

DOI: 10.5846/stxb201904180786

高超, 赵军, 王玉纯, 金贵峻, 王建邦, 胡秀芳. 石羊河流域自然植被对生态系统服务的约束效应. 生态学报, 2020, 40(9): 2851-2862.

Gao C, Zhao J, Wang Y C, Jin G J, Wang J B, Hu X F. Study on the constraint effect of natural vegetation on ecosystem services in the Shiyang River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(9): 2851-2862.

# 石羊河流域自然植被对生态系统服务的约束效应

高 超<sup>1,2</sup>, 赵 军<sup>1,\*</sup>, 王玉纯<sup>1</sup>, 金贵峻<sup>2</sup>, 王建邦<sup>1</sup>, 胡秀芳<sup>3</sup>

1 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 735300

2 甘肃林业职业技术学院, 天水 741020

3 南通大学地理科学学院, 南通 226007

**摘要:** 石羊河流域生态环境退化, 生态屏障功能减弱, 提高该地区生态系统的服务功能具有重要意义。植被的生长状况是影响生态系统服务供给的重要因素, 定量的探讨分析植被与生态系统服务之间的关系十分必要。以石羊河流域为研究区, 采用约束线法, 分析了植被对产水量、土壤保持及固碳 3 个生态系统服务的约束效应; 同时, 计算了 2015 年这 3 个生态系统服务潜力的空间分布及石羊河流域综合潜力分布格局。结果表明: (1) 植被覆盖度与产水量、土壤保持之间的约束线呈开口向下抛物线型, 即随着植被覆盖度的增加, 约束效应逐渐减小, 后逐渐增大; 与固碳服务呈正凸型, 即: 植被覆盖度能有效的约束固碳, 且成比例增加约束效应; (2) 植被覆盖度对产水量、土壤保持及固碳服务的约束效应存在时空异质性; (3) 石羊河流域三种服务的提升潜力均呈西南高东北低、高服务值与高潜力值并存的分布特征, 其中东大河、西大河、西营河及古浪河是流域生态服务的主要供给者和提升潜力的主要贡献者。

**关键词:** 生态系统服务; 自然植被; 约束效应; 石羊河流域

## Study on the constraint effect of natural vegetation on ecosystem services in the Shiyang River Basin

GAO Chao<sup>1,2</sup>, ZHAO Jun<sup>1,\*</sup>, WANG Yuchun<sup>1</sup>, JIN Guijun<sup>2</sup>, WANG Jianbang<sup>1</sup>, HU Xiufang<sup>3</sup>

1 College of Geography and Environmental Science of Northwest Normal University, Lanzhou 735300, China

2 Gansu Forestry Polytechnic, Tianshui 741020, China

3 College of Geography of Nan Tong University, Nantong 226007, China

**Abstract:** The ecological environment of the Shiyang River Basin is degraded, and the function of the ecological barrier is weakened. Therefore, it is of great significance to improve the ecosystem services and functions in this area. The growth of vegetation is an important factor that affects the supply of ecosystem services. It is necessary to quantitatively analyze the relationship between vegetation and ecosystem services. In this paper, the constraints of vegetation on water yield, soil conservation, and carbon sequestration in the Shiyang River Basin are analyzed by the constraint line method. At the same time, the spatial distribution of the three ecosystem service potentials in 2015 and the distribution pattern of the comprehensive potentials in the Shiyang River Basin were calculated. The results show that: (1) the constraint line between vegetation coverage and water production and soil conservation is a downward open parabola. That is, with an increase of vegetation coverage, the restraint effect gradually decreases and then gradually increases. The carbon service is positively convex. (2) Restrictive effects of vegetation coverage on water yield, soil conservation and carbon sequestration is temporally and spatially heterogeneous. (3) The characteristic of upgrading potentials of the three services is that the value

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41661084); 国家自然科学基金青年基金项目(41701634)

**收稿日期:** 2019-04-18; **网络出版日期:** 2020-03-16

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaojun@nwnu.edu.cn

of southwest is higher than of northeast with Coexistence of High Service Value and High Potential Value in the Shiyang River Basin. The Dongda, Xida, Xiyang, and Gulang Rivers are the main contributors to the improvement of ecological services and service potential.

**Key Words:** ecosystem services; natural vegetation; constraint effect; Shiyang River Basin

生态系统服务是指生态系统所形成和所维持的人类赖以生存的自然条件及效用<sup>[1]</sup>,是人类直接或间接从生态系统所得到的收益<sup>[2]</sup>。生态系统服务功能的可持续性是人类社会可持续发展的重要基础<sup>[2-3]</sup>,人类为满足不断增长的服务需求和对服务的选择性使用,常通过改造生态系统来增加供给服务,造成其他类型服务不断减少,调节服务尤为显著。生态系统服务功能退化不仅危及当代社会福祉,且将极大影响人类后代从生态系统中谋求利益,使人类社会可持续发展面临巨大挑战<sup>[4-5]</sup>。

植被生态系统的涵养水源、土壤保持及固碳释氧等功能对维持区域经济、生态平衡具有重要地理价值。植被是生态系统服务产生和传递的重要基础,气候变化和人为扰动的影响结果也直接体现在植被上,植被的生长状况势必对区域内生态系统服务供给产生重要影响<sup>[6]</sup>。精确认识植被变化对生态系统服务的影响,对于深化生态系统服务研究具有重要意义。

生态系统服务仍是学术界热点之一,梳理国内外研究成果发现:评估的主流模型仍为 InVEST 模型,研究尺度主要以流域尺度或特定的自然保护区、城市(县区)<sup>[7]</sup>;研究的生态功能以水源涵养、土壤保持、碳固定、水质净化及生物多样性为主;研究方向从最初的生态系统服务价值评估逐步深化<sup>[8-9]</sup>,向生态服务的时空格局及驱动因素<sup>[10-11]</sup>、权衡与协同<sup>[12-13]</sup>、生态恢复与补偿<sup>[14]</sup>、生态服务供需流<sup>[15]</sup>等多方向延伸。在生态系统服务间的关系中,由于供给服务和调节服务之间存在矛盾<sup>[16]</sup>,有学者以情境模拟法来实现生态服务的优化;由于生态系统的复杂性和生态服务形成机制的研究不足,已有的情境模拟研究均通过改变某一个参数、其余参数不变进行讨论,较难准确模拟该情境下的生态系统服务<sup>[17]</sup>。因此,鉴于植被在生态服务中的特殊地位,加强植被变化对生态系统服务的影响是十分必要的。

