

青藏高原生态屏障区生态系统服务权衡与协同关系

朱殿珍, 初磊, 马帅, 王良杰, 张金池

(南京林业大学 南方现代林业协同创新中心/江苏省水土保持与生态修复重点实验室, 南京 210037)

摘要:为了开展多种生态系统服务的可持续管理决策,厘清生态系统服务权衡与协同关系是重要的前提。以青藏高原生态屏障区为对象,采用土地利用数据、土壤数据、气象数据和 DEM 数据,分析了 2000—2015 年水土保持、水源涵养和碳储量服务的时空变化,识别了 3 种生态系统服务供给热点区,并分析了不同生态系统服务权衡与协同关系。结果表明:(1) 青藏高原生态屏障区 3 种生态系统服务水土保持、水源涵养和碳储量服务在空间上均表现为由东南向西北减少的趋势;(2) 2000—2015 年水源涵养和水土保持服务呈现下降趋势,减少量分别为 95.27 mm 和 1 081.38 t/hm²,碳储量呈现增加趋势,增加量为 25.77 g C/m²;(3) 研究区 1 类和 2 类热点区面积减少,3 类热点区以及非热点区面积增加,林地提供 3 种服务的能力强于草地;(4) 在空间上,2000—2015 年这 3 种生态系统服务两两之间的协同关系在变强,具体表现为相关系数的增加。在时间上,3 种生态系统服务两两之间的协同关系在变弱,具体表现为相关系数的减少。研究区 3 种生态系统服务在时空上存在不同的变化趋势;各服务间存在显著的协同关系,且随着时空变化协同关系也存在强弱变化。

关键词:生态系统服务;时空变化;权衡与协同;青藏高原生态屏障区

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0308-08

Tradeoff and Synergistic Relationship Among Ecosystem Services

ZHU Dianzhen, CHU Lei, MA Shuai, WANG Liangjie, ZHANG Jinchi

(Jiangsu Province Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration/Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: In order to make sustainable management decisions for multiple ecosystem services, it is important to clarify the relationship between ecosystem service tradeoffs and synergies. In this study, the spatiotemporal variations of soil conservation, water yield, carbon sequestration were analyzed using land use and land cover (LULC), soil types, meteorology, and DEM datasets in the Qinghai-Tibet Plateau Ecological barrier area of China. In addition, we identified hot spots for three ecosystem services supplies, and explored the tradeoff and synergistic among three ecosystem services. The results showed that: (1) the soil conservation, water yield and carbon storage all showed a decreasing trend from southeast to northwest; (2) from 2000 to 2015, water yield and soil conservation showed a downward trend with a decrease of 95.27 mm and 1 081.38 t/hm², while an increasing trend of carbon storage was found with an increases of 25.77 g C/m²; (3) the area of the first and second type hot spot decreased, while the area of the third type hot spot and non-hot spot increased; forest provided stronger ecosystem services than those of grassland in the study area; (4) from 2000 to 2015, in terms of space, the synergy between the three ecosystem services was getting stronger, which was reflected by the increase of correlation coefficients; according to timelines, the mutual relationships among the three ecosystem services were weakening, showing a decrease in correlation coefficients. The spatiotemporal variation trends of the three ecosystem services in the study area were different. There were the significant synergies among services, and there was also strong and weak change with spatiotemporal variation.

Keywords: ecosystem services; spatiotemporal variation; tradeoff and synergies; Qinghai-Tibet Plateau ecological barrier

收稿日期:2020-07-13

修回日期:2020-08-17

资助项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0507304);国家自然科学基金(41601209)

第一作者:朱殿珍(1994—),女,甘肃武威人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail:zdz2212@163.com

通信作者:王良杰(1982—),男,江苏南京人,博士,副教授,主要从事生态遥感研究。E-mail:pawangwlj@outlook.com

生态系统服务指生态系统所形成和维持的人类赖以生存和发展的自然环境条件与效用^[1],也是人类直接或者间接从生态系统中获取的所有收益^[2]。由于生态系统服务种类的多样性、空间分布的不均衡性以及人类使用的选择性,使生态系统服务之间的关系出现了动态变化,主要表现为此消彼长的权衡和相互增益的协同等形式^[3-4]。其中权衡是指某种类型生态系统服务的增加或减少导致其他服务的减少或增加;协同是指两种或两种以上的生态系统服务的供给同时增加或减少^[2,4]。厘清生态系统服务之间权衡与协同的时空变化特征,明晰生态系统服务权衡与协同关系,对促进区域的发展以及生态环境保护具有重要意义^[5],也是实现区域可持续管理决策的重要前提。

生态系统服务及其相互关系的研究近年来已经成为地理学、生态学以及生态经济学等多学科的研究热点,受到了许多学者的关注^[1-2,4,6-7]。武文欢等^[8]采用相关分析法探讨了半干旱地区生态系统服务的权衡与协同关系,并分析了不同土地利用类型的生态系统服务间的差异。王晓峰等^[1]使用 Sen 趋势度法和偏相关分析法对新疆 3 种生态系统服务间的时空变化及权衡与协同关系进行了分析。饶胜等^[9]探讨了草原生态系统中畜产品与防风固沙间的权衡关系,并得到了适用于该地区的最佳生物量分配方式。林子雁等^[10]分析了中国西南地区 5 项供给服务间的权衡与协同关系,并通过叠罗分析识别了生态系统服务共赢区域。巩杰等^[6]研究了西部山区流域生态系统服务间多尺度权衡关系,发现土地利用/覆盖格局的空间差异是影响服务权衡程度与空间变异的重要因素。综上所述,虽然生态系统服务权衡与协同的研究较多,但青藏高原作为我国生态环境敏感脆弱区^[11-13],对该区域生态系统服务空间权衡/协同变化研究目前并不多见,因此,评价青藏高原生态系统服务的变化和权衡/协同关系,可为区域生态系统保护与管理决策提供依据。

