

DOI: 10.5846/stxb202005101169

王修文, 于书霞, 史志华, 王玲. 南方红壤区生态系统服务权衡与协同关系演变对退耕还林的响应. 生态学报, 2021, 41(17): 7002-7014.

Wang X W, Yu S X, Shi Z H, Wang L. Responses of tradeoffs and synergies among ecosystem services to Grain-for-Green Project in the red soil region, southern China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(17): 7002-7014.

南方红壤区生态系统服务权衡与协同关系演变对退耕还林的响应

王修文¹, 于书霞¹, 史志华^{1,2}, 王 玲^{1,*}

¹ 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070

² 中国科学院第四纪科学与全球变化卓越创新中心, 西安 710061

摘要:我国南方红壤区具有丰富的水热资源和优越的社会区位条件,是重要的农业生产基地。由于长期高强度的农业开发,同时山地丘陵的坡度较大,降水集中且强度大,导致该区生态功能退化、环境问题突出,威胁粮食安全和生态安全。以南方红壤区为研究对象,利用估算区域植被净生产力(Carnegie Ames-Stanford Approach, CASA)模型、InVEST 模型及修正通用土壤流失方程(RUSLE)定量评估了该区退耕还林前后植被净初级生产力(Net Primary Production, NPP)、农作物生产(Crop Production, CP)、水土保持(Soil Conservation, SC)和产水(Water Yield, WY)四种生态系统服务;采用偏相关分析和空间自相关分析探讨了各项生态系统服务间权衡与协同关系的时空变化特征和集聚特征,揭示了退耕还林对南方红壤区的多种生态系统服务间相互关系的影响。结果表明:(1)退耕还林后,南方红壤区的 NPP、CP、SC 和 WY 总体增强,但部分区域呈现减弱趋势。其中,NPP 在南部呈现减弱趋势,SC 在东北部减弱,CP 与 WY 均在东南沿海减弱;(2)退耕还林后,NPP 与 WY 间由极显著协同关系($r=0.315$, $P=0.025$)转变为显著权衡关系($r=-0.279$, $P=0.059$);而 SC 与 WY 间由无显著相关转变为极显著权衡关系($r=-0.427$, $P=0.024$);(3)退耕还林前后,南方红壤区的 NPP、CP 和 SC 的空间分布格局均未发生显著变化,而 WY 的空间分布发生较大变化;(4)四种生态系统服务间的权衡与协同关系空间异质性显著,CP-SC 关系的 Moran's I 指数最小(0.012),NPP-SC 和 NPP-WY 关系的 Moran's I 指数均大于 0.7。研究结果有利于深入理解退耕还林对南方红壤区生态系统服务时空变化的影响,并为确定生态脆弱区的生态农林牧业的发展方向与面向可持续发展目标的生态系统服务优化调控提供科学依据。

关键词:南方红壤区;退耕还林;生态系统服务;权衡与协同;空间异质性

Responses of tradeoffs and synergies among ecosystem services to Grain-for-Green Project in the red soil region, southern China

WANG Xiuwen¹, YU Shuxia¹, SHI Zhihua^{1,2}, WANG Ling^{1,*}

¹ College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

² Center for Excellence in Quaternary Science and Global Change, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

Abstract: The red soil region of southern China is an important agricultural production base because it is rich in water, heat resources, and has an excellent social location. However, the long-term and intensive farming, the large slope of hills and the concentrated and strong precipitation trigger many environmental problems such as the ecological function degradation, which threatens the food and ecological security. Therefore, it is urgent to study the changes of ecosystem services in the region. This paper used the Carnegie Ames-Stanford Approach (CASA) model, InVEST model, and RUSLE to quantitatively evaluate the Net Primary Productivity (NPP), Crop Production (CP), Soil Conservation (SC), and Water

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0505406)

收稿日期:2020-05-10; 网络出版日期:2021-06-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangling_ln@mail.hzau.edu.cn

Yield (WY) in the red region of southern China before and after Grain-for-Green Project (GTGP). The temporal and spatial characteristics of tradeoffs and synergies among different ecosystem services were discussed using partial correlation analysis and spatial autocorrelation analysis. The effect of GTGP on the relationships among various ecosystem services was determined. The results showed that: (1) after GTGP, NPP, CP, SC and WY in the red soil region of southern China all increased overall, but some areas still presented a weakening trend. The NPP indicated a weakening trend in the south, SC showed a weakening trend in the northeast, and both CP and WY showed a weakening trend in the southeast coast. (2) After GTGP, the relationship between NPP and WY changed from very significant synergies ($r = 0.315$, $P = 0.025$) to significant tradeoffs ($r = -0.279$, $P = 0.059$); no significant synergies relationship between SC and WY changed to significant tradeoffs ($r = -0.427$, $P = 0.024$); the rest of the relationship of ecosystem services has not changed much. (3) Before and after GTGP, the distribution pattern of NPP, CP, and SC did not change significantly, and the distribution pattern of WY changed dramatically with significant increase in Northeast and Southwest. (4) Spatially, the trade-offs and synergies among the four ecosystem services were significantly heterogeneous. The Moran's I index of the CP-SC was the smallest (0.012), and the Moran's I index of the NPP-SC and NPP-WY were all greater than 0.7, all other Moran's I index are greater than 0. The results of this article are conducive to the depth understanding the impact of GTGP on the spatial and temporal changes of ecosystem services, and provide a scientific basis of determine the development direction of ecological agriculture, forestry and animal husbandry in vulnerable ecologically areas and the optimization of ecosystem services for sustainable development in the red soil region of southern China.

Key Words: the red soil region of southern China; Grain-for-Green Project; ecosystem services; tradeoffs and synergies; spatial heterogeneity

生态系统服务是指生态系统和生态过程所形成的维持人类赖以生存的自然环境条件和效用,直接或间接地为人类生产生活提供各种产品和服务^[1-2]。联合国于2001年实施了千年生态系统评估国际合作项目,将生态系统服务分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务四大类^[3]。一个生态系统所产生的多种生态系统服务之间存在着复杂的交互作用^[4]。生态系统服务本身的复杂性以及人类对不同生态系统服务需求的差异性,导致生态系统服务的变化趋势出现差异,两两生态系统服务之间表现出权衡与协同关系^[5]。权衡关系是指一种生态系统服务的提高或增加,引起了另一种生态系统服务的减弱或降低,呈现出此消彼长的关系;协同关系是指两种生态系统服务具有同样的上升或降低趋势,一种服务的增加会对另一种服务产生一定的促进和增幅作用^[6-7]。相对于研究孤立的各项服务,厘清服务间权衡与协同关系及其时空变化特征,可为实现面向不同需求的服务总体效益最大化提供科学依据。