石羊河流域生态问题受广大学者关注,有关生态环境及生态系统服务研究已有成果发表<sup>[17-21]</sup>,在植被-生态服务、生态服务-生态服务间关系的研究中,多以相关分析进行探讨,缺乏非线性关系研究。约束线法在解决复杂生态学问题中具有巨大潜力,为研究生态系统中的非线性关系提供了可能。因此,本文引入约束线法来研究石羊河流域植被覆盖度对其产水量、土壤保持和固碳服务的约束关系,为生态系统服务变化的驱动因素定量化研究提供参考。

## 1 数据来源与评估方法

### 1.1 研究区概况

石羊河流域介于 101°41'—104°16'E、36°29'—39°27'N 之间,总面积  $4.16 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,平均海拔约 2000 m,属于典型的大陆温带干旱气候,其上中下游的气候特征具有明显垂直分异:上游祁连山高寒半干旱湿润区;中游走廊平原干旱区,干旱程度明显大于上游区域;下游温暖干旱区,主要为民勤绿洲和荒漠,属于重度缺水<sup>[22]</sup>。全流域共有 8 条子流域,按水文地质单元又可分为 3 个独立子水系<sup>[23]</sup>。

### 1.2 数据来源

植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)以 MODIS-NDVI 产品数据计算获得,归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)产品空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d,以最大值合成法得到年数据。固碳服务以 MODIS-NPP 产品数据获得,NPP 产品空间分辨率为 1000 m,时间分辨率为 1 a。以上 MODIS 数据均来自 <https://modis.gsfc.nasa.gov/>。产水服务与土壤服务采用 InVEST 模型计算,所使用的基础数据见表 1 所列,对获得的原始数据进行处理和计算得到模型的输入参数。

表 1 InVEST 模型参数来源说明

Table 1 InVEST data source

| 数据 Data                                         | 来源 Source                                         |
|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 降水量(8个气象站点克里金插值)Precipitation( Kriging)         | 中国气象数据网                                           |
| 潜在蒸散量 Potential evapotranspiration              | 西部数据中心 <sup>[24]</sup>                            |
| 土壤深度 Soil depth                                 | 西部数据中心                                            |
| DEM/(90 m×90 m)                                 | 西部数据中心                                            |
| 土壤饱和导水率 Soil saturated hydraulic conductivity   | 西部数据中心                                            |
| 集水区/子流域 Watersheds/Subwatershed                 | 西部数据中心                                            |
| 坡度坡长 Slope length                               | 西部数据中心                                            |
| 植物可利用含水率 Plant available water fraction         | 田间持水量和永久萎蔫系数之差 <sup>[25]</sup>                    |
| 蒸散系数 Kc Kc Evaporation coefficient              | 参考 FAO 的灌溉和园艺手册及 Allen 和 Wardel 等 <sup>[26]</sup> |
| 土地利用 Land use                                   | 中国科学院资源环境科学数据中心《全国土地利用/覆被数据集》                     |
| Zhang 系数 Zhang constant                         | 多次模拟取最优值 9.433 <sup>[22]</sup>                    |
| 降水侵蚀力因子 R Erosivity (R)                         | 参考王万忠和焦菊英 <sup>[27]</sup>                         |
| 植被覆盖因子 C Vegetation cover factor (C)            | 参考蔡崇法等 <sup>[28]</sup>                            |
| 水土保持因子 P Soil and water conservation factor (P) | 参考郑度和姚重 <sup>[29]</sup>                           |
| 土壤可蚀性因子 K Erodibility (K)                       | EPIC 公式计算后参考张科利法修正 <sup>[30-31]</sup>             |
| 汇水累计阈值 Threshold flow accumulation              | 多次模拟取 800                                         |
| 坡度阈值 Slope threshold                            | 多次模拟取 25                                          |

### 1.3 评估方法

本研究以上述数据,定量估算 2000、2005、2010、2015 年石羊河流域自然植被覆盖度、产水量、土壤保持及固碳服务,提取植被覆盖度与生态系统服务的约束线,在此基础上总结植被覆盖度对生态系统服务的约束效应,定量认识植被覆盖变化对生态系统服务的影响,探索在约束效应下石羊河流域生态系统服务优化的理论。

本研究使用多尺度数据,其中 NDVI 数据重采样为 1 km;InVEST 模型参数除 DEM 外均为 1 km 空间分辨率,经验参数以相近研究区、模型可借鉴性及文献的新近性为原则,以引文分析工具分析文献获得。Zhang 系数、汇水累计阈值及坡度阈值需多次模拟,使其与研究区实际情况相符。

#### 1.3.1 植被覆盖度估算

植被覆盖度采用像元二分模型,以 NDVI 数据计算植被覆盖度,公式为:

$$FVC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil})$$

式中,FVC 为植被覆盖度,NDVI<sub>soil</sub> 和 NDVI<sub>veg</sub> 分别为纯裸土和纯植被对应的 NDVI 值。结合前人研究和研究区实际情况,选取生长季内植被 NDVI 最小值 0.076 和最大值 0.8179 代替 NDVI<sub>soil</sub> 和 NDVI<sub>veg</sub><sup>[32]</sup>。

#### 1.3.2 生态系统服务评估

(1)产水量。以水量平衡公式计算,公式如下:

$$y_{(x)} = \left[ 1 - \frac{AET(x)}{P(x)} \right] \cdot P(x)$$

式中,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。

(2)土壤保持。土壤保持服务以土壤侵蚀和土壤保持量为指标,土壤保持量定义为裸地条件下的土壤侵蚀量 RKLS 与植被覆盖情况下的土壤侵蚀量 USLE 之差。公式如下:

$$RKLS = R \cdot K \cdot LS$$

$$USLE = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

$$SD = RKLS - USLE$$

式中,RKLS 为潜在土壤侵蚀,USLE 为实际土壤侵蚀,SD 为土壤保持量;R 为降水可蚀量因子,K 为土壤可蚀性因子,LS 为坡度坡长因子,C 为植被覆盖和管理因子,P 为土壤保持措施因子。

### (3) 固碳服务。



根据上式,植物干物质生产与  $\text{CO}_2$  消耗比例为 1:1.62,因此固碳量为:

$$V_c = \text{NPP} \cdot 1.62$$

#### 1.3.3 约束线法

约束线法是以分段分位数回归刻画的,约束线上的点代表研究两个生态变量时,受到其他变量的影响最小。由于植被的生长情况是限制其提供生态系统服务量的主要因素,因此将表征植被生长状况的植被覆盖度作为坐标横轴,提供的生态系统服务作为坐标纵轴,构成二维坐标系(图 1),其中限制变量为植被覆盖度( $X$ ),响应变量为生态系统服务( $Y$ )。约束线上的点表示变量  $Y$  受变量  $X$  影响时,受其他因素的影响最小,即变量  $Y$  的理论最大值。

约束线法以 Origin 2017 拟合,所有约束线均通过 95% 置信度检验;结合研究对象间的关系及前人研究<sup>[33]</sup>,将约束线归纳为以下几种类型(图 2)。