青藏高原作为“世界屋脊”,是我国和亚洲的“江河源”,也是我国水资源安全的战略基地^[14]。它特有的气候和地理条件决定了其生态系统的脆弱性和敏感性^[12]。青藏高原生态屏障区是我国生态安全的关键屏障区域,对其生态系统服务进行准确的量化是理解屏障区生态服务功能演变的重要基础。研究青藏高原生态屏障区碳固定、土壤保持和水源涵养等生态系统服务功能的分布规律及权衡/协同关系,可为该区域的生态保护和优化管理提供参考^[15]。本研究采用 RUSLE 模型、InVEST 模型、CASA 模型,基于 ArcGIS 软件平台,评估青藏高原屏障区 2000—2015 年土壤保持、水源涵养、碳储量的空间分布格

局,采用相关性分析方法,探讨各服务之间的权衡与协同关系,研究不同时期生态系统服务的变化特征,初步揭示生态屏障区生态系统服务的时空变化规律。

1 研究区概况

青藏高原生态屏障(82°50′—105°5′E, 29°40′—38°10′N)是国家“两屏三带”生态格局中青藏高原生态屏障的空间载体,范围涉及青海、西藏、甘肃、四川等地区,面积约 89.65 万 km²(图 1);地貌类型以高原为主;平均海拔在 4 000 m 以上;气候特点为辐射强烈,日照多,气温低,积温少,气温随高度和纬度的升高而降低,气温日较差大,年变化小。年平均气温由东南的 20℃ 向西北递减至 -6℃ 以下;年降水量由东南的 2 000 mm 递减至西北的 50 mm 以下;主要的植被类型为山地森林、高寒草甸和高寒草原。

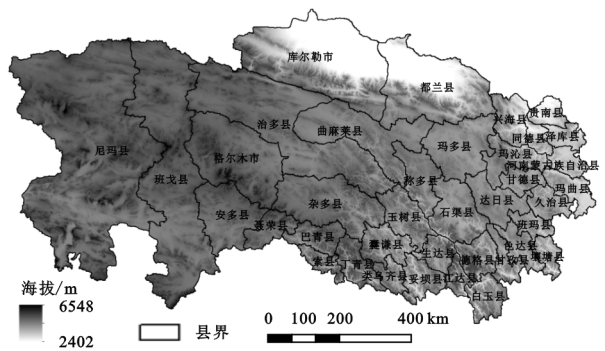


图 1 研究区地理位置

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文数据包括:(1) 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年的土地利用/植被覆盖数据,来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 1 km;(2) 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年气象数据来自于 World climate(<http://www.worldclimate.com/>)和中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 1 km;(3) 土壤数据来自于世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database version, HWSD)该数据包含土壤类型、土壤质地、土壤有机碳含量等资料,比例尺为 1:100 万;(4) DEM 数据来自国家青藏高原科学数据中心(<http://www.tpd.ac.cn/zh-hans/>),空间分辨率为 1 km。将各个数据统一到 Albers 投影。

2.2 研究方法

2.2.1 生态系统服务定量评估方法 (1) 土壤保持。本研究采用 RUSLE 模型来分别评估青藏高原生态屏障区 2000—2015 年的土壤保持量。土壤保持量为潜在的土壤侵蚀量和现实的土壤侵蚀量之差。计算

公式如下:

$$A_C = A_P - A_R \quad (1)$$

$$A_P = R \cdot K \cdot LS \quad (2)$$

$$A_R = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (3)$$

式中: A_C 为土壤的保持量 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; A_P 为潜在的土壤侵蚀量 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; A_R 为土壤现实的侵蚀量 [$t/(hm^2 \cdot a)$]; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; LS 为坡度和坡长因子的乘积; C 为植被的覆盖度与经营管理因子; P 为土壤的保持措施因子。各因子详细计算参见文献[16]。该评价方法在三江源区[17], 取得了良好的结果。

(2) 水源涵养。通过 InVEST 模型中 Water Yield 模块进行水源涵养量的估算, 其计算原理是水量平衡方程。估算公式如下:

$$WR = \min(1249/V) \times \min(1, 0.31TI) \times \min(k/300) \times Y \quad (4)$$

$$TI = \lg[DA/(SD \times PS)] \quad (5)$$

$$Y_{xj} = (1 - AET_{xj}/P_x) P_x \quad (6)$$

式中: WR 为多年平均水源涵养量(mm); V 为流速系数; TI 为地形指数; k 为土壤饱和导水率(cm/d); Y 为流域产水量(mm); DA 为流域集水区栅格数量, 无量纲; SD 为土层深度(mm); PS 为百分比坡度; Y_{xj} , AET_{xj} 分别为栅格 x 中土地利用/覆盖类型 j 的年产水量(mm)和年实际蒸散量(mm); P_x 为栅格 x 的年均降水量(mm)。计算过程与原理参见文献[18]。该评价方法已成功应用于拉萨河流域[12], 并得出了良好的评价结果。