生态系统服务权衡与协同关系的研究最初关注生态系统服务的需求偏好对其他生态系统服务所产生的影响^[8],这些研究通常是静态的,即通过分析某一时间点区域内多种生态系统服务间的权衡与协同关系,阐明生态系统服务的整体现状^[9]。然而,单一时间点的研究无法反映生态系统服务间关系的动态变化,因此越来越多的研究开始关注生态系统服务间关系随时间的变化情况^[10]。同时,生态系统服务权衡与协同关系空间分布的动态变化也成为研究的热点^[11-13]。生态系统服务权衡与协同关系及其空间分布特征受到研究区的地理位置和生态条件、研究尺度以及人为活动等的影响^[11-14]。不同生态系统服务间的相关性分析是确定其权衡和协同关系最常用的方法:基于市县级行政单元的相关分析,其优点是数据量丰富且结果能够为政府及相关单位的政策实施提供科学依据^[15];基于像元的相关分析虽然工作量相对较大,但能够在不同尺度下分析权衡与协同关系的空间分布特征及其差异^[16-17]。两种生态系统服务间权衡与协同关系分析常用 SWAT、CASA 等^[18]模型进行研究,而多种生态系统服务间关系的空间分异则通过冷热点分析和复杂互动建模展现^[19]。在此基础上,可通过建立生态函数和优化模型,模拟生态流路径和优化方法,研究生态系统服务机制,以实现缓和权衡和增强协同的目的^[20]。

我国南方红壤区水热资源丰富,是重要的农业生产基地^[21]。然而,该区由于具有降水时空分布不均、景观破碎、人口密度高以及农业开发强度大等特征,水土流失和土壤污染严重,生态系统服务功能降低,威胁区域农业及社会经济的可持续发展^[22]。退耕还林工程的实施对该区的生态现状带来了较大的改变^[23]。研究表明,退耕还林工程在增加生态系统碳汇、抑制水土流失和增加农业生产收益方面效果显著^[24]。林地面积增加可增强净初级生产力(Net Primary Production, NPP),但同时也会增大水分蒸散量^[25],进而影响产水服务(Water Yield, WY),产水量的变化对农作物生产服务(Crop Production, CP)也将带来一定影响^[26]。此外,林地通过树冠截留削弱降雨强度,根系增加水分入渗进而减少水土流失^[27],增强土壤保持服务(Soil Conservation, SC)。可见,NPP、WY、CP 和 SC 之间存在着复杂的权衡和协同关系。鉴于此,本文以南方红壤区为研究对象,旨在(1)分析 NPP、WY、CP 和 SC 四种生态系统服务时空变化对退耕还林的响应;(2)阐明退耕还林前后生态系统服务间的权衡与协同关系的变化规律;(3)揭示退耕还林对生态系统服务间权衡与协同关系空间分布特征的影响。研究结果可为合理评估退耕还林工程的生态效益、促进农业生产与生态协调发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

南方红壤区位于我国亚热带地区,以大别山为北面屏障,巫山、巴山为西障,西南面以云贵高原为界,东南直抵海域,地理位置介于 21.83°—31.33°N, 107.82°—122.78°E 之间,包括长江中下游和珠江中下游以及福建、浙江、海南等省份,分布面积约为 80 万 km²,其中丘陵山地面积约占一半,地形起伏大。气候属亚热带季风气候,年平均温度 19.5℃,年平均降水量约为 1593 mm,是全国平均的 2—3 倍,且季节分布不均衡,降雨集中在 4—6 月。水热资源丰富,区位条件优越,是热带亚热带经济果林、粮食及经济作物生产的主要基地。同时人口密度高,人地矛盾突出,导致自然植被破坏严重。

1.2 数据来源

本文中量化 2000 年和 2015 年的 NPP、WY、CP 和 SC 四种生态系统服务,需要归一化植被指数(NDVI)、气象数据、土地利用数据、土壤侵蚀数据和社会经济数据。退耕还林自 1999 年开始在四川、陕西和甘肃进行试点后,于 2002 年确定全面启动该工程。因此本文以 2000 年反映退耕还林前阶段,2015 年反映退耕还林实施后的稳定阶段。

气象数据是全国 2400 多个气象站点观测,通过整理、计算和空间插值处理生成,插值采用 ArcGIS 空间插值工具;社会经济数据主要获取各市级行政区的农作物的种植面积和产量、人口数据,以及采取的农业种植方式和水土保持措施;土地利用数据是以 Landsat TM/ETM+遥感影像作为数据源进行土地利用分类获得;NDVI 来自于 MODIS 产品;估算产水量过程中还需土壤的最大根系埋藏深度、根系深度和土壤饱和导水率数据,并采用 InVEST 指导书中的田间持水量与萎蔫点之间的差值得到植物可利用含水量。数据来源及分辨率见表 1。

1.3 研究方法

本文利用 CASA 模型、InVEST 模型、修正通用土壤流失方程(RUSLE)来定量估算南方红壤区 NPP、WY、CP 和 SC 四种生态系统服务量,并计算退耕还林前后,四种生态系统服务的变化率。以此为基础,结合基于像元的偏相关系数法和 ArcGIS、ENVI 软件,对该区域生态系统服务两两之间的权衡和协同关系进行定量评估。

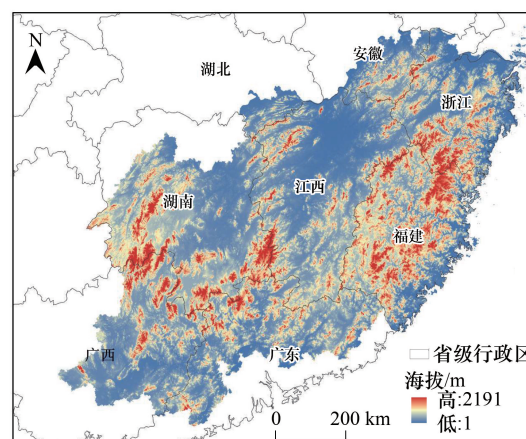


图 1 研究区概况

Fig.1 Study area

表 1 本文中数据来源及其分辨率
Table 1 The sources and resolution ratio of the data in the paper

数据 Data	来源 Sources	分辨率 Resolution ratio
气象数据 Meteorological data	国家气象科学数据中心	1000 m
社会经济数据 Socioeconomic data	中国经济社会大数据研究平台	市级
土地利用 Land-use map	中国科学院资源环境科学数据中心	30 m
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	地理国情监测云平台	30 m
数字高程模型 Digital elevation model	中国科学院资源环境科学数据中心	30 m
土壤的最大根系埋藏深度 The maximum root depth of the soil	联合国粮农组织 (FAO) 构建的世界土壤数据库	1000 m
根系深度 The root depth	标准作物系数 ^[28] (http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm)	1000 m
土壤饱和导水率 Soil saturated hydraulic conductivity	土壤科学数据库	1000 m

1.3.1 净初级生产力(NPP)

生态系统生产力服务常用净初级生产力(Net primary productivity, NPP)表示。净初级生产力是绿色植物在光合作用后产生的有机物总量去除呼吸作用消耗的有机物后的实际累积量。本文基于 Potter 等建立的估算区域植被净生产力(Carnegie Ames-Stanford Approach, CASA)模型对 NPP 进行了有效估算^[29-30]。在模型计算中,NPP 是由植物实际所吸收的光合有效辐射 (APAR) 和光能利用效率(ε)所决定,模型如下:

$$NPP(x,t) = APAR(x,t) \cdot \varepsilon(x,t)$$

式中: t 表示时间, x 表示空间位, $NPP(x,t)$ 是 x 像元上的植被 t 年的净初级生产力(gC/m^2); $APAR(x,t)$ 是 x 像元上植被在 t 年吸收的光合有效辐射 (MJ/m^2),主要受太阳总辐射量和主动吸收比的影响,利用归一化植被指数(NDVI)计算得到; $\varepsilon(x,t)$ 是 x 像元上植被 t 年实际光能利用率(gC/MJ),受温度、水分和最大光能利用效率影响,参考文献中的计算方法得到^[31],计算方法如下:

$$\varepsilon(x,t) = T_1(x,t) \cdot T_2(x,t) \cdot W(x,t) \cdot \varepsilon_{\max}$$