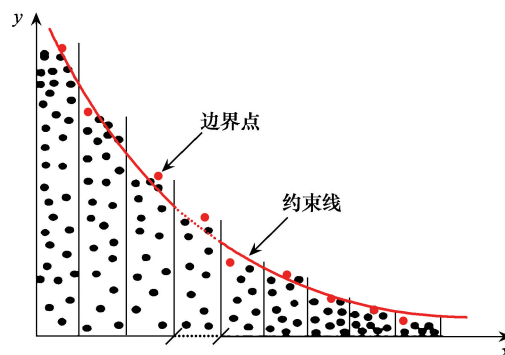


图 1 约束线示意图

Fig.1 Constraint line diagram

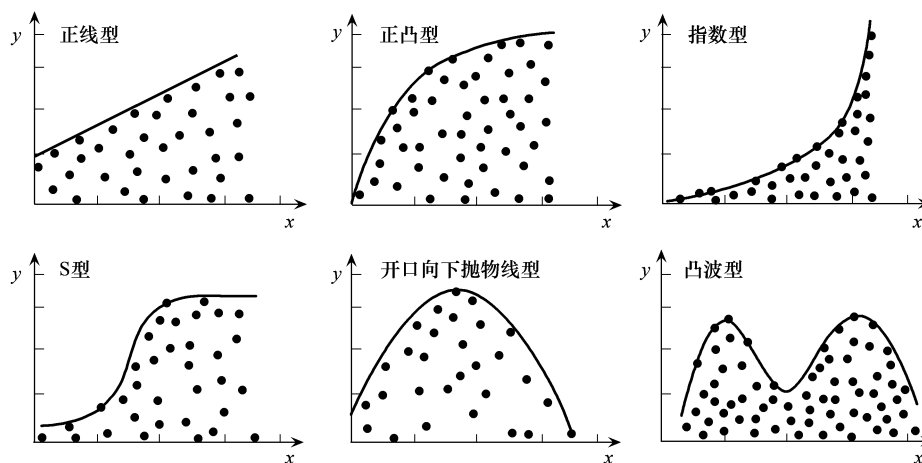


图 2 约束线类型

Fig.2 Constraint line type

正线型:变量  $X$  对变量  $Y$  的约束效应成比例下降;正凸型:变量  $X$  能够有效的约束变量  $Y$ ,且成比例增加约束效应;指数型:变量  $X$  对变量  $Y$  的约束效应在整个范围内持续下降;S型:随着变量  $X$  的增加,其对变量  $Y$  的约束效应在  $X$  的某个范围内急剧下降;开口向下抛物线型:随着变量  $X$  的增加,其对变量  $Y$  的约束效应先逐渐减少,后逐渐增大;凸波型:变量  $X$  对变量  $Y$  的约束效应表现出波动特征

#### 1.3.4 生态系统服务潜力估算

约束线上的点表示在其他因素的最小约束下,一个生态变量受到另一个生态变量约束,因此代表了效率前沿,类似于经济学中帕累托效率的含义<sup>[34-35]</sup>。在生态系统管理中,实际生态系统服务量与效率前沿的差值就是对应生态系统服务的提升潜力,也是生态系统服务优化的重点。本文以 2015 年石羊河流域生态系统服务为例,分别计算产水、土壤保持、固碳等三种服务潜力的空间分布,并对 3 种服务潜力进行加权分析,确定综合潜力分布态势。生态系统服务潜力表示为:

$$P_i = L_i - A_i$$

式中,  $P_i$  表示每个栅格单元的潜力值,  $L_i$  表示每个栅格单元的理想值,  $A_i$  表示每个栅格单元的实际值。

在干旱区, 水资源可用性是维持各项生态过程最重要的制约因素。在测算综合潜力时, 产水量的权重应高于土壤保持和固碳服务的权重。综合潜力表示为:

$$CP_i = 0.4 \times W_i + 0.3 \times S_i + 0.3 \times N_i$$

式中,  $CP_i$  为每个栅格单元的综合潜力值,  $W_i$  为每个栅格单元的产水量潜力值,  $S_i$  为每个栅格单元的土壤保持潜力值,  $N_i$  为每个栅格单元的固碳服务潜力值。

## 2 结果与分析

### 2.1 植被覆盖与生态系统服务的约束效应

根据 USGS 分类体系, 本文从整体植被和分林草植被两个层次提取约束线, 并在此基础上进行讨论, 整体植被是将所有自然植被作为整体提取约束线, 包括所有的林地和草地, 分林草植被是将林地和草地分开, 分别提取约束线。

#### 2.1.1 植被覆盖与产水量的约束效应

从整体来看, 植被覆盖度与产水量的约束线基本呈开口向下抛物线类型, 但不同植被类型的约束线略有差别(图 3)。在阈值左侧, 随着植被覆盖度不断增加, 植被覆盖度对产水量的约束效应逐渐减小, 其他因素对产水量的影响不断增加。当植被覆盖度不断增加时, 植被对降水的截留能力在不断增加, 降水量也在不断增加, 表明植被可利用水分在增加, 但总体处于缺水状况, 在植被可用水分不能充分满足植被生长的情况下, 更多的水分被植被吸收用于自身生长, 因此这一阶段水分成为限制植被提供产水服务的主要因素。在阈值右侧, 随着植被覆盖度不断增加, 植被覆盖度对产水量的约束效应逐渐增大, 其他因素对产水量的影响不断减小。石羊河流域高植被覆盖区位于流域上游, 为典型的山地区。高植被覆盖度下枝叶的凋落量大, 分解速率不高, 枯枝存量高, 造成枯枝落叶层对于水分的大量截留, 枯枝落叶层的截留水量达到饱和后部分水分将渗入土中, 增加了土壤含水量。同时, 高植被覆盖从一个侧面也反映出该区有更大的降水量, 充足的水分在满足了植被自身的生长需求后产生径流, 加之山区坡度较大处的土壤更易形成土壤侵蚀, 影响植被生长, 进而影响到植被提供产水服务的能力。

从时间尺度来看, 同类植被的约束线类型基本保持不变, 但表现出一定的时间分异特征。分析来看, 造成时间分异的本质原因是降水量、潜在蒸散量等其他影响因素的不同组合导致。其中, 土壤深度、植物可利用含水率、植物蒸散系数等在一定时间内基本保持稳定, 因此年降水量和潜在蒸散量的变化是造成约束线具有时间分异特征的主要原因。

从拟合优度  $R^2$  来看, 整体植被的约束线和草地的约束线拟合效果极佳, 在不同时间尺度下拟合优度较为接近。林地的约束线拟合效果总体较低。由于石羊河流域林地数量较少, 且主要分布在上游地区, 植被覆盖度较高, 低植被覆盖度地区林地数量较少, 这可能是影响拟合结果的主要原因。