(3) 碳储存。生态系统提供的碳储存服务可由植被净初级生产力(NPP)进行表示, 本文使用 CASA 模型估算(NPP)。计算公式如下:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (7)$$

式中: $NPP(x, t)$ 为栅格 x 在 t 时间内的净初级生产力 [$g C/(m^2 \cdot a)$]; $APAR(x, t)$ 为空间位置 x 在时间 t 内吸收的光合有效辐射(MJ/m^2); $\epsilon(x, t)$ 为栅格 x 在时间 t 内的实际光能利用率($g C/MJ$)。参数确定及模型计算方法参见文献[19]。该评价方法已经在三江源地区[20]得出了良好的评价结果。

2.2.2 生态系统服务相关性分析与热点区识别 在评估生态系统服务的基础上, 通过识别青藏高原生态屏障区的服务热点区来探讨研究区不同区域服务供给能力的强弱。将研究区 3 种生态系统服务超过当年各自平均值的地区视为该服务的热点区[8, 21], 借助 ArcGIS 10.3 软件将各单项生态系统服务的热点区进行空间叠加, 得出多重生态服务热点区分布。若某一栅格内 3 种服务的值均未超过各自的平均值, 则定义为非热

点区。“1, 2, 3 类服务热点区”分别表示有 1, 2, 3 种服务的值超过了平均值, 并采用 ArcGIS 10.3 软件得到多重生态系统服务热点区的空间分布格局。

本文基于 SPSS 22.0 软件, 以 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年 3 种生态系统服务的评估值为基础, 采用相关分析法对研究区生态系统服务间权衡/协同关系进行量化, 若呈负相关, 则认为服务之间存在空间权衡关系; 若为正相关, 则认为服务之间为协同关系[6], 当相关性通过显著性检验时为显著权衡/协同, 否则为弱权衡/协同或关系不明显。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务时空变化

青藏高原生态屏障区生态系统服务的空间分布情况和各服务结果见图 2 和表 1。研究期间青藏高原生态屏障区水源涵养量为 0~1 090.31 mm。2000 年、2005 年、2010 年及 2015 年的年平均水源涵养量为 142.45, 194.76, 137.25, 47.18 mm, 多年水源涵养量均值为 130.41 mm。多年来, 水源涵养量呈现先增加后减少的趋势。总体来看, 水源涵养呈下降趋势, 其减少量为 95.27 mm。水源涵养量最值变化不同, 最大值降低。水源涵养主要受降水和蒸发散的影响。研究区 2000—2015 年降雨量呈现先增加后较少的趋势, 蒸发散量呈明显增加趋势; 2010 年和 2015 年降水量较 2000 年与 2005 年降低了 12.3%, 22.5%, 而蒸发散量增加 4.6%, 4.7%, 2010 年与 2015 年水源涵养服务减少较明显。在空间上, 水源涵养服务呈现出东部地区高西部地区低的空间分布格局(图 2)。2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年水源涵养高于其均值的区域分别为 41.3%, 50.6%, 58.5%, 34.2%, 主要分布在东南部地区。低值区主要集中在北部库勒市和都兰县; 土地利用类型主要以盐碱地、裸岩和戈壁为主, 因此水源涵养量少。

2000 年、2005 年、2010 年、2015 年青藏高原生态屏障区年平均土壤保持量依次为 2 658.29, 3 062.09, 2 645.43, 1 576.91 t/hm^2 , 多年平均土壤保持量为 2 485.68 t/hm^2 。15 a 间, 土壤保持年均值呈倒“V”型减少, 减少量为 1 081.38 t/hm^2 。土壤保持服务最大值也由 2000 年的 1 094 358 t/hm^2 下降到 2015 年的 705 989 t/hm^2 , 减少了 388 369 t/hm^2 。土壤保持功能除了受到降雨量的影响之外, 还与研究区的土地利用变化有关, 2010 年后研究区建设用地有所增加, 降低了植被覆盖, 导致土壤保持量减少。空间分布上, 土壤保持服务呈现由东南向西北递减的空间分布

格局(图 2),高值区主要分布在东南地区,70%的区域高于 2 500 t/hm²;低值区集中分布在西北地区,超过 80%的地区低于 2 000 t/hm²,主要受青藏高原生态屏障区土地利用类型的空间分布影响。

