的81.0%。城乡、工矿居民用地主要分布在靠近河流的盆地底部冲积平原,1980年呈点状分散分布,至2020年则沿河流不断聚集,形成较大团状斑块。研究期间城乡、工矿居民用地面积剧烈增加,从316.64 km²增加至1 229.31 km²。未利用土地所占面积最少,在研究区内呈极少数点状分布。

3.2 1980—2020年浙中地区生态系统服务时空特征

图3(a)和图4(a)分别表示1980—2020年浙中地区5期单栅格产水量的空间分布与变化。5期中,浙中地区产水量年平均值分别为807 623.03、957 218.77、852 361.56、1 235 992.93、633 089.74 m³·km⁻²,多年平均值为897 257.21 m³·km⁻²,40年间浙中地区产水量总体呈现减少趋势,为-174 533.29 m³·km⁻²。从空间分布看,浙中地区的产水量高值区主要在研究区中部,在地势较低的盆地平原地区较多,在地势较高的山地丘陵地区较少。1980—1990年间,浙中地区产水量存在区域性的整体增加,这主要是因为1990年浙中地区的年降水量有1 657.03 mm,比1980年增加了近200 mm。至2000年,产水量有所回落,除年降水量较1990年减少约100 mm外,磐安县内剧烈的土地利用变化使得产水量有所减少。磐安县自1983年恢复县制,致力于封山育林、植树造林、退耕还林,林地面积有了显著增加,而林地树木根系深、具备强大的蒸腾作用,比草地更能截留地表水,故林地产水能力逊于草地。2010年

是5期中年降水量最多一年,达1 985.39 mm,产水量也为5期中最多。而2020年年蒸散量远大于其他4期,年降水量与2000年相似,故产水量最少。同时40年间,尤其是2000—2020年,城乡、工矿居民用地迅速呈团块状向四周扩散,替代以耕地为主的其他类型土地,而城乡、工矿居民用地因其人工建设特征,不利于降水下渗、蒸散量相对低,故地表产水量有所增加。

图3(b)和图4(b)分别表示1980—2020年浙中地区5期碳储量的空间分布与变化。5期中,浙中地区碳储量年平均值分别为18 010.40、17 987.51、18 041.94、17 766.06、17 602.84 t·km⁻²,多年平均值为17 881.75 t·km⁻²,多年间波动幅度较小,40年间浙中地区碳储量总体呈现少量减少趋势,为-407.56 t·km⁻²。从空间分布看,浙中地区碳储量呈现四周高,中部低分布。碳储量的变化主要同土地利用类型变化有关。碳储量减少较大区域呈现团状,零散分布于研究区各个县城内,这主要是因为40年间由其他类型的土地转化而来的大量城乡、工矿居民用地,而城乡、工矿居民用地碳储能力较低,表明城市扩张进程对生态系统碳储能力有侵蚀。以磐安县内为主的草地大量转化为林地,而林地的碳储能力相对较高,使得这部分区域碳储量有所增加。

图3(c)和图4(c)分别表示1980—2020年浙中地区5期土壤保持的空间分布与变化(其中白色大块栅格为主要的无土壤区域)。5期中,浙中地区土壤保持量年平均值分别为353 269.95、436 260.90、397 733.98、582 586.16、399 813.06 t·km⁻²,多年平均值为433 932.81 t·km⁻²,40年间浙中地区土壤保

持总体呈现增加趋势, 为 $46\,543.11\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 。从空间分布看, 浙中地区土壤高值区分布较为分散, 主要位于四周海拔相对较高的区域。1980—1990 年间, 浙中地区土壤保持在整个区域均有所增加, 这主

要是因为降水量增加使得降雨侵蚀力增大。此后多年间, 降水量的波动一直是影响土壤保持发生变化的主要因素。40 年间浙中地区大部分区域土壤保持的总体增加主要同降雨侵蚀力整体性增大、土