其中, $T_1(x,t)$ 和 $T_2(x,t)$ 均为温度胁迫系数,其中 $T_1(x,t)$ 表示低温和高温条件下,植物内在的生化作用对光合作用的限制, $T_2(x,t)$ 表示气温从最适温度向高温和低温变化时对光合作用的影响。 $W(x,t)$ 为水分胁迫系数, $\varepsilon_{\max}$ 为理想条件下的最大光能转化率。 $T_1(x,t)$ 、 $T_2(x,t)$ 和 $\varepsilon_{\max}$ 均采用文献中的计算方法。以上参数的计算方法参考文献^[29]。

1.3.2 产水(WY)

InVEST 模型中产水量评估模块是基于 Budyko 水热耦合平衡假设(Budyko, 1974)和年平均降水量数据来实现对产水量(Water Yield, WY)的估算。公式如下:

$$Y(x) = (1 - \frac{AET(x)}{P(x)}) \cdot P(x)$$

式中: $Y(x)$ 表示栅格单元 x 的年产水量, $AET(x)$ 表示栅格单元 x 的年实际蒸散量, $P(x)$ 表示栅格单元 x 的年降水量。InVEST 模型是计算产水量常用的模型,相关参数包括:土地利用、降雨量、蒸散量、土壤最大根系埋藏深度、植物可利用水量和生物物理系数。植物可利用水量根据 Saxton 在 1986 年的田间持水量的研究结果计算得到^[32],当土壤水势在 10—1500 kPa 区间时和土壤含水量之间的关系如下:

$$\varphi = A \theta^B$$

式中: φ 表示土壤水势(kPa), θ 表示土壤水含量(m^3/m^3), A 和 B 是土壤质地相关系数。相关实验证明 A 和

B 的值通过粘粒和砂粒百分比(美国土壤颗粒分级标准)的多元非线性逐步回归分析得到^[33]:

$$A = \exp(a + b \cdot CL + c \cdot SA^2 + d \cdot SA^2 \cdot CL) \cdot 100$$

$$B = e + f \cdot CL^2 + g \cdot SA^2 \cdot CL$$

式中: CL 表示粘粒的含量(%); SA 表示砂粒的含量(%). a, b, c, d, e, f, g 均为常数系数. $a = -4.396, b = -0.0715, c = -4.88 \times 10^{-4}, d = -4.285 \times 10^{-5}, e = -3.14, f = -0.00222, g = -3.484 \times 10^{-5}$. 当 $\varphi = 30$ kPa 时的土壤含水量作为田间持水量, 当 $\varphi = 1500$ kPa 时的土壤含水量作为萎蔫点^[32], 田间持水量与萎蔫点的差值即为植被可利用水量。

1.3.3 农作物生产(CP)

本文参考 InVEST 模型中农作物生产模块的计算原理^[34], 通过统计年鉴中市级单元的各种农作物产量进行统计求和, 用单位面积的农作物产量来估计农作物生产(Crop production, CP), 计算公式如下:

$$F_{(x)} = \frac{\sum_{i=1}^n CY_i}{S_{(x)}}$$

式中: $F_{(x)}$ 表示第 x 市的农作物生产服务(t/hm^2); CY_i 表示第 i 种农作物的产量(t); $S_{(x)}$ 表示第 x 市的作物耕种面积(hm^2); n 表示共有 n 种农作物。

1.3.4 土壤保持(SC)

生态系统中的土壤保持服务通常用土壤保持量(Soil Conservation, SC)进行评估, 本文中采用修正通用土壤流失方程(RUSLE)估算南方红壤区土壤保持量^[35], 模型计算公式如下:

$$SC = Ap - Ar = R \cdot K \cdot LS \cdot (1 - C \cdot P)$$

式中: SC 为土壤保持量(t/hm^2), 由潜在侵蚀(Ap)与实际侵蚀(Ar)之差来决定。潜在侵蚀指不采取任何水土保持措施下的土壤侵蚀量(t/hm^2); 实际侵蚀指考虑水土保持措施条件下的土壤侵蚀量(t/hm^2)。 R 为降雨侵蚀因子($MJ \text{ mm } h^{-1} a^{-1}$); K 为土壤可蚀性因子($t \text{ hm}^2 \text{ h } h^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$); LS 为坡长坡度因子(无量纲); C 为植被覆盖因子(无量纲); P 为水土保持措施因子(无量纲)。各因子的详细计算方法参考以下文献^[36-37]。

1.3.5 偏相关性分析

生态系统服务间的权衡与协同关系在空间上的差异通过偏相关性分析得到。为保证运算过程中四种服务的一致性, 本文将生态系统服务统一到市级进行运算分析。生态系统服务之间相互影响, 同时受年降水量和植被覆盖度的影响^[38]。因此, 在分析生态系统服务之间关系前, 先消除降水量和植被覆盖度的影响。其中植被覆盖度用 NDVI 表示, 然后计算 NPP、CP、SC 和 WY 四种服务之间的偏相关系数。具体步骤如下^[39]:

(1) 简单相关系数:

$$r_{12(ij)} = \frac{\sum_{n=1}^n (ES1_{n \cdot (ij)} - \overline{ES1_{(ij)}}) (ES2_{n \cdot (ij)} - \overline{ES2_{(ij)}})}{\sqrt{\sum_{n=1}^n (ES1_{n \cdot (ij)} - \overline{ES1_{(ij)}})^2 \sum_{n=1}^n (ES2_{n \cdot (ij)} - \overline{ES2_{(ij)}})^2}}$$

(2) 一级偏相关系数:

$$r_{12 \cdot 3(ij)} = \frac{r_{12(ij)} - r_{13(ij)} r_{23(ij)}}{\sqrt{(1 - r_{13(ij)}^2) (1 - r_{23(ij)}^2)}}$$

(3) 二级偏相关系数:

$$r_{12 \cdot 34(ij)} = \frac{r_{12 \cdot 3(ij)} - r_{14 \cdot 3(ij)} r_{24 \cdot 3(ij)}}{\sqrt{(1 - r_{14 \cdot 3(ij)}^2) (1 - r_{24 \cdot 3(ij)}^2)}}$$

式中: $ES1$ 、 $ES2$ 分别代表两种生态系统服务; r 代表两类生态系统服务间的相关系数; i, j 代表栅格中像元的行

号和列号; n 代表时间序列; $r_{12(ij)}$ 代表年降水量与 NDVI 均发生变化时, $ES1$ 、 $ES2$ 的相关系数,同理求得 $r_{13(ij)}$ 、 $r_{23(ij)}$ 、 $r_{14(ij)}$ 、 $r_{24(ij)}$ 、 $r_{34(ij)}$; $r_{12 \cdot 3}$ 代表年降水量不变的情况下,两种生态系统服务在像元 ij 上的一级偏相关系数;同理求得 $r_{14 \cdot 3}$ 、 $r_{24 \cdot 3}$; $r_{12 \cdot 34}$ 代表年降水量与 NDVI 不变的情况下,两种生态系统服务在像元 ij 上的二级偏相关系数。通过 t 检验判断两种生态系统服务相关性的显著性。若 $r > 0$, 则表明两类生态系统服务之间呈协同关系;若 $r < 0$, 则表明两类生态服务之间呈权衡关系,若 $r = 0$, 则表明两类生态服务之间无相关关系。