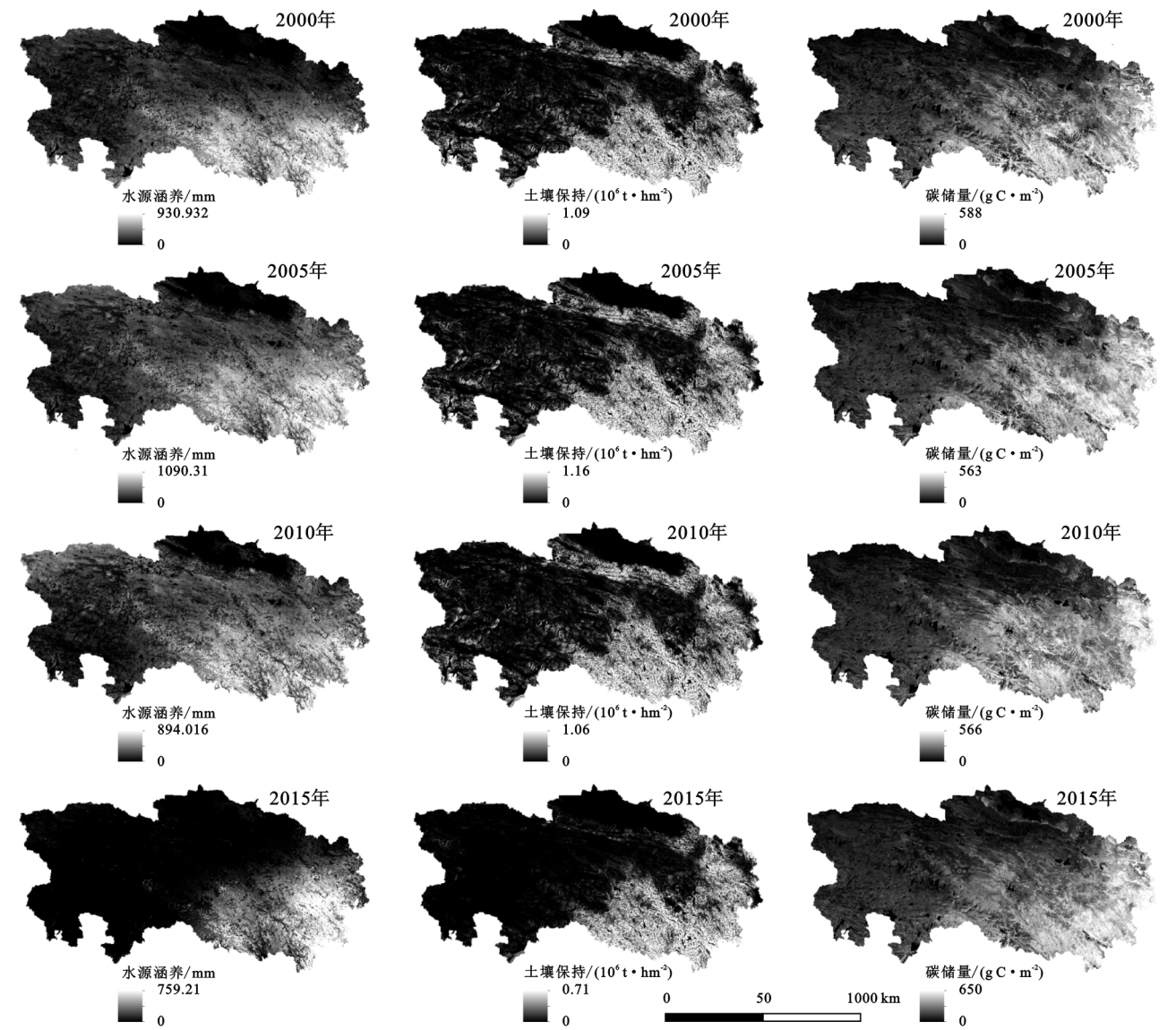


图 2 2000—2015 年青藏高原生态屏障区生态系统服务时空分布

表 1 2000—2015 年青藏高原生态屏障区生态服务

年份	水源涵养/mm			碳储存/(g C · m ⁻²)			土壤保持/(t · hm ⁻²)		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
2000	930.63	0	142.45	588	0	109.77	1094358	0	2658.29
2005	1090.31	0	194.76	563	0	132.36	1165625	0	3062.09
2010	894.01	0	137.25	566	0	138.28	1063948	0	2645.43
2015	759.21	0	47.18	650	0	135.54	705989	0	1576.91

2000 年、2005 年、2010 年、2015 年青藏高原生态屏障区的年均碳储量分别为 109.77,132.36,138.28,135.54 g C/m²。多年平均值为 128.98 g C/m²。2000—2015 年年均碳储量呈现增加趋势,增加量为 25.77 g C/m²。碳储存最大值从 2000 年的 588 g C/m²增加到了 2015 年的 650 g C/m²。空间上,碳储存呈现东南高西北低的空间分布格局(图 2),

2000 年、2005 年、2010 年、2015 年的碳储存高于均值的区域分别占 48.3%,51.7%,56.5%,58.1%,主要分布在东南地区,青藏高原大部分的森林位于东南部山区。

3.2 生态系统服务变化

由图 3A 可知,2000—2015 年水源涵养服务在 -161.78~73.08 mm/a 变化。在空间上呈现出明显

的变化规律,北部减少南部增多。同时,在空间上表现出明显的减少趋势,其减少区域(95.6%)大于增加

区域(4.4%),增加区域主要以东部的玛沁县、同德县、泽库县和河南蒙古自治县为主。

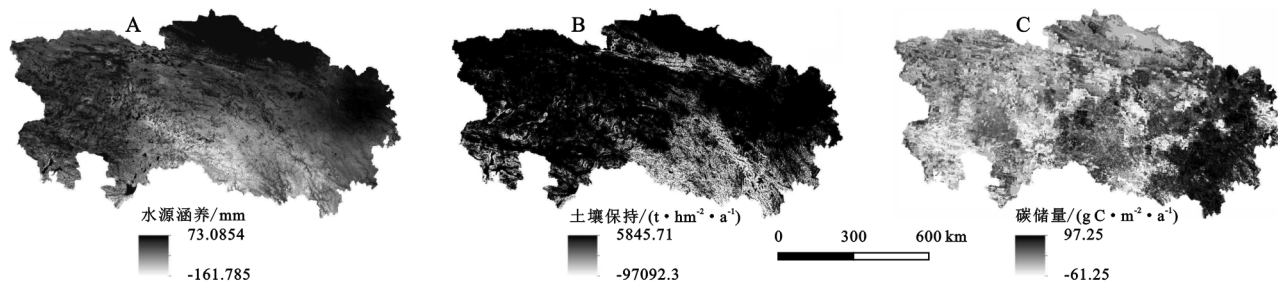


图3 2000—2015年青藏高原生态屏障区生态系统服务变化空间分布

土壤保持服务变化值介于 $-97\ 092.3\sim 5\ 845.71\ \text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ (图3B)。其空间变化趋势为西北增东南减的趋势。同时,在15 a间土壤保持服务表现为明显的减少趋势,减少的区域超过90%。