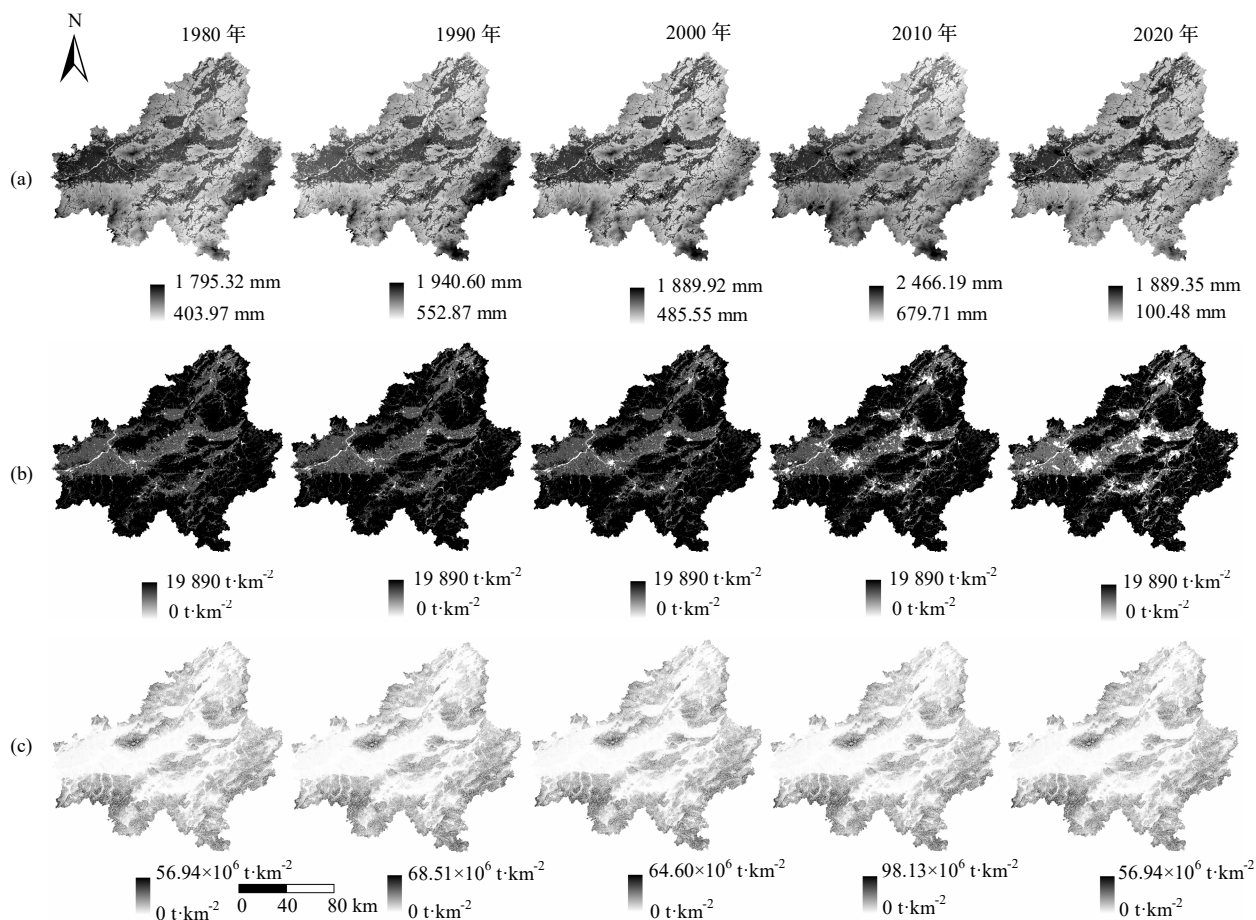


图3 1980—2020 年浙中地区生态系统服务空间分布

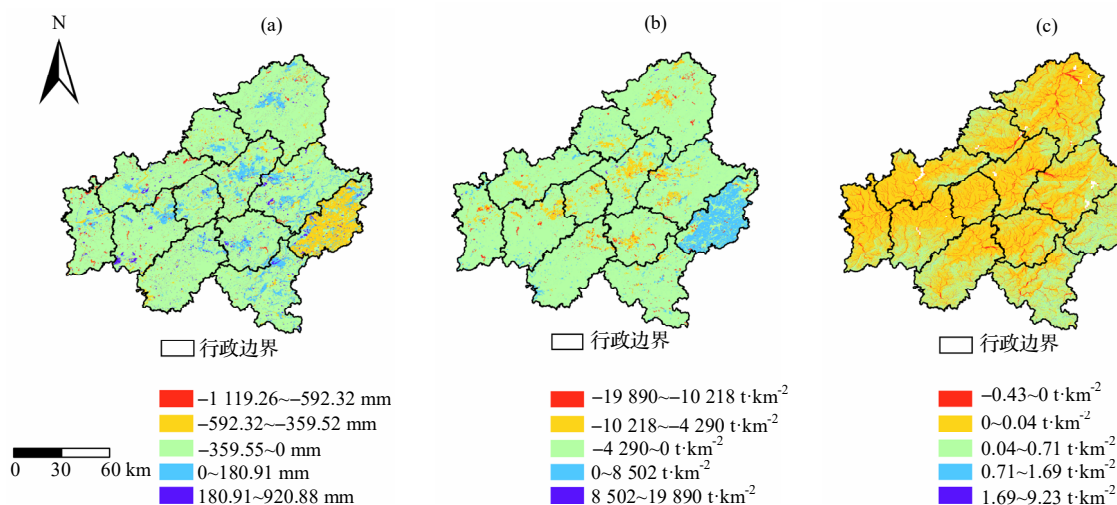


图4 1980—2020 年间浙中地区生态系统服务变化

地利用变化、多年间植被覆盖率的逐渐增大有关,相对高海拔区域土壤保持的增加量大于相对低海拔区域。婺城区、武义县、缙云县南部以及研究区东部磐安县内土壤保持相对较高的增加主要得益于其草地转化为林地,林地相对草地扎根更深,能够更好地固定土壤。

3.3 不同土地利用类型生态系统服务分析

浙中地区在 1980—2020 年间不同土地利用类型的生态系统服务见表 2。从表 2 可以看到,林地与耕地的产水量远大于其他地类,二者共占浙中地区产水总量 80% 以上,说明林地与耕地对浙中地区产水量有重要作用。从不同地类的平均产水能力看,40 年平均单栅格产水量:未利用土地>城乡、工矿居民用地>耕地>草地>林地>水域。未利用土地与城乡、工矿居民用地蒸散量相对低、不利于降水下渗,故其平均产水能力最强;耕地存在轮作情况且植被相对稀疏,故其平均产水能力强于草地与林地;水域因无植被遮掩、蒸散强,故产水能力最弱。

对于碳储量,整体上林地的碳储量远大于其他地类,林地的碳储能力强、所占面积大,使得其成为浙中地区 40 年间最为关键的碳储存地类。从不同地类的平均碳储能力看,40 年间平均碳储量:林地>草地>耕地>城乡、工矿居民用地>未利用土地>水域。林地根系发达、生物量大,故其平均碳储能力最强;耕地一般不如自然生长草地植株密度大、根系发达,故其平均碳储能力弱于草地;城乡、工矿居民用地与未利用土地植被扎根浅、生物量少,故其平均碳储能力弱。

对于土壤保持,整体看林地的土壤保持远大于其他地类,说明林地在浙中地区 40 年间是最为重要的土壤保持地类。从不同地类的平均土壤保

持能力看,40 年间平均土壤保持:林地>草地>未利用土地>耕地>城乡、工矿居民用地>水域。林地与草地植被茂密、根系发达,故平均土壤保持能力最强;未利用土地大多位于海拔相对较高、地势起伏较大的区域,且存在一定量的植被覆被,故其平均土壤保持能力强于处于地势平坦区域的耕地、水域与城乡、工矿居民用地;而城乡、工矿居民用地植被覆盖率较低,故其平均土壤保持能力较弱。