1.3. 空间自相关性分析

通过空间自相关分析,进一步研究区域的生态系统服务权衡与协同关系的空间集聚特征,从而为生态治理措施提供参考,促进区域生态协调发展。本文使用全局和局部空间自相关两种方法分析生态系统服务权衡与协同关系的空间异质性^[40],该分析均在 ArcGIS/GeoDa 平台下完成。本文中的计算采用的是单变量空间自相关分析,输入的数据为偏相关分析中得到的反映两两服务间的权衡与协同关系的偏相关系数 r ,基于计算得出的 Moran's I 指数,说明南方红壤区生态系统服务间权衡与协同关系的空间自相关性,再绘制空间关联局部指标(Local Indicators of Spatial Association, LISA)进行局部自相关分析。

(1) 全局空间自相关

全局空间自相关反映某种属性值在整个研究区是否存在空间关联,判断其在空间上是否具有聚集特征。本文采用全局 Moran's I 指数对生态系统服务权衡与协同关系进行全局自相关检验,其计算公式为^[41]:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}}$$

式中: I 为 Moran's I 指数; n 为研究区数量; x_i 、 x_j 为 i 、 j 区域的某一属性值; $\bar{x}$ 为属性值的均值; w_{ij} 为标准化的空间权重矩阵。

(2) 局部空间自相关

局部空间自相关通过度量每个区域与其周边相邻区域的局部空间关联和集聚程度,识别局部区域是否存在空间异质性。采用 LISA 图衡量某区域与其相邻区域的相近和差异程度。其计算公式为^[40]:

$$I_i = z_i \sum_j w_{ij} z_j \quad z_i = \frac{n(x_i - \bar{x})^2}{\sum_i (x_i - \bar{x})} \quad z_j = (x_j - \bar{x})$$

式中: z_i 、 z_j 为区域 i 、 j 上观测值的标准化。

2 结果分析

2.1 生态系统服务的时空分布格局

退耕还林前后, NPP、CP、SC 和 WY 四种生态系统服务的空间分布格局如图 2 所示。退耕还林前, 东南沿海以及西南部地区的 NPP 较强, 而在退耕还林后, 西南部的 NPP 明显降低, 同时东北部地区的 NPP 在逐渐增强, 原因是受到地区的城市化建设的影响^[42]。从全局来看, 退耕还林后 CP 在 3.2—4.9 t/hm² 之间的区域增多, 而小于 3.2 t/hm² 的区域明显减少, 主要由于 15 年间的育种和耕作技术的提升, 同时农业机械化的逐渐普及也带来了一定的影响。退耕还林后 SC 小于 3000 t/hm² 的区域明显减少, 而大于 5000 t/hm² 的区域增多, 说明退耕还林对土壤保持能力较弱的地区带来了明显的成效。退耕还林后, WY 明显增强, 大于 700 mm 的区域由东南沿海地区扩展到东北部和中部地区, 同时西南部地区的 WY 也明显增强, 原因是年降水量存在差异, 以及植被覆盖的变化对生态系统水循环的影响^[42]。退耕还林前后, 除 WY 外的三种生态系统服务的整体格局未发生巨大变化, NPP 的整体格局呈现“北低南高, 西低东高”的分布特征; CP 呈现“中部高, 东西部低”的趋势; 对于 SC, 整体呈现“北低南高, 西北低东北高”特征; WY 在退耕还林前后存在显著差异, 退耕还林前呈现出东南部居高的特征, 退耕还林后, “东北和西南高, 中部低”的分布特征较为明显。

不同区域的各生态系统服务的变化率也存在一定差别(图3)。NPP在空间上呈现北部地区增强,西南部的部分地区减弱的趋势;对于CP,呈现中部增强、沿海及西南地区减弱;SC除南部地区减弱,其余地区均在增强;而WY的地域性差异较为明显,沿海地区及西北部地区减弱,东北及西南部地区增强。

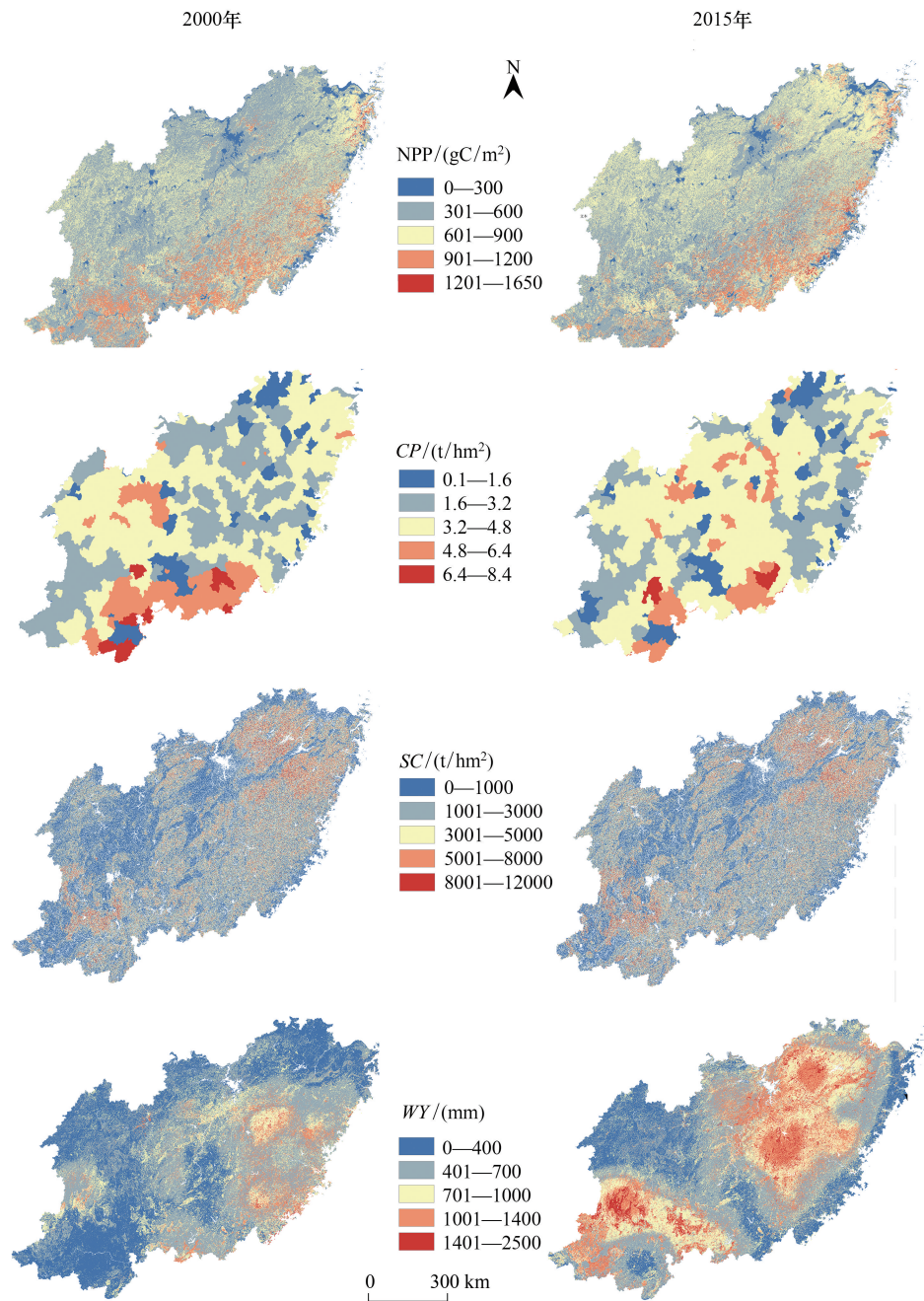


图2 退耕还林前后南方红壤区生态系统服务的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ecosystem services in red soil region of southern China before and after GTGP