碳储存服务在 $-61.25\sim 97.25\ \text{g C}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 变化(图3C)。同时,碳储存服务表现出西减东增的空间变化特点,且增加区域(73.9%)大于减少区域(26.1%),增加区域主要集中在东部地区。

3.3 生态系统服务权衡与协同

图4是生态系统服务散点图矩阵,对角线上是3种服务的直方图及核密度曲线,直方图反映横轴数据的分布特征,核密度曲线反映数据的集中程度;对角线以上是各服务间的相关系数,对角线以下是各服务点间的散点图及平滑拟合曲线。从图4可看出,在分布特征上水源涵养、碳储量和土壤保持的数据点分布较为分散;从相关性来看,青藏高原生态屏障区土壤保持服务、水源涵养服务、碳储存服务两两之间的相关系数均达到了显著性水平。同时,土壤保持服务与水源涵养服务、土壤保持服务与碳储存服务和水源涵养服务与碳储量服务之间的相关系数均大于0,说明二者之间是相互增益的协同关系,且两两之间显著相关。2000—2015年青藏高原生态屏障区内生态系统服务之间的相关性均先降低后升高。总体而言其相关性有所升高,具体表现为相关系数的增加,土壤保持服务与碳储量服务的相关系数由2000年的0.32增加为2015年的0.36,水源涵养服务与碳储存服务的相关系数由0.27增加为0.29。综上所述,在空间上,2000—2015年3种生态系统服务两两之间的协同关系在变强,具体表现为相关系数的增大。

由表2可知,土壤保持和碳储存从2000—2005年的相关系数为0.204变为2010—2015年的0.025。由于2010—2015年的相关系数为0.025,表明其作用在变弱,因此在2000—2015年两者间的协同关系在变弱。土壤

保持与水源涵养、水源涵养与碳储存在2000—2005年、2005—2010年和2010—2015年相关系数分别为0.258, 0.318, 0.15, 0.354, 0.178, 0.179。且都通过了0.01或0.05水平显著检验,表明其两两之间表现为协同关系,并且之间的关系在变弱。综上所述,在时间上,2000—2015年3种生态系统服务两两之间的协同关系在变弱,具体表现为相关系数的减少。

3.4 热点区识别

青藏高原生态屏障区多重生态系统服务热点区分布见图5。2000年、2005年、2010年、2015年非热点区的面积百分比分别为46.73%, 44.85%, 39.87%, 57.37%, 主要的土地利用类型为草地、建设用地和未利用地。15年间,1类热点区由24.20%减少到16.88%,该类热点区的主要土地利用类型为草地,主要以碳储存服务为主。2类热点区面积百分比从24.21%下降到了14.53%,面积减少了9.68%,土地利用类型主要为草地;中部主要以土壤保持和水源涵养服务为主,东部主要以碳储存和水源涵养服务为主。3类热点区从2000年的10.64%增加到了11.22%,面积增加了0.58%,主要土地利用类型林地。整体来看,青藏高原生态屏障区非热点区域面积增加,1类和2类热点区面积减少,3类热点区面积增加,多重服务热点区大多土壤条件优良、植被覆盖较好,因而具有较强的土壤保持、碳储存和水源涵养能力。