从约束线的阈值来看, 草地阈值明显高于林地阈值, 表明在理想条件下, 同等植被覆盖度时草地能提供更多的产水服务。结合林地与草地提供产水量的实际能力与理论最大值(图 3)发现, 在现实情况下, 林地的产水能力强于草地; 在理想情况下, 草地的产水能力强于林地。

#### 2.1.2 植被覆盖与土壤保持的约束效应

植被覆盖度与土壤保持的约束线均呈开口向下抛物线类型, 与产水量的约束线相似(图 4)。在阈值左侧, 植被覆盖度总体处于中、低覆盖水平, 主要分布在流域中下游, 属于干旱区。由于降水较少, 蒸散量较大, 总体处于缺水环境, 加之植被覆盖度不高, 对于降水的保留能力不强, 大部分降水被直接蒸散散失。有研究表明, 在干旱区小于 13 mm 的降雨属于无效降雨, 全部降水都将被蒸发消耗掉<sup>[36]</sup>。土壤保持主要受降水可蚀性因子、土壤可蚀性因子、坡度坡长因子、土壤饱和和导水率因子、土壤保持因子及植被覆盖和管理因子影响。在降水较少的干旱区, 降水可蚀性因子和土壤饱和和导水率可以忽略; 中下游地势较为平坦, 因此坡度坡长因子也

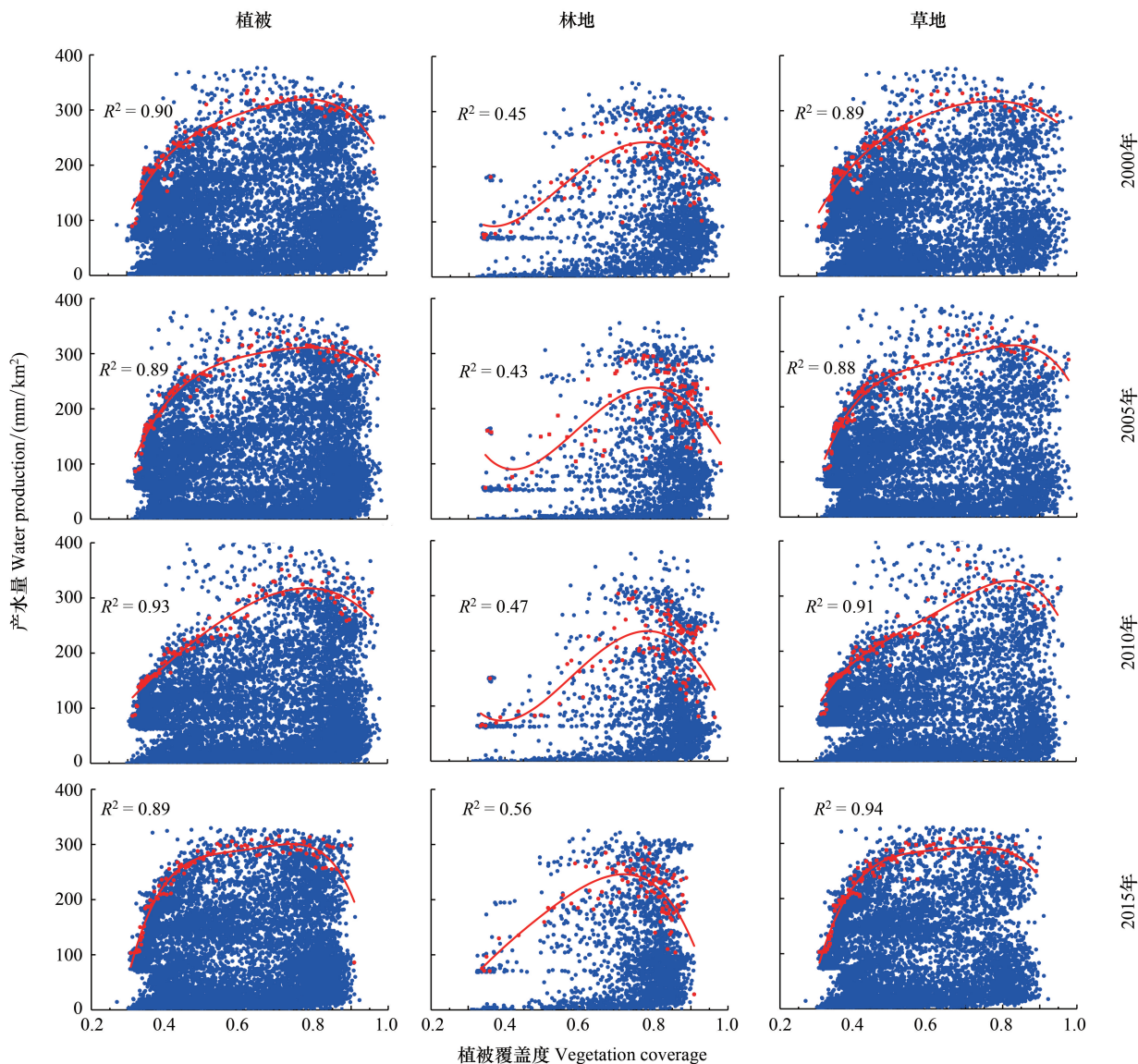


图3 植被覆盖度与产水量约束线

Fig.3 Vegetation coverage and water production constraint line

可以不予考虑;植被覆盖和管理因子和土壤保持因子对土壤保持具有促进作用,因此土壤可蚀性因子成为限制植被提供土壤保持的主要因素。土壤可蚀性因子大小取决于土壤的特性指标,包括砂粒含量、土壤有机质含量等,结合石羊河流域中下游自然地理特征,可以认为风蚀是该区土壤侵蚀的主要类型。另外,由于石羊河流域上游是产水量的高值区,上游来水中携带的矿物质随径流来到中下游,而中下游蒸发强烈,可能出现土壤盐碱化,限制植被生长,进而限制植被提供土壤保持服务的能力。在阈值右侧,植被覆盖度总体处于高覆盖水平,主要分布在流域上游,区域内降水量较大,降水强度较高,地形起伏较大,这些因素不但会对土壤造成水蚀,同时形成的径流会带走土壤中的部分矿物质和有机盐等,影响土壤质量。

在时间尺度、拟合优度及阈值上,土壤保持约束线的结果与产水量相似。

### 2.1.3 植被覆盖与固碳服务的约束效应

植被覆盖与固碳服务的约束线呈类直线的正凸型(图5),随着植被覆盖度的不断增加,植被提供的固碳服务量也不断增加。由于正凸型函数类型不存在阈值,所以植被覆盖度越高,提供的固碳服务量越高。