NPP(Net Primary Production) 指净初级生产力服务量;CP(Crop Production) 指农作物生产服务量;SC(Soil Conservation) 指水土保持服务量;WY(Water Yield) 指产水服务量

2.2 生态系统服务间的权衡与协同关系

2.2.1 生态系统服务间权衡与协同关系随时间的变化规律

依据生态系统服务之间的相关系数和显著性水平,将生态系统服务权衡与协同关系划分为6个等级^[18],

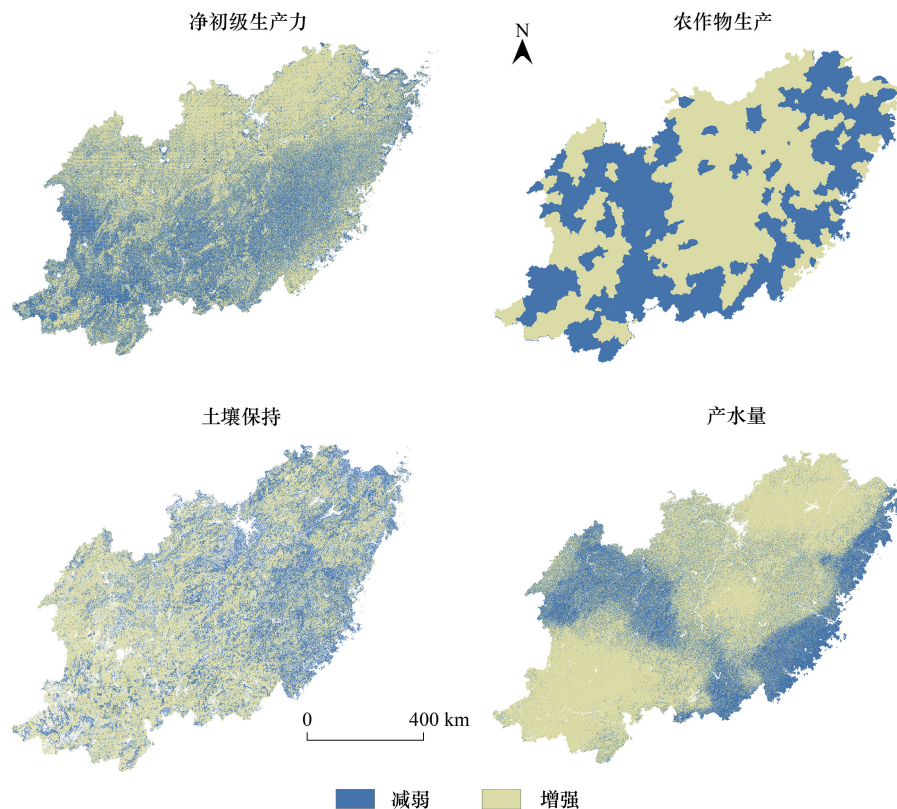


图 3 四种生态系统服务的变化率的空间分布
Fig.3 Spatial distribution of change rate of four ecosystem services

即极显著协同($r>0$, $0.01<P<0.05$)、显著协同($r>0$, $0.05<P<0.1$)、协同($r>0$, $P>0.1$)、权衡($r<0$, $P>0.1$)、显著权衡($r<0$, $0.05<P<0.1$)和极显著权衡($r<0$, $0.01<P<0.05$)。

表 2 显示,退耕还林前研究区的 NPP 与 CP($r=0.466$, $P=0.018$)、WY($r=0.315$, $P=0.025$)间为极显著协同关系,其余均不显著;而在退耕还林后,NPP 与 WY($r=-0.279$, $P=0.059$)间为显著权衡关系,NPP 与 CP 之间为极显著协同关系($r=0.332$, $P=0.035$),同时还出现了 SC 和 WY 间的极显著权衡关系($r=-0.427$, $P=0.024$)。

表 2 南方红壤区生态系统服务间相关关系
Table 2 Correlation between ecosystem services in red soil region of southern China

生态系统服务 Ecosystem services	净初级生产力 Net Primary Production (NPP)		农作物生产 Crop Production (CP)		土壤保持 Soil Conservation (SC)		产水量 Water Yield (WY)	
	2000	2015	2000	2015	2000	2015	2000	2015
年份 Years								
净初级生产力 Net Primary Production(NPP)	1	1						
农作物生产 Crop Production(CP)	0.466 **	0.332 **	1	1				
土壤保持 Soil Conservation(SC)	0.213	0.193	-0.105	-0.112	1	1		
产水量 Water Yield(WY)	0.315 **	-0.279 *	-0.027	-0.047	0.100	-0.427 **	1	1

*, 在 0.1 水平(双侧)上显著相关; **, 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

退耕还林前,在城市扩张和农业发展的影响下,林地面积逐渐减少,截留雨水和保护坡地作用减弱,农作物生长受到影响,CP 降低,同时 NPP 水平也降低,因此 NPP 与 CP 间具有较强的协同关系。林地既能涵养水源,又能增加蒸腾作用带来的水分流失,因此林地的减少会影响生态系统的供水能力,退耕还林前 NPP 与 WY 间为协同关系,表明林地的减少会降低生态系统的产水功能。退耕还林工程实施后,对该区域的生态系统的

结构和服务功能带来一定的影响。农业生产技术的提高,单位面积的农作物产量增加, CP 增强,同时退耕还林后, NPP 得到增强^[43],所以该阶段的 NPP 和 CP 间为较强的协同关系。林地逐渐增加,需水量增多,产水量减少,生态系统的 WY 降低^[44],因此 NPP 和 WY 在林地稳定阶段是呈现权衡关系。与退耕还林前不同的是, SC 和 WY 之间呈显著的负相关,退耕还林带来 WY 降低的同时,一定程度上遏制了土壤侵蚀,增强 SC ,所以 SC 与 WY 间为权衡关系。

2.2.2 生态系统服务间权衡与协同关系的空间分布特征

图 4 表明,由于不同地区生态系统服务的供给对象和供给量有所差异,导致权衡与协同关系在空间上存在差异,这给保护生态系统相关政策的实施带来一定难度。南方红壤区的 NPP 与 CP 间协同关系所占区域更多,其中显著协同主要分布在东北部地区,说明 NPP 的增强能够带来 CP 的增强。 NPP 与 SC 在研究区的西南部为权衡关系,而在东北部为协同关系,这与不同地区的耕作和发展模式相关。研究区的西南部多为耕地与山地的交错分布,造成水土流失面积较大,因此 SC 较低, NPP 较高, NPP 与 SC 呈现权衡关系;东北部的人口聚居地较多,人为活动造成的侵蚀严重,因此 NPP 和 SC 均较低, SC 与 NPP 在该地区呈现协同关系。 NPP 与 WY 在东南沿海地区为权衡关系,其余地区均为协同关系,其中以分布于东北部地区的极显著协同区域占比较大。 CP 与 SC 仅在南部和中部少数地区表现为协同关系,其余地区均为权衡关系。 WY 与 CP 和 WY 与 SC 的权衡与协同在空间上的差异较大, WY 与 CP 的协同关系所占区域略多于权衡关系,其中极显著协同所占区域较多,协同关系大多分布于东北部的江西、浙江和福建三省的交界处,权衡关系集中于西南部。 WY 与 SC 的协同关系所占区域更多,其中极显著和显著协同位于东北部和西南部,权衡关系多位于东南沿海地区,说明 WY 与 SC 的权衡与协同关系受到区域的地理位置和生态状况的影响。