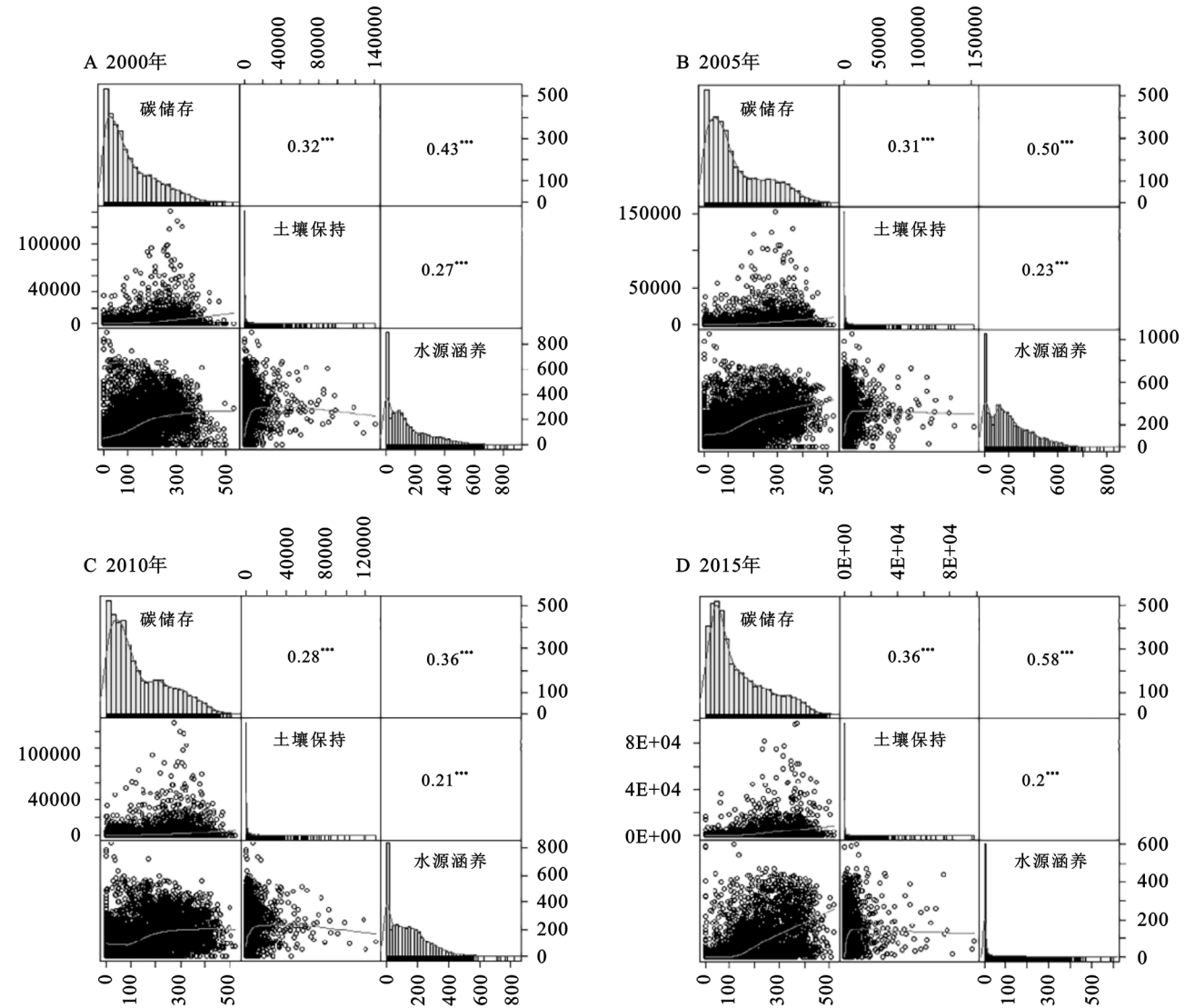
4 讨论

4.1 生态系统服务的时空变化分析

以青藏高原生态屏障区为研究区,分析了2000—2015年土壤保持、水源涵养和碳储存3种生态系统服务的时空变化及权衡与协同关系,发现生态系统服务的变化与区域的降水量有关^[11,21-22],降水量通过影响RUSLE式中的降雨侵蚀力因子来影响土壤保持功能^[23];降水量通过制约CASA模型中的水分胁迫系数来影响碳储量^[21,24];水源涵养的变化主

要受降水量和蒸发散的影响,是降水量与蒸发散量之差^[24];15 a 来研究区降水量降低了 44.7%,蒸发散增加了 6.7%,相应的 3 种服务也有所变化。有研究表明,NDVI 与 NPP 之间存在较强的相关性^[25-26],2000—2015 年,青藏高原 NDVI 呈现增加的趋势^[27],因此青藏高原 NPP 也在增加,这与本研究中碳储存呈现增加趋势这一结果相吻合。有学者研究了青藏高原的降雨变化特征,指出青藏高原的降雨量

呈现明显的减少趋势^[28],如怒江流域^[29]、西藏地区^[30]以及青藏高原南部地区^[31]降雨均出现减少的趋势。同时,气温的升高导致蒸发散加强,使得水源涵养年际变化出现波动。影响土壤保持功能的主要因素为植被和降雨^[7,21,32],植被覆盖度高,减缓土壤侵蚀,使得土壤保持功能水平较高。也有研究表明青藏高原极端降雨次数逐年增多^[33],随着强降雨次数的增加,使得土壤侵蚀加剧,导致土壤保持功能降低。



注:***表示在 0.001 水平显著。

图 4 青藏高原生态屏障区生态系统服务相关系数分布

表 2 2000—2015 年生态系统服务变化相关系数

生态系统服务	2000—2005 年	2005—2010 年	2010—2015 年
碳储存—土壤保持	0.204 **	0.147 **	0.025 *
碳储存—水源涵养	0.354 **	0.178 **	0.179 **
水源涵养—土壤保持	0.258 **	0.318 **	0.15 **

注: * 表示在 0.05 水平显著; ** 表示在 0.01 水平显著。

在空间上,土壤保持服务的高值区主要集中在东南地区,土地利用类型以草地和林地为主,植被覆盖

度高,减少了土壤侵蚀;中部的库尔勒市、都兰县以建设用地和未利用地为主,植被覆盖低、人类对生态服务干扰大^[34],土壤保持服务服务较低。同时,研究区土壤保持服务的高值区与坡度值高的地区空间分布一致,表明地形对生态系统服务具有一定的影响,应该加强对高原高坡植物的保护^[35]。水源涵养的高值区多分布在东南部的林地,这是因为林地植被覆盖度高,蒸腾作用较小,且降雨截留量大,径流量少,所以