3.4 1980—2020 年浙中地区生态系统服务权衡/协同关系

3.4.1 生态系统服务相关性分析

在研究区内选取相距 1 km 的均匀分布点共 2 804 个,探究 5 期中 3 种关键的生态系统服务两两之间的相关关系(表 3)。浙中地区产水量与碳储量、土壤保持与产水量的相关系数均小于 0,多年平均相关系数分别为-0.499、-0.071,表明产水量与其他两项生态系统服务主要为负相关关系;浙中地区土壤保持与碳储量的相关系数均大于 0,多年平均相关系数为 0.227,表明土壤保持与碳储量之间主要为正相关关系。因此可以认为,在区域空间的权衡/协同方面,产水量与碳储量、土壤保持与产水量主要呈现彼此牵制的权衡关系,土壤保持与碳储量主要呈现共同增益的协同关系。

3.4.2 生态系统服务权衡与协同度

参考生态系统服务权衡协同度模型评估浙中地区 40 年间 3 种生态系统服务间权衡/协同关系的空间分布,结果如图 5 所示。权衡协同度是从整个时间跨度上分析生态系统服务权衡/协同的关系。图 5(a)表示 1980—2020 年浙中地区产水量-碳储量间的权衡协同度,平均值为-582.79,即产水量-碳储量在 40 年间的变化主要呈现权衡关系。图 5(b)表示 1980—2020 年浙中地区土壤保持-产水量间

表 2 1980—2020 年浙中地区不同土地利用类型生态系统服务

地类	产水总量/($\times 10^8 \text{ m}^3$)		40 年平均单栅格产水量/mm		碳储总量/($\times 10^6 \text{ t}$)		40 年平均碳储量/($\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$)		土壤保持总量/($\times 10^8 \text{ t}$)		40 年平均土壤保持/($\times 10^6 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$)	
	1980 年	2020 年	1980 年	2020 年	1980 年	2020 年	1980 年	2020 年	1980 年	2020 年	1980 年	2020 年
耕地	51.08	40.24	1 146.93	77.73	64.59	15 670	4.20	4.52	0.11			
林地	58.91	42.77	738.14	180.30	197.89	19 890	43.96	56.25	0.61			
草地	13.31	3.11	1 128.24	25.25	6.54	18 960	7.45	1.63	0.57			
水域	1.11	0.47	586.73	0	0	0	0.07	0.10	0.05			
城乡、工矿居民用地	3.74	13.89	1 295.64	2.74	10.55	8 580	0.15	0.70	0.05			
未利用土地	0.13	0.08	1 655.63	0.05	0.03	5 510	0.03	0.03	0.51			

表3 1980—2020年浙中地区生态系统服务相关系数

生态系统服务	1980年	1990年	2000年	2010年	2020年
产水量-碳储量	-0.491**	-0.400**	-0.506**	-0.488**	-0.608**
土壤保持-产水量	-0.091**	-0.006	-0.077**	-0.034	-0.147**
土壤保持-碳储量	0.226**	0.222**	0.228**	0.227**	0.230**