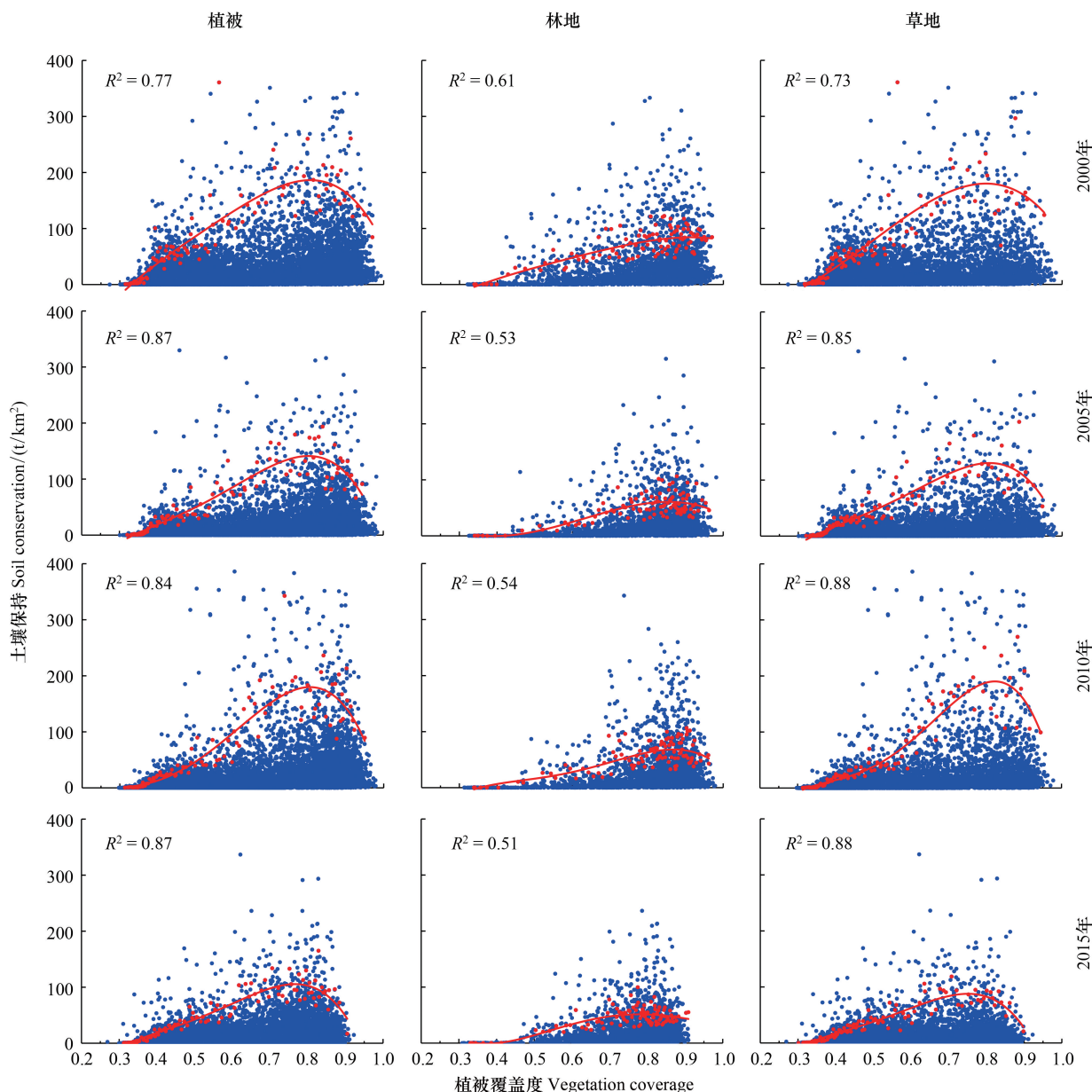


图4 植被覆盖度与土壤保持的约束线

Fig.4 Vegetation coverage and soil retention constraints

固碳服务的约束线同样存在时间分异特征。从整体植被的角度看,2000 年的固碳量最大值在 950 左右,为最大值,2005 年的固碳量最大值在 750 以下,其余两年的对应最大值在 800—850 之间。

在拟合优度上,整体植被与分林草植被的约束线的拟合效果均较为理想, $R^2$  值较为接近。

对比不同时期林地和草地约束线发现,同等植被覆盖度情况下,林地的固碳量理论最大值高于草地的固碳量最大值;结合林地与草地的实际固碳能力,发现在实际与理想情况下,同等植被覆盖度时林地的固碳能力均大于草地的固碳能力。

#### 2.1.4 模型评价

在约束线上,一个生态变量受到另一个生态变量的约束时,受到其他影响因素的影响最小。以植被覆盖对产水量的约束线为例,产水量受植被、气象、土壤及地形等多因素影响,约束线上的点表示当产水量受植被覆盖度影响时,受气象、土壤、地形等其他因素的最小影响。所以约束线的意义在于,在研究某两种生态变量