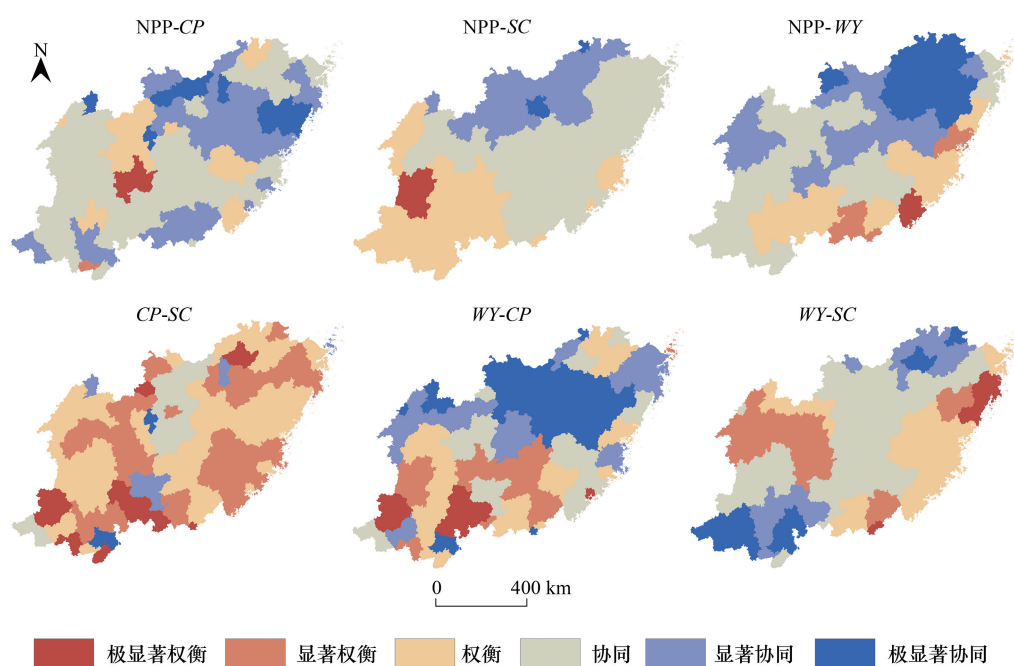


图 4 南方红壤区生态系统服务的权衡与协同

Fig. 4 Tradeoffs and synergies of ecosystem services in red soil region of southern China

2.3 生态系统服务间权衡与协同关系的空间异质性分析

如表 3 所示, Moran's I 指数均大于 0, 表明四种生态系统服务间权衡与协同关系均为正空间自相关。其中 CP - SC 关系的 Moran's I 指数最小, 为 0.012, 说明该权衡与协同关系空间自相关性较弱; 而 NPP - SC 和 NPP - WY 关系的 Moran's I 指数均大于 0.7, 说明该两种权衡与协同关系存在较强的空间自相关性。并且, 全

区生态系统服务的权衡与协同关系空间异质性显著(图 5)。从 NPP-CP 间权衡与协同关系的高高集聚反映协同关系的地区周围同样是协同关系,主要发生在研究区的东北部地区,表明该地区的 NPP-CP 的协同关系呈现集聚特征,而低低集聚特征反映出 NPP-CP 为权衡关系的地区周围同样为权衡关系,该特征主要发生在研究区的西北部地区。NPP-SC 和 NPP-WY 关系的集聚特征分布较为类似,协同关系集聚在北部地区,而权衡关系主要集聚在南部沿海地区及西南部地区;CP-SC 关系的空间异质性显著,仅在中部的 2 个单元中呈现高高集聚和西南部的 3 个单元中呈现出低低集聚特征。WY-CP 关系的高高集聚区域是在中北部地区,低低集聚区域分散在南部地区。但 WY-SC 间关系的高高集聚区域在西南部和东北部的少量区域,低低集聚分散在中部和东部区域,两种集聚均较为分散。对于四种生态系统服务,高高集聚与低低集聚范围均较小,生态系统服务间关系的空间异质性较为显著。

表 3 南方红壤区生态系统服务权衡与协同关系的 Moran's I						
Table 3 Moran's I index of ecosystem services tradeoffs and synergies in red soil region of southern China						
生态系统服务间关系 Relationship between ecosystem services	NPP-CP	NPP-SC	NPP-WY	CP-SC	WY-CP	WY-SC
Moran's I 指数 The index of Moran's I	0.225	0.705	0.739	0.012	0.381	0.431

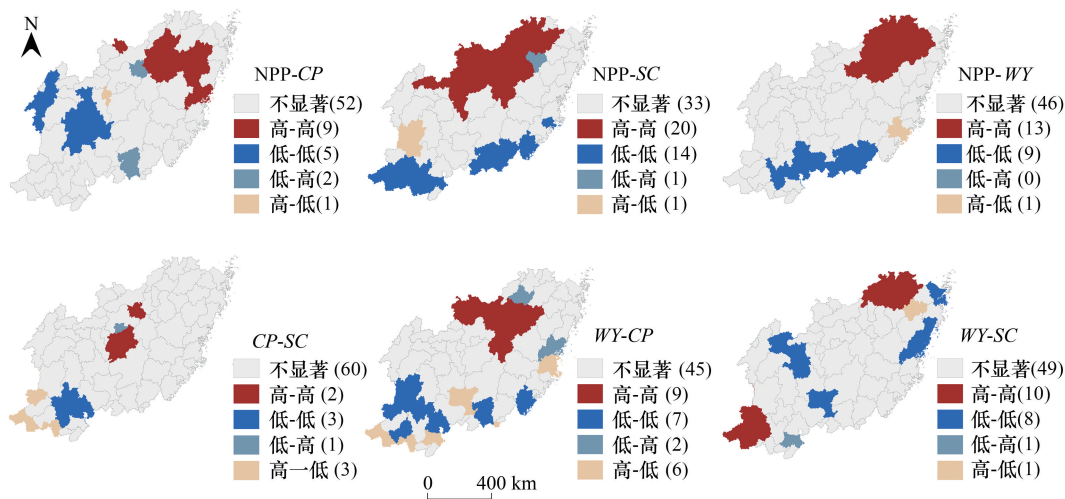


图 5 南方红壤区生态系统服务权衡与协同关系局部 LISA 图

Fig.5 Local LISA diagram of ecosystem service tradeoffs and synergies in the red soil region of southern China