注:**表示相关性系数在0.01水平(双侧)上显著相关。

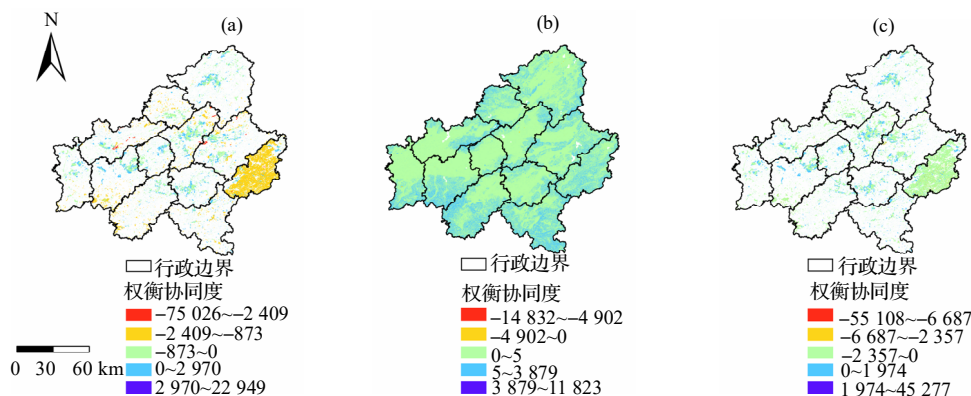


图5 1980—2020年浙中地区生态系统服务权衡协同度分布

的权衡协同度, 平均值为 0.40, 即土壤保持-产水量在 40 年间的变化主要呈现协同关系. 图 5(c)表示 1980—2020 年间浙中地区土壤保持-碳储量间的权衡协同度, 平均值为-301.91, 即土壤保持-碳储量在 40 年间的变化主要呈现权衡关系.

总体而言, 1980—2020 年间浙中地区不同区域、不同生态系统服务间的权衡/协同分布关系有差异, 生态系统服务之间相互影响. 1980—2020 年间, 产水量-碳储量间的相对高权衡区域主要集中在磐安县内, 这些区域发生了较为剧烈的土地利用变化, 当草地转化为林地时产水量有所减少, 而林地的碳储量高于草地, 故两者为权衡关系; 而由其他地类转化而来的城乡、工矿居民用地区域, 既有区域为权衡关系, 也有区域为协同关系, 这主要与 40 年间波动变化的降水量、蒸散量有关, 如 2010 年浙中地区产水量整体偏多, 2020 年浙中地区产水量整体偏少, 因此即便土地利用类型从产水能力相对较弱的耕地转化为产水能力相对较强的城乡、工矿居民用地(2020 年城乡、工矿居民用地的平均产水能力 1 129.55 mm)仍不如 2010 年耕地的平均产水能力(1 484.94 mm). 土壤保持-产水量间的协同区域几乎占据整个研究区, 这表明多年间二者变化趋同, 降水量的波动变化产生了重要作用; 以林地为主的区域的协同度高于以耕地和城乡、工矿

居民用地为主的区域, 这主要是因为坡度大、海拔相对较高的区域土壤保持变化相对大, 且以林地为主的区域植被覆被状况在 40 年间有较好的改善. 土壤保持-碳储量间大部分区域呈现权衡关系, 多分布转化而来的草地与城乡、工矿居民用地, 主要的相对高权衡区域位于研究区东部, 这主要与降水量的波动变化有关, 降水量的变化导致了降雨侵蚀力的变化, 如 1990—2000 年出现草地转化为林地情况而使碳储量增加时, 林地的平均土壤保持能力虽然高于草地, 但因 2000 年降水量的较大幅度减少使得土壤保持反而减少, 出现了权衡的情况.

对比 3.4.1 节和 3.4.2 节的分析结果, 发现在区域空间与时间跨度两方面, 生态系统服务两两之间的权衡/协同关系有所异同, 这是因为浙中地区出现了自然因素(降水量等)波动对生态系统服务的干扰强度大于人为因素(土地利用方式为主)的情况, 使得生态系统服务间的关系发生了转变^[1].

4 结论与讨论

(1)1980—2020 年, 浙中地区耕地、草地、未利用土地面积均有所减少, 林地、水域、城乡、工矿居民用地面积相对增加, 其中耕地大部分转化为城乡、工矿居民用地, 草地大量转化为林地, 水

域增加的面积大部分由耕地转化而来。

(2)1980—2020 年,浙中地区产水量总体呈现减少趋势,产水量高值区主要在研究区中部的耕地与城乡、工矿居民用地区域,在地势较低的盆地平原地区较多,在地势较高的山地丘陵地区较少。碳储量总体呈现少量减少,为四周高中部低分布。土壤保持总体呈现增加趋势,土壤保持高值区分布较为分散,主要位于四周海拔相对较高区域。

(3)林地与耕地对浙中地区产水量起重要作用,从不同地类的平均产水能力看,未利用土地>城乡、工矿居民用地>耕地>草地>林地>水域。林地是浙中地区 40 年间最为关键的碳储存地类。从不同地类的平均碳储能力看,林地>草地>耕地>城乡、工矿居民用地>未利用土地>水域。林地在浙中地区 40 年间是最为重要的土壤保持地类,从不同地类的平均土壤保持能力看,林地>草地>未利用土地>耕地>城乡、工矿居民用地>水域。这些结果分别与胡砚霞等^[27]、于媛等^[28]、刘晓娜等^[29]的研究结果基本一致。