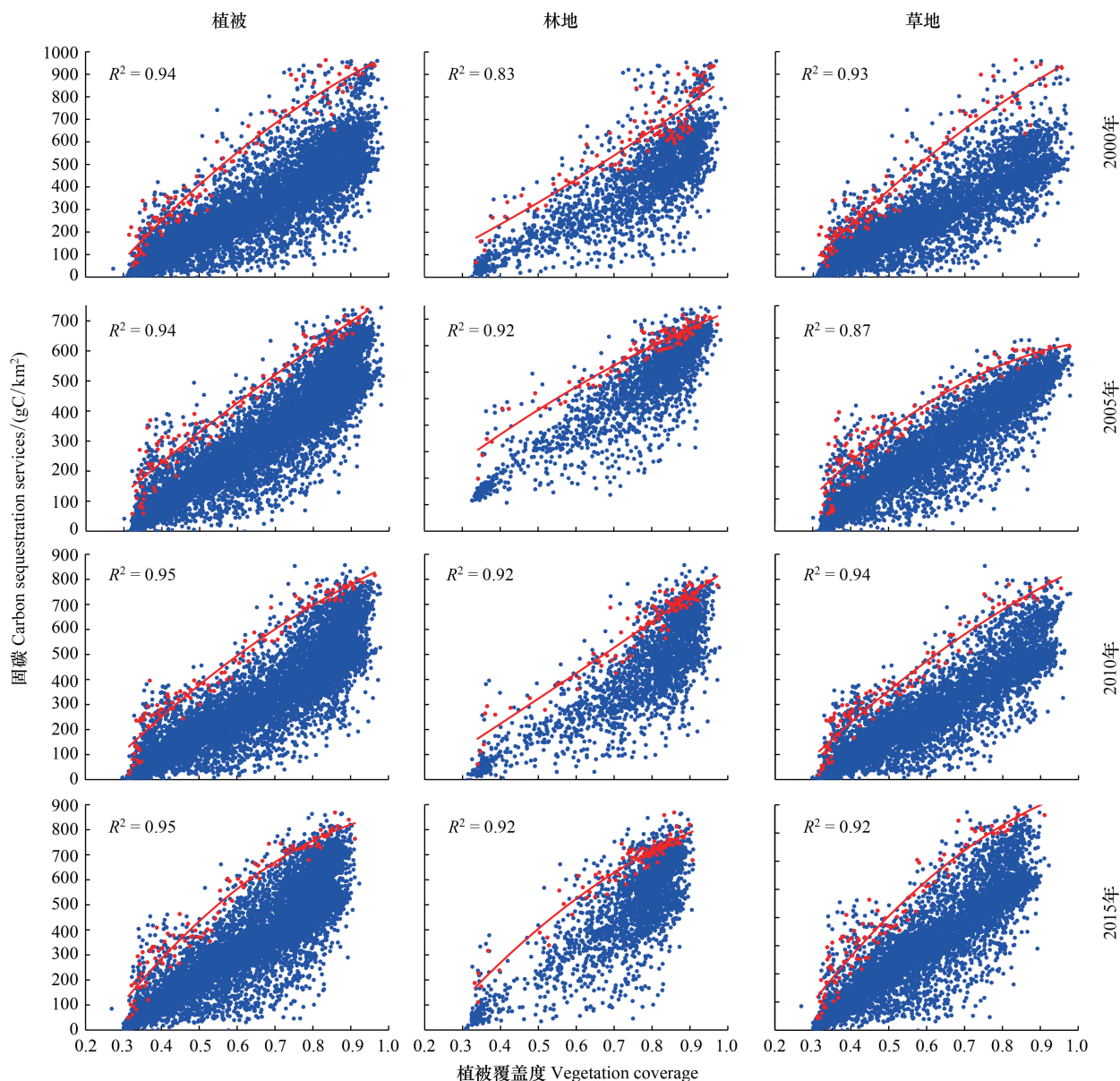


图5 植被覆盖与固碳服务的约束线

Fig.5 Constraint line for vegetation cover and carbon sequestration services

的关系时,能够最大限度地减少局部因素的影响。因此,为尽可能的减少局部因素的影响,研究对象应尽可能的广泛分布,以涵盖不同的气候、土壤及地形等类型。

应用约束线分析生态问题时,在研究区分布广泛的变量有较好的拟合效果,更适合约束线理论分析。由于石羊河流域林地面积较少且集中分布,主要集中在上游地区,应用约束线法减小局部因素的影响效果较差,因此拟合优度比草地的拟合优度差。

## 2.2 植被与生态系统服务的响应关系

通过不同植被类型下植被覆盖与生态系统服务的约束线,发现在现实、理想情况下草地和林地的服务供给能力差异,因此,有必要讨论不同植被类型下植被与生态系统服务的响应关系,以期能为植被恢复类型选择提供科学依据。从现实情况看,林地提供产水、土壤保持及固碳服务的能力强于草地,因此增加林地是提高服务供给的更佳选择。从理想情况来看,草地的产水能力和土壤保持能力均大于草地,与实际情况相反。这是由

于理想条件下降水量、潜在蒸散量及土壤可蚀性等限制服务供给的主要因素被最大限度削弱导致;结合石羊河流域具体情况及林地的分布情况,林地对生长环境的要求相对更高。另外,荒漠生态系统服务功能监测与评估技术研究项目组指出,植被冠层对降水量截留率在 2.7%—33.1% 间,最大可达 50 mm,这部分降水多以蒸发形式直接散失<sup>[37]</sup>;尹立河等<sup>[38]</sup>指出,植被覆盖度增加会减少地下水补给,导致河流流量降低;李小英等<sup>[39]</sup>指出,相同地区人工植被耗水量大于天然植被耗水量。因此,选择自然恢复或耗水量较小的当地植被可实现干旱区水与生态的和谐发展。

## 2.3 生态系统服务潜力估算

### 2.3.1 产水量服务潜力

根据 1.3.4 中提出的潜力估算模型计算得到石羊河流域产水量服务潜力分布图(图 6)。由图 6 可知,研究区产水量服务潜力总体呈现西南高东北低、具有流域分层的分布特征。流域上游是产水服务潜力值的高值区,植被茂密,水热条件较好,也是产水服务的高值区。流域中游西部山区的产水量服务潜力较高,流域中游中部和东部是产水量服务潜力的中低值区。流域下游是产水量服务潜力的低值区,提升空间不大,仅有零星区域有一定提升潜力。

综合石羊河流域 2015 年实际产水量和产水量潜力分析发现,上游产水量服务的高产值和高潜力并存。石羊河流域上游生态条件较好,是产水量服务的高值区;流域中游是人类活动的主要集中地,水资源使用和消耗量全流域最大,短缺也最为严重,中游地区人类活动对水资源的超量利用也是造成下游水资源短缺的重要原因。正是因为中下游严重的生态问题和水资源短缺,社会各界在管理和关注生态问题时更侧重于中下游地区。

面对石羊河流域的水资源问题,可持续发展和合理节约利用水资源是我们关注的重点,但不是解决水资源问题的唯一途径。通过对石羊河流域产水服务潜力高值区的科学管理,也是解决石羊河流域水资源问题的一种行之有效的策略。

### 2.3.2 土壤保持服务潜力

由图 7 可知,研究区土壤保持服务潜力总体呈现西南高东北低、流域分层明显的分布特征。石羊河流域上游地形起伏度较大,降水较多,容易造成土壤流失,但上游茂密的植被在一定程度上减少了地形和降水造成的土壤流失,是土壤保持的高值区,也是土壤保持服务潜力的高值区。流域中游主要为土壤保持服务潜力中低值分布区,有一定的提升潜力。流域下游是土壤保持服务潜力的低值区,提升空间不大。总体来说,流域西南部及西部山区地带土壤保持服务有较大提升空间,中游中部区域土壤保持服务也有一定提升空间。

综合石羊河流域 2015 年实际土壤保持量和土壤保持潜力分析发现,石羊河流域上游土壤保持服务的高产值和高潜力并存;流域中下游土壤保持服务的低产值和低潜力并存。石羊河流域上游生态条件较好,但降水量、降水强度、地形等因素同样限制土壤保持服务的供给,合理开发流域上游的土壤保持服务潜力,是改善区域生态问题的有效途径。石羊河流域中下游生态问题突出,提供土壤保持服务的能力较弱,提升潜力较小,改善中下游的生态问题是当下的难题。