水源涵养量较高^[22,32]。碳储存的高值区集中在东南部海拔相对较高的山地林区,山地林区植被类型丰富,凋落物多且分解速率较快,使土壤中有有机质积累增加,碳储存量增加^[24,36-37]。研究区的东南部山地林区为 3 种服务的多重服务热点区,而且 2015 年多重服务热点区面积比 2000 年增多,本研究认为林地有利于提高青藏高原的土壤保持、水源涵养和碳储量服

务的供给能力,高敏等^[7]在喀斯特地区的研究表明随着退耕还林政策的实施,区域提供生态系统服务的能力在不断增强,多重生态系统服务热点区面积逐年增加。此外,研究还发现林地的水源涵养、土壤保持和碳储存服务供给能力均强于草地,因此应该适当的增加林地的面积,有助于提高青藏高原生态屏障区的生态系统服务供给能力。

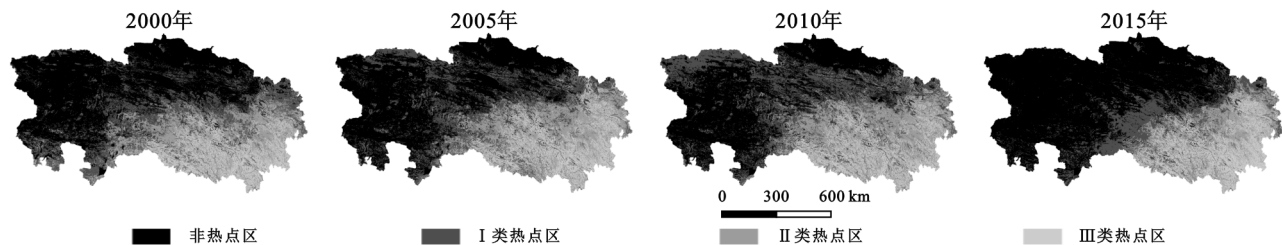


图 5 2000—2015 年青藏高原生态屏障区生态系统服务热点区分布

4.2 生态系统服务的权衡与协同关系分析

从权衡与协同关系变化上来看,在空间上,研究区的水源涵养与土壤保持、土壤保持与碳储存、水源涵养与碳储存服务之间均表现为相互增益的协同关系,且协同关系在变强。碳储存与土壤保持为协同关系,是由于植被覆盖度高,增加了碳储存,同时植被具有截持降雨、固结土壤的能力,减少了土壤流失,加强了土壤保持能力^[8,21],研究区 15 a 来降雨不断减少,减缓了土壤侵蚀,因此加强了土壤保持与碳储存之间的协同关系。碳储存与水源涵养之间的关系为协同关系,是因为植被覆盖度的提高在增加碳储量的同时,也会截留降雨,减少径流,从而增加水源涵养量^[38]。研究区水源涵养从 2000—2005 年呈增加趋势,使碳储存与水源涵养之间的协同关系增强;但 2005 年后,随着研究区降水量的减少,水源涵养量也逐渐减少,导致两者之间的协同关系变弱。土壤保持与水源涵养之间为协同关系,主要是林地植被覆盖度高,凋落物层厚且人为活动较弱,同时茂密的林地减少了水分蒸发和水力侵蚀^[7];从 15 a 的土壤保持量与水源涵养量平均值的变化看,研究区内两者均表现为先增加后减少的趋势,两者的变化趋势一致,但是水源涵养量的变化速率大于土壤保持量,导致土壤保持与水源涵养之间的协同关系先变弱再变强。在时间上青藏高原生态屏障区 3 种生态系统服务的年变化量随着时间变化在减少,降雨量和蒸发散的变化率均在增大,使得 3 种服务的变化率在减小,导致 3 种服务之间的协同关系在时间变化上是减弱。在本研究中,只对生态系统服务权衡与协同之间的关系进行分析,在后续的研究中还应加强对权衡与协同关系内在机理的研究。

5 结论

(1) 2000—2015 年,在空间上,青藏高原生态屏障区的 3 种生态系统服务土壤保持、水源涵养和碳储量服务均表现为由东南向西北减少的趋势;在时间上,土壤保持与水源涵养服务显著减少,减少量分别为 $1\,081.38\text{ t/hm}^2$, 95.27 mm 。而碳储存呈现增加趋势,增加量为 25.77 g C/m^2 。研究区 1 类和 2 类热点区面积减少,3 类热点区以及非热点区面积增加。

(2) 土壤保持、水源涵养和碳储量服务之间的相关系数均大于 0,且都通过了 0.001,0.01 或 0.05 显著性水平的检验。在空间上,2000—2015 年 3 种生态系统服务两两之间的协同关系在变强,具体表现为相关系数的增大;在时间上,3 种生态系统服务两两之间的协同关系在变弱,具体表现为相关系数的减少。

(3) 青藏高原生态屏障区中存在多种多样的生态系统服务,本研究只选取了其中主要的 3 种生态系统服务进行权衡与协同关系的研究。在未来的研究中还需要对青藏高原生态屏障区生态系统服务进行更加全面细致的评估,分析多项服务间的权衡协同关系,以便于更好的管理和优化,为政府制定更加全面的生态保护策略提供参考。

参考文献:

- [1] 王晓峰,程昌武,尹礼唱,等.新疆生态系统服务时空变化及权衡协同关系[J].生态学报,2020,39(3):990-1000.
- [2] 尹礼唱,王晓峰,张琨,等.国家屏障区生态系统服务权衡与协同[J].地理研究,2019,38(9):2162-2172.
- [3] 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].地理研究,2013,32(8):1379-1390.
- [4] 刘洋,毕军,吕建树.生态系统服务权衡与协同关系及驱