(4)5 期中产水量与其他两项生态系统服务主要为负相关关系,土壤保持与碳储量之间主要为正相关关系。平均产水能力较强的耕地与城乡、工矿居民用地等区域,平均碳储能力、平均土壤保持能力相对较弱;平均碳储能力较强的林地与草地等区域,平均土壤保持能力也较强。尤其是 40 年来与人类活动直接相关的城乡、工矿居民用地的大幅扩张,使得产水量有所增加,碳储量与土壤保持均有所减少,而封山育林、植树造林等举措则有利于碳储量、土壤保持的增加,故在决策时需要充分权衡考度,以期尽可能达成生态系统保护与经济发展的双赢局面。

(5)权衡协同度是从整个时间跨度上分析生态系统服务权衡/协同的关系,在时间跨度上,产水量与碳储量、土壤保持与碳储量在 40 年间的变化主要呈现权衡关系,土壤保持与产水量在 40 年间的变化主要呈现协同关系。1980—2020 年间浙中地区不同区域、不同生态系统服务间的权衡/协同分布关系有所差异,生态系统服务之间相互影响。

参考文献:

[1] 冯漪,曹银贵,李胜鹏,等.生态系统服务权衡与协同研究:发展历程与研究特征[J].农业资源与环境学报,

2022, 39(1):11-25.

- [2] 曹祺文,卫晓梅,吴健生.生态系统服务权衡与协同研究进展[J].生态学杂志,2016,35(11):3102-3111.
- [3] Wang L N, Yu E Y, Li S, et al. Analysis of ecosystem service trade-offs and synergies in Ulansuhai Basin[J]. Sustainability, 2021, 13(17):9839.
- [4] Rodríguez J P, Beard T D Jr, Bennett E M, et al. Trade-offs across space, time, and ecosystem services[J]. Ecology and Society, 2006, 11:28-41.
- [5] 杨洁,谢保鹏,张德罡,等.基于 InVEST 模型的黄河流域土壤侵蚀评估及其时空变化[J].兰州大学学报(自然科学版),2021,57(5):650-658.
- [6] 杨昀则,田鹏,张海涛,等.基于 InVEST 模型的甬江流域水源供给功能时空变化特征[J].水资源与水工程学报,2021,32(5):107-117.
- [7] 王晓萌,潘佩佩,王晓旭,等.基于土地利用的河北省生态系统服务权衡/协同关系研究[J].地理与地理信息科学,2021,37(1):80-88.
- [8] 陈星宇,赵筱青,杨永贵,等.白马雪山国家级自然保护区景观格局与生态系统服务关系研究[J].环境污染与防治,2021,43(12):1520-1525.
- [9] 张碧天,闵庆文,焦雯璐,等.生态系统服务权衡研究进展[J].生态学报,2021,41(14):5517-5532.
- [10] Howe C, Suich H, Vira B, et al. Creating win-wins from trade-offs? Ecosystem services for human well-being: A meta-analysis of ecosystem service trade-offs and synergies in the real world[J]. Global Environmental Change, 2014, 28:263-275.
- [11] 石小伟,冯广京, Yi Yang, 等.浙中城市群土地利用格局时空演变特征与生态风险评价[J].农业机械学报,2020,51(5):242-251.
- [12] 王静敏,王益澄,金邑霞,等.基于土地利用格局的浙中城市群区域景观稳定性研究[J].宁波大学学报(理工版),2018,31(6):88-96.
- [13] 钟亮,林媚珍,周汝波.基于 InVEST 模型的佛山市生态系统服务空间格局分析[J].生态科学,2020,39(5):16-25.
- [14] 傅抱璞.论陆面蒸发的计算[J].大气科学,1981,5(1):23-31.
- [15] Zhang L, Hickel K, Dawes W R, et al. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration [J]. Water Resources Research, 2004, 40(2):W02502.
- [16] 俞佳骏.丽水市莲都区土地覆被类型与水源涵养动态变化及预测[D].杭州:浙江农林大学,2017.
- [17] 周文佐.基于 GIS 的我国主要土壤类型土壤有效含水量研究[D].南京:南京农业大学,2003.
- [18] 张灿强,李文华,张彪,等.基于 InVEST 模型的西苕溪流域产水量分析[J].Journal of Resources and Ecology,