### 2.3.3 固碳服务潜力

由图 8 可知,研究区固碳服务潜力总体呈现西南高东北低、流域分层分布特征。石羊河流域固碳服务高

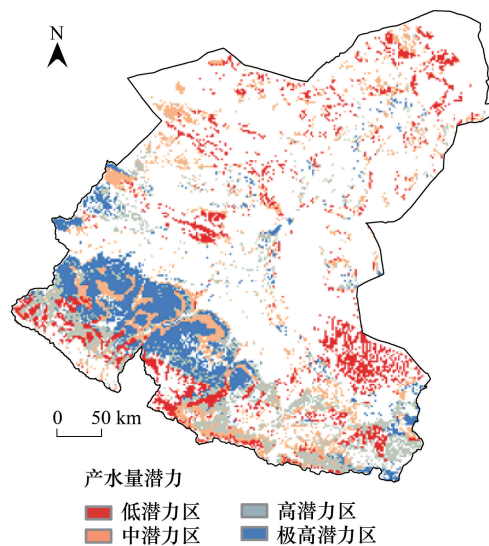


图 6 石羊河流域产水服务潜力分布图

Fig.6 Distribution map of water production service potential in Shiyang River Basin

值区和服务潜力高值区分布在上游;流域固碳服务的中值区和服务潜力的中值区主要分布在中游;流域固碳服务的低值区和服务潜力的低值区主要分布在下游。

石羊河流域的植被覆盖度及植被分布范围总体呈从上游向下游递减趋势,结合上述分析推测,增加植被覆盖度及植被分布范围可能提高固碳量。有研究指出,石羊河流域下游的生态输水能提高植被覆盖度,有利于改善区域生态环境<sup>[7]</sup>。因此,通过人工增加植被、生态输水等方式,改善区域生态环境,是增加固碳服务的有效方式。

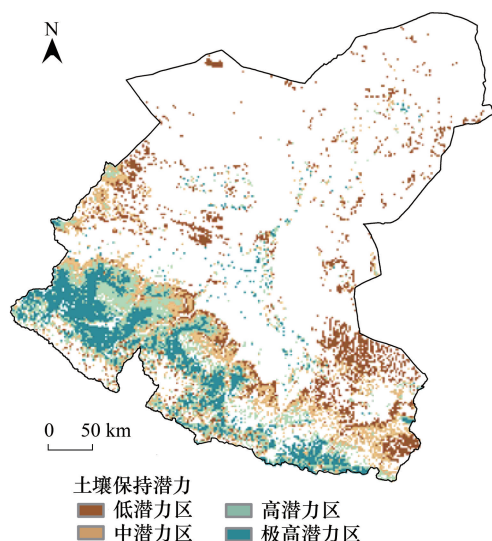


图7 石羊河流域土壤保持服务潜力分布图

Fig.7 Distribution map of soil conservation service potential in Shiyang River Basin

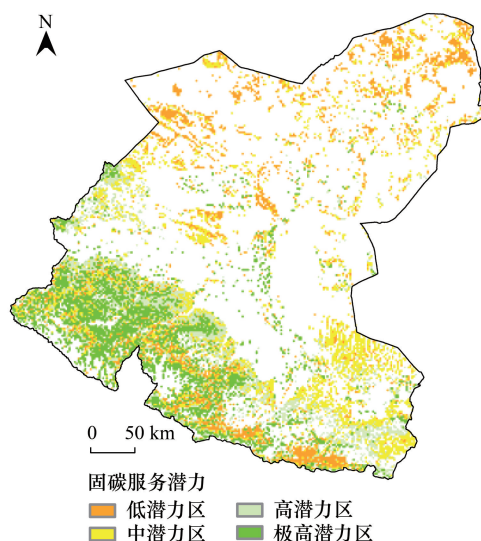


图8 石羊河流域固碳服务潜力分布图

Fig.8 Distribution map of carbon sequestration service potential in Shiyang River Basin

### 2.3.4 综合潜力

根据产水、土壤保持、固碳等3种服务的潜力值栅格图,利用1.3.4中的综合潜力估算模型计算得到石羊河流域生态系统服务综合潜力分布图(图9)。分析图9发现,生态系统服务综合潜力高值区主要分布在上游西南部,表明石羊河流域上游具有较高的生态系统服务能力提升空间;中下游也有不同程度的提升空间。

结合产水量服务、土壤保持服务及固碳服务空间分布图发现,3种服务潜力的主要提升空间均集中在流域上游,与综合潜力空间分布相似。因此,有必要从子流域尺度进行分析。

由表2可知,在上游的8条子流域中,总潜力前4位的子流域按总潜力值大小依次为:东大河>西大河>西营河>古浪河。结合产水量、土壤保持及固碳服务的子流域占比情况发现,产水量较高的子流域为:古浪河>东大河>西营河>杂木河>西大河;土壤保持较高的子流域为:西营河>东大河>杂木河>黄羊河>古浪河>西大河;固碳量较高的子流域为:东大河>西大河>西营河>古浪河。分析发现,东大河、西大河、西营河及古浪河提

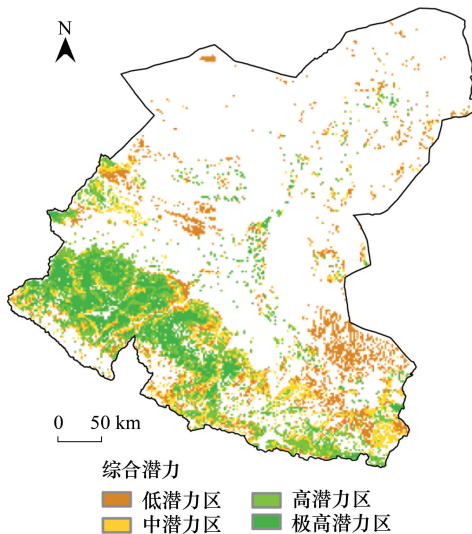


图9 石羊河流域综合潜力分布图

Fig.9 Shiyang River Basin comprehensive potential distribution map

供的 3 种服务较多,且总潜力较大,说明这 4 条子流域不仅是流域内各项生态系统服务的主要供给者,也是流域内生态系统服务潜力提升的主要贡献者。

表 2 2015 年各子流域自然植被综合潜力占流域总值的比例/%

Table 2 Proportion of natural vegetation Comprehensive potential in the sub-basins in 2015 as a percentage of total watershed

| 子流域<br>Subwatershed         | 2015 年 | 子流域<br>Subwatershed        | 2015 年 |
|-----------------------------|--------|----------------------------|--------|
| 西营河流域 Xiying River Basin    | 14.98  | 西大河流域 Xida River Basin     | 15.73  |
| 东大河流域 Doying River Basin    | 17.24  | 杂木河流域 Zamu River Basin     | 6.90   |
| 金塔河流域 Jinta River Basin     | 7.96   | 大靖河流域 Dajing River Basin   | 9.36   |
| 古浪河流域 Gulang River Basin    | 10.01  | 中下游流域 Zhongxia River Basin | 12.74  |
| 黄羊河流域 Huangyang River Basin | 5.08   |                            |        |