3 结论与讨论

3.1 讨论

由于降水分布时空不均匀以及不合理开发利用造成的土地退化,导致南方红壤区的生态环境恶化,生态系统服务功能衰退^[22]。退耕还林的实施从空间格局和功能结构的完整性方面改善了生态系统提供服务的能力^[45]。退耕还林前后各项生态系统服务量存在较大差异。退耕还林后,全区的 NPP 增强区域占 60.1 %,CP 增强区域占 54.1 %,SC 增强区域占 88.8 %,WY 增强区域占 70.5 %。退耕还林对 SC 的影响最大,原因是林地保持水土的能力,而 CP 的增强有部分原因是 15 年间耕作方式变化和耕作技术的提高。由于植被覆盖度的增加,林木对降雨截留的能力增强,地表径流强度降低^[46-47],因此减少了土壤侵蚀,土壤状况得到改善,生态状况明显提升,NPP、SC 和 WY 增强。森林作为生态系统重要的组成部分,是大自然最稳定和丰富的碳汇库、基因库、资源库和蓄水库等,在固碳释氧、保持水土、涵养水源和维持生物多样性方面具有重要价值^[48]。

退耕还林后,SC 与 WY 之出现较强权衡关系。但在不同地区,SC 与 WY 之间关系并不相同,如王晓峰^[49]

在北方风沙区及黄土高原区得出这二者之间为显著协同关系,钱彩云^[50]在甘肃白龙江流域研究发现这二者之间也是权衡关系,王鹏涛^[18]在汉江上游研究结果显示部分区域为权衡关系,部分区域为协同关系。其可能原因是不同地域的自然及社会环境存在差异,南方地区的山地较多,坡度变化较大,景观较为破碎,而北方地区土地较为平整,同时不同地区的耕作方式也不同,致使研究结果表现出区域上的明显差异性^[51],反映出人为活动对生态系统服务间关系的影响。植树造林对整个生态系统的作用非常明显,虽然在生态系统服务间关系中也会带来一定的负面影响,但从长远目标来看,植树造林有利于生态稳定和人类所需服务的供给^[52]。

研究过程中存在部分数据可获取性低的问题,如农作物生产估算模型相关数据只有县域数据,导致结果精确度不高,对县以下单元的农作物生产服务的差异性表现不显著,因此难以表达与其余三种生态系统服务间关系的局部区域特征。未来可增加数据获取途径,比如问卷调查,搜集到乡镇级数据进行补充研究。本文中的降水量与蒸散发数据是基于气象站点得到,由于气象站点数量少且分布不均匀,因此在插值得到的结果精度不高,进而影响产水服务结果精度。因此未来若能获取更密集的气象监测数据将有利于数据精度的提高。此外,生态系统服务间的权衡与协同关系具有尺度效应。大尺度上的研究可以对国家或地区的生态系统服务间关系进行整体评估,而小尺度的研究则有利于更加精准的解决土地资源的使用矛盾。多时间尺度的结合研究也能促进对不同阶段的生态系统变化的了解,分析社会发展与生态环境间的关系,同时加强生态系统服务权衡与协同关系全面化和精确化研究,能更加灵活准确的制定优化生态系统服务及区域协调发展的战略决策。

3.2 结论

本文定量计算了南方红壤区退耕还林前后的四种生态系统服务,分析其时空变化特征,同时定量评价了生态系统服务相互关系在时空上的变化特征,并探讨了权衡与协同关系的空间集聚特征。相关结论及建议如下:

(1)规范经济林开发。退耕还林后,南方红壤区 SC 总体增强,但局部地区 SC 仍有减弱趋势。退耕还林的实施是以“生态优先”为原则,但一些地区为了追求短期和快速的利益,存在向侵蚀劣地“要地”,盲目扩大经济林种植面积的问题。并且,开发过程中特别是开发初期,缺乏水土保持措施,同时南方红壤区的山地坡度较大,降水集中且强度大,导致水土流失严重。因此需要研发经济林下水土保持植物筛选和种植技术,提高经济林的水土保持服务。同时规范经济林的开发,并建立起资源变化情况和生态状况定期定点监测机制,确保经济林的各项生态系统功能稳定。

(2)发展高效生态农业。NPP、CP、SC、WY 四种生态系统服务间的权衡与协同关系在空间上存在地域性差异。其中,CP 与 SC 在全区均表现为权衡关系,尤其在中部地区呈现极显著权衡关系,说明该地区农业生产与土壤保持存在严重矛盾,原因是该地区的山地较多,耕地坡度较大,农业生产带来的水土流失更严重。因此,应积极调整农业结构,改变原本单一的农业生产,大力推行农、林、牧业综合发展的高效生态农业。1)推广间混套作的种植模式,实现全年耕地绿色覆盖,做到“根不离土,土不离根”的农业生产模式,既能缓解红壤区季节性干旱造成的作物减产,又能保持水土;2)大力推行丘陵山地分层种植的“一丘多用”立体农林牧业模式,南方红壤区的山地丘陵面积广,发展立体农林牧业的优势较大,同时发展立体农林牧业能够减少林间的裸露面积,在促进农业生产的同时减弱水土流失,实现农作物生产与水土保持服务协同增强。按照因地制宜、梯次推进、分类施策的原则,确定不同生态农业的发展模式,以实现“保障粮食安全,守护生态环境”双赢。

参考文献 (References):

- [1] Boyd J, Banzhaf S. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*, 2007, 63 (2/3): 616-626.
- [2] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, Van Den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387 (6630): 253-260.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being*. Washington, DC: Island Press, 2005.