- 动力:以江苏省太湖流域为例[J].生态学报,2019,39(19):7067-7078.
- [5] 袁周炎妍,万荣荣.生态系统服务评估方法研究进展[J].生态学报,2019,38(5):210-219.
- [6] 巩杰,柳冬青,高秉丽,等.西部山区流域生态系统服务权衡与协同关系:以甘肃白龙江流域为例[J].应用生态学报,2020,31(4):1278-1288.
- [7] 高敏,王勇,高洁,等.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[J].水土保持研究,2020,27(2):276-283.
- [8] 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.
- [9] 饶胜,林泉,王夏晖,等.正蓝旗草地生态系统服务权衡研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(3):81-86.
- [10] 林子雁,肖焱,饶恩明,等.中国西南地区不同类型生态系统服务的关系[J].应用生态学报,2020,31(3):978-986.
- [11] 郑德凤,郝帅,吕乐婷,等.三江源国家公园生态系统服务时空变化及权衡—协同关系[J].地理研究,2020,39(1):64-78.
- [12] 卢慧婷,黄琼中,朱捷缘,等.拉萨河流域生态系统类型和质量变化及其对生态系统服务的影响[J].生态学报,2018,38(24):8911-8918.
- [13] Li S C, Zhang H, Zhou X W, et al. Enhancing protected areas for biodiversity and ecosystem services in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Ecosystem Services*, 2020, 43, DOI: 10.1016/j.ecoser.2020.101090.
- [14] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,等.青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J].地理学报,2012,67(1):3-12.
- [15] 程琳琳,刘华,刘焱序.青藏高原保护区植被与生态系统服务功能变化的一致性分析[J].水土保持通报,2018,38(6):277-282.
- [16] 顾羊羊.太湖流域生态系统服务时空权衡与协同效应分析[D].河南焦作:河南理工大学,2017.
- [17] 冯晓琦,黄斌斌,李若男,等.三江源区生态系统和土壤保持服务对未来气候变化的响应特征[J].生态学报,2020,40(18):6351-6361.
- [18] 孙亚楠.农牧交错带土地利用变化对生态系统服务的影响[D].呼和浩特:内蒙古大学,2018.
- [19] 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[J].植物生态学报,2007,31(3):413-424.
- [20] 沃笑,吴良才,张继平,等.基于 CASA 模型的三江源地区植被净初级生产力遥感估算研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(9):45-50.
- [21] 戴路伟,唐海萍,张钦,等.北方农牧交错带多伦县生态系统服务权衡与协同关系研究[J].生态学报,2020,40(9):2863-2876.
- [22] 张雪峰,牛建明,张庆,等.内蒙古锡林河流域草地生态系统水源涵养功能空间格局[J].干旱区研究,2016,33(4):814-821.
- [23] 王川,刘春芳,乌亚汗,等.黄土丘陵区生态系统服务空间格局及权衡与协同关系:以榆中县为例[J].生态学杂志,2019,38(2):521-531.
- [24] Wang J T, Peng J, Zhao M Y, et al. Significant trade-off for the impact of Grain-for-Green Programme on ecosystem services in North-western Yunnan, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 574:57-64.
- [25] 林志东,武国胜.基于 MODIS 的大田县均溪谷地 NPP 与 NDVI 相关性的时空变化特征[J].亚热带资源与环境学报,2015,10(1):27-33.
- [26] 高子恒,柳艺博,丁炜.基于风云四号遥感数据的 NDVI 估算中国陆地地区植被 NPP[J].江苏海洋大学学报:自然科学版,2020,29(1):40-50.
- [27] 王塞,王思诗,樊风雷.基于时间序列分割算法的雅鲁藏布江流域 NDVI(1985—2018)变化模式研究[J].生态学报,2020,40(19):6863-6871.
- [28] 周天财,孙建,于欢.1980—2013 年青藏高原气候时空变化特征研究[J].成都信息工程大学学报,2017,32(5):524-531.
- [29] 洪美玲,何士华.1961—2010 年怒江流域降雨时空变化[J].水土保持研究,2019,26(3):248-252.
- [30] 杨霞,旦增旺姆,扎西央宗.西藏地区降水变化特征与影响因素分析[J].现代农业科技,2014(24):229.
- [31] 谭春萍,杨建平,米睿.1971—2007 年青藏高原南部气候变化特征分析[J].冰川冻土,2010,32(6):1111-1120.
- [32] 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.
- [33] 冯晓莉,申红艳,李万志,等.1961—2017 年青藏高原暖湿季节极端降水时空变化特征[J].高原气象,2020,39(4):694-705.
- [34] Qiao X N, Gu Y Y, Zou C X, et al. Temporal variation and spatial scale dependency of the trade-offs and synergies among multiple ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651:218-229.
- [35] 孙艺杰,任志远,郝梦雅,等.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[J].生态学报,2019,39(10):3443-3454.
- [36] 王建,王根绪,王长庭,等.青藏高原高寒区阔叶林植被固碳现状、速率和潜力[J].植物生态学报,2016,40(4):374-384.
- [37] 王艳丽,字洪标,程瑞希,等.青海省森林土壤有机碳氮储量及其垂直分布特征[J].生态学报,2019,39(11):4096-4105.
- [38] 冉凤维.鄱阳湖地区生态系统服务权衡与协同研究[D].南昌:江西农业大学,2019.