- 2012, 3(1):50-54.
- [19] 黄卉. 基于 InVEST 模型的土地利用变化与碳储量研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- [20] 邱建慧. 围填海活动对中国滨海湿地碳储量的影响研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
- [21] Borselli L, Cassi P, Torri D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment[J]. CATENA, 2008, 75(3):268-277.
- [22] 何莎莎, 朱文博, 张静静, 等. 基于 InVEST 模型的太行山淇河流域水土保持功能研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2018, 48(5):542-553.
- [23] 任坤, 梅琨, 朱慧敏, 等. 基于 RUSLE 模型的珊溪水库流域土壤侵蚀定量估算[J]. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1950-1958.
- [24] Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation[J]. Technical Bulletin-United States Department of Agriculture, 1990, 4(4):206-207.
- [25] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2):19-24.
- [26] 李鸿健, 任志远, 刘焱序, 等. 西北河谷盆地生态系统服务的权衡与协同分析——以银川盆地为例[J]. 中国沙漠, 2016, 36(6):1731-1738.
- [27] 胡砚霞, 于兴修, 廖雯, 等. 汉江流域产水量时空格局及影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(1): 73-82.
- [28] 于媛, 韩玲, 李明玉, 等. 哈长城市群生态系统服务时空特征及其权衡/协同关系研究[J]. 水土保持研究, 2021, 28(2):293-300.
- [29] 刘晓娜, 裴厦, 陈龙, 等. 基于 InVEST 模型的门头沟区生态系统土壤保持功能研究[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6):168-176.

Study on spatio-temporal characteristics of ecosystem services and trade-offs cum synergies in central Zhejiang

SHEN Xingwen¹, LI Jialin^{1,2,3*}, TIAN Peng¹, ZHANG Haitao¹

(1.School of Geography and Tourism Culture, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Donghai Institute, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

3.Collaborative Innovation Center for Land and Marine Spatial Utilization and Governance Research, Ningbo 315211, China)

Abstract: Based on remote sensing, soil, meteorology, DEM and other multi-source data in central Zhejiang, the study uses InVEST model to quantitatively evaluate the spatial-temporal characteristics of three key ecosystem services including water yield, carbon storage and soil conservation in 1980, 1990, 2000, 2010 and 2020. The correlation analysis and ecosystem services trade-off synergies degree model are used to analyze the trade-offs and synergies relationship between ecosystem services. The results show that: (1) Within the 40-year period, the area of cultivated land, grassland and unused land in central Zhejiang tended to decrease, while the clearings of forest land, waters, urban construction and rural housing land were inclined to increase. (2) The fluctuation pattern of ecosystem services in central Zhejiang was varying with years. Spatially, the high value area of water yield was concentrated on the middle area, the high value area of carbon storage and soil conservation was mainly scattered around. (3) The carbon storage capacity and soil conservation capacity of forest land and grassland were strong, and the water yield capacity of unused land, urban construction and rural housing land was also strong. (4) In the spatial region, water yield was in most cases negatively correlated with the other two ecosystem services in central Zhejiang, and soil conservation was mainly positively correlated with carbon storage. (5) In time span, water yield and carbon storage, soil conservation and carbon storage mainly showed trade-offs in 40-year timeslot, soil conservation and water yield mainly showed synergies over 40 years. By fully considering the trade-offs between ecosystem services, it is more likely to achieve a win-win situation between human and nature.

Key words: ecosystem services; InVEST model; trade-offs; central Zhejiang

(责任编辑 史小丽)