- [4] 闵勇, 常杰, 葛滢, 吴旭. 生态系统服务复杂关系研究的机遇、挑战与对策. 科学通报, 2012, 57(22): 2137-2142.
- [5] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法. 资源科学, 2016, 38(1): 1-9.
- [6] Rodríguez J P, Beard Jr T D, Bennett E M, Cumming G S, Cork S J, Agard J, Dobson A P, Peterson G D. Trade-offs across space, time, and ecosystem services. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 28.
- [7] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 朱文博, 马程, 王珏. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题. 地理研究, 2013, 32(8): 1379-1390.
- [8] Herrero M, Thornton P K, Gerber P, Reid R S. Livestock, livelihoods and the environment: understanding the trade-offs. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2009, 1(2): 111-120.
- [9] Butler J R A, Wong G Y, Metcalfe D J, Honzák M, Pert P L, Rao N, Van Grieken M E, Lawson T, Bruce C, Kroon F J, Brodie J E. An analysis of trade-offs between multiple ecosystem services and stakeholders linked to land use and water quality management in the Great Barrier Reef, Australia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 180: 176-191.
- [10] 孙艺杰, 任志远, 郝梦雅, 段艺芳. 黄土高原生态系统服务权衡与协同时空变化及影响因素——以延安市为例. 生态学报, 2019, 39(10): 3443-3454.
- [11] Xu X B, Yang G S, Tan Y, Liu J P, Hu H Z. Ecosystem services trade-offs and determinants in China's Yangtze River Economic Belt from 2000 to 2015. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 1601-1614.
- [12] Feng Q, Zhao W W, Hu X P, Liu Y, Daryanto S, Cherubini F. Trading-off ecosystem services for better ecological restoration: a case study in the Loess Plateau of China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 257: 120469.
- [13] 孙艺杰, 任志远, 赵胜男, 张静. 陕西河谷盆地生态系统服务协同与权衡时空差异分析. 地理学报, 2017, 72(3): 521-532.
- [14] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 高江波. 生态系统服务权衡/协同研究进展与趋势展望. 地球科学进展, 2015, 30(11): 1250-1259.
- [15] 赵文武, 刘月, 冯强, 王亚萍, 杨思琪. 人地系统耦合框架下的生态系统服务. 地理科学进展, 2018, 37(1): 139-151.
- [16] Vallet A, Locatelli B, Levrel H, Wunder S, Seppelt R, Scholes R J, Oszward J. Relationships between ecosystem services: comparing methods for assessing tradeoffs and synergies. *Ecological Economics*, 2018, 150: 96-106.
- [17] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 焦磊, 王浩, 延军平, 吕一河, 傅伯杰. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征. 地理学报, 2017, 72(11): 2064-2078.
- [18] Tian Y C, Wang S J, Bai X Y, Luo G J, Xu Y. Trade-offs among ecosystem services in a typical Karst watershed, SW China. *Science of the Total Environment*, 2016, 566-567: 1297-1308.
- [19] 冉凤维, 罗志军, 吴佳平, 齐松, 曹丽萍, 蔡正妹, 陈瑶瑶. 鄱阳湖地区生态系统服务权衡与协同关系的时空格局. 应用生态学报, 2019, 30(3): 995-1004.
- [20] Accatino F, Tonda A, Dross C, Léger F, Tichit M. Trade-offs and synergies between livestock production and other ecosystem services. *Agricultural Systems*, 2019, 168: 58-72.
- [21] 赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策. 生态学报, 2013, 33(24): 7615-7622.
- [22] 史志华, 杨洁, 李忠武, 李勇, 程栋梁, 袁再建. 南方红壤低山丘陵区水土流失综合治理. 水土保持学报, 2018, 32(1): 6-9.
- [23] 陈正林, 葛敦. 退耕还林工程建设研究综述. 现代农业科技, 2011, (22): 240-243, 245-245.
- [24] Dymond J R, Ausseil A G E, Ekanayake J C, Kirschbaum M U F. Tradeoffs between soil, water, and carbon—a national scale analysis from New Zealand. *Journal of Environmental Management*, 2012, 95(1): 124-131.
- [25] Schrobback P, Adamson D, Quiggin J. Turning water into carbon: carbon sequestration and water flow in the Murray-Darling Basin. *Environmental and Resource Economics*, 2011, 49(1): 23-45.
- [26] 王亚慧, 戴尔阜, 马良, 尹乐. 横断山区产水量时空分布格局及影响因素研究. 自然资源学报, 2020, 35(2): 371-386.
- [27] Naidoo R, Balmford A, Costanza R, Fisher B, Green R E, Lehner B, Malcolm T R, Ricketts T H. Global mapping of ecosystem services and conservation priorities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28): 9495-9500.
- [28] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [29] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413-424.
- [30] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [31] 刘勇洪, 高燕虎, 权维俊. 基于 NOAA 卫星数据的北京植被光能利用率及其时空格局. 中国农业气象, 2009, 30(4): 591-595.
- [32] Saxton K E, Rawls W J, Romberger J S, Papendick R I. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(4): 1031-1036.
- [33] 游松财, 邸苏闯, 袁晔. 黄土高原地区土壤田间持水量的计算. 自然资源学报, 2009, 24(3): 545-552.

- [34] Sharp R, Tallis H T, Ricketts T, Guerry A D, Wood S A, Chapin-Kramer R, Nelson E, Ennaanay D, Wolny S, Olwero N, Vigerstol K, Pennington D, Mendoza G, Aukema J, Foster J, Forrest J, Cameron D, Arkema K, Lonsdorf E, Kennedy C, Verutes G, Kim C K, Guannel G, Papenfus M, Toft J, Marsik M, Bernhardt J, Griffin R, Gowinski K, Chaumont N, Perelman A, Lacayo M Mandle L, Hamel P, Vogl A L, Rogers L, Bierbower W. InVEST 3.2.0 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, 2015.
- [35] Zhang L W, Fu B J, Lü Y H, Zeng Y. Balancing multiple ecosystem services in conservation priority setting. *Landscape Ecology*, 2015, 30(3): 535-546.
- [36] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, McCool D K, Yoder D C. Predicting Soil Erosion by Water: a Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington: US Government Printing Office, 1997: 703-703.
- [37] 饶恩明, 肖赓, 欧阳志云, 郑华. 海南岛生态系统土壤保持功能空间特征及影响因素. *生态学报*, 2013, 33(3): 746-755.
- [38] Li Y J, Zhang L W, Qiu J X, Yan J P, Wan L W, Wang P T, Hu N K, Cheng W, Fu B J. Spatially explicit quantification of the interactions among ecosystem services. *Landscape Ecology*, 2017, 32(6): 1181-1199.
- [39] 徐建华. 现代地理学中的数学方法(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2002: 10-17.
- [40] 马晓熠, 裴韬. 基于探索性空间数据分析方法的北京市区域经济差异. *地理科学进展*, 2010, 29(12): 1555-1561.
- [41] 蒲英霞, 葛莹, 马荣华, 黄杏元, 马晓冬. 基于 ESDA 的区域经济空间差异分析——以江苏省为例. *地理研究*, 2005, 24(6): 965-974.
- [42] 李传华, 赵军, 师银芳, 胡秀芳. 基于变异系数的植被 NPP 人为影响定量研究——以石羊河流域为例. *生态学报*, 2016, 36(13): 4034-4044.
- [43] 王姝, 张艳芳, 位贺杰, 张宏运. 生态恢复背景下陕甘宁地区 NPP 变化及其固碳释氧价值. *中国沙漠*, 2015, 35(5): 1421-1428.
- [44] 郭洪伟, 孙小银, 廉丽姝, 张大智, 徐燕. 基于 CLUE-S 和 InVEST 模型的南四湖流域生态系统产水功能对土地利用变化的响应. *应用生态学报*, 2016, 27(9): 2899-2906.
- [45] 张琨, 吕一河, 傅伯杰. 生态恢复中生态系统服务的演变: 趋势、过程与评估. *生态学报*, 2016, 36(20): 6337-6344.
- [46] 高磊, 杨现坤, 胡海珠, 吕喜玺, 侯国龙, Delang C, 王晓燕, 陈方鑫. 重庆市退耕还林工程实施的生态和经济效益分析. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 353-358.
- [47] 邹军, 张明礼, 杨浩. 退耕还林(草)与水土保持若干问题的研究进展. *土壤通报*, 2012, 43(2): 506-512.
- [48] Pang X, Nordström E M, Böttcher H, Trubins R, Mörtberg U. Trade-offs and synergies among ecosystem services under different forest management scenarios - The LECA tool. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 67-79.
- [49] 王晓峰, 马雪, 冯晓明, 周潮伟, 傅伯杰. 重点脆弱生态区生态系统服务权衡与协同关系时空特征. *生态学报*, 2019, 39(20): 7344-7355.
- [50] 钱彩云, 巩杰, 张金茜, 柳冬青, 马学成. 甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系. *地理学报*, 2018, 73(5): 868-879.
- [51] Kragt M E, Robertson M J. Quantifying ecosystem services trade-offs from agricultural practices. *Ecological Economics*, 2014, 102: 147-157.
- [52] 李蕾, 刘黎明, 谢花林. 退耕还林还草工程的土壤保持效益及其生态经济价值评估——以固原市原州区为例. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 161-163, 167-167.