分析来看,植被的分布状况是造成子流域综合潜力差异的原因之一。另外,综合潜力由产水量潜力、土壤保持潜力及固碳潜力计算得出,因此,有必要从三项服务潜力分别分析。从产水量潜力来看,水热条件组合是影响产水量潜力的主要原因,对应到输入参数为年降水量及潜在蒸散量。在较大尺度,通过人为影响的方式改善年降水量及潜在蒸散量,从而达到生态恢复是不现实的。从土壤保持潜力来看,土壤可蚀性是影响土壤保持潜力的主要原因,但不论是降水可蚀性,还是土壤可蚀性,这些因素都较难通过人工来大范围改变。从固碳潜力来看,提高植被覆盖度有利用增加固碳服务,生态输水能提高植被覆盖度,因此,通过生态输水,植树植草等方式,可增加区域的固碳服务。结合植被与生态系统服务的响应关系分析发现,根据各子流域的实际情况,在自然恢复的基础上,增加耗水量较少的当地植被能在一定程度上改善生态环境,提高服务供给。

### 3 结论

本文基于分段分位数回归法提取了植被覆盖与生态系统服务之间的约束线,探讨了植被覆盖对生态系统服务的约束效应,并以 2015 年数据为例,分析了石羊河流域生态系统服务潜力,得出以下结论:

(1) 植被覆盖度与产水量、土壤保持服务的约束线均呈开口向下抛物线类型,随着植被覆盖度的增加,两种服务均呈先增加后减小的变化趋势,表明植被覆盖度对两种服务的约束效应均呈先减小后增加的变化特征;植被覆盖度与固碳服务间的约束线呈类直线的正凸型,表明随着植被覆盖度增加,其对固碳服务的约束效应逐渐减小。

(2) 植被覆盖对产水量、土壤保持及固碳服务的约束效应均存在时空异质性。在理想情况下,草地的产水能力与土壤保持能力均强于林地,与实际情况相反;草地的固碳能力弱于林地,与实际情况相同,但差距不大。

(3) 约束线法代表效率前沿,可用于分析生态系统服务能力的可提升潜力。石羊河流域产水、土壤保持、固碳 3 种服务的提升潜力均呈西南高东北低、高服务值和高潜力并存的分布特征,东大河、西大河、西营河及古浪河流域不仅是流域内各项生态系统服务的主要供给者,也是流域内生态系统服务潜力提升的主要贡献者。

(4) 约束线法在生态系统服务领域有较好的应用前景,其存在时空异质性的根本原因在于其他因素的时空异质性。受理论和方法限制,具有在研究区广泛分布特征的要素可达到较好的拟合效果,更适合约束线法的推广应用。

(5) 石羊河流域的生态系统服务优化通过生态恢复进行,应结合子流域的实际情况,在自然恢复的基础上,通过增加耗水量较少的当地植被改善生态环境,提高服务供给,实现干旱区生态与服务的和谐发展。

### 参考文献 (References):

[ 1 ] Daily G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. Pacific Conservation Biology, 1997, 6(2): 220-221.

- [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. *Ecological Economics*, 1997, 25(1): 3-15.
- [3] Kreuter U P, Harris H G, Matlock M D, Lacey R E. Change in ecosystem service values in the San Antonio area, Texas. *Ecological Economics*, 2001, 39(3): 333-346.
- [4] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends*. Washington: Island Press, 2005.
- [5] Carpenter S R, Mooney H A, Agard J, Capistrano D, Defries R S, Díaz S, Dietz T, Duraipappah A K, Oteng-Yeboah A, Pereira H M, Perrings C, Reid W V, Sarukhan J, Scholes R J, Whyte A. Science for managing ecosystem services: beyond the millennium ecosystem assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(5): 1305-1312.
- [6] 张琨, 吕一河, 傅伯杰. 黄土高原典型区植被恢复及其对生态系统服务的影响. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(1): 23-31.
- [7] 王梅娟, 李阳. 基于 Invest 模型对生态系统服务功能评估的研究综述. *旅游纵览(下半月)*, 2018, (10): 185-185, 187-187.
- [8] 王晓峰. 榆林市土地生态系统服务功能价值测评. *地球科学与环境学报*, 2009, 31(3): 302-305.
- [9] 赵琪琪, 李晶, 刘婧雅, 秦克玉, 田涛. 基于 SolVES 模型的关中-天水经济区生态系统文化服务评估. *生态学报*, 2018, 38(10): 3673-3681.
- [10] Núñez-Regueiro M M, Fletcher R J, Pienaar E F, Branch L C, Volante J N, Rifai S. Adding the temporal dimension to spatial patterns of payment for ecosystem services enrollment. *Ecosystem Services*, 2019, 36, doi: 10.1016/j.ecoser.2019.100906.
- [11] 王壮壮, 张立伟, 李旭谱, 王鹏涛, 李英杰, 吕一河, 延军平. 流域生态系统服务热点与冷点时空格局特征. *生态学报*, 2019, 39(3): 823-834.
- [12] Wang L J, Zheng H, Wen Z, Liu L, Robinson B E, Li R N, Li C, Kong L Q. Ecosystem service synergies/trade-offs informing the supply-demand match of ecosystem services: framework and application. *Ecosystem Services*, 2019, 37, doi: 10.1016/j.ecoser.2019.100939.
- [13] 陈登帅, 李晶, 杨晓楠, 刘岩. 渭河流域生态系统服务权衡优化研究. *生态学报*, 2018, 38(9): 3260-3271.
- [14] 蒙古军, 王雅, 江颂. 基于生态系统服务的黑河中游退耕还林生态补偿研究. *生态学报*, 2019, 39(15): 1-10.
- [15] 肖玉, 谢高地, 鲁春霞, 徐洁. 基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展. *生态学报*, 2016, 36(10): 3096-3102.
- [16] 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.
- [17] 王玉纯, 赵军, 付杰文, 魏伟. 石羊河流域水源涵养功能定量评估及空间差异. *生态学报*, 2018, 38(13): 4637-4648.
- [18] 李传华, 赵军, 师银芳, 魏伟. 基于 NPP 的石羊河流域环境治理工程成效评价. *干旱区研究*, 2018, 35(5): 1208-1216.
- [19] 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研究. *生态学报*, 2018, 38(21): 7582-7595.
- [20] 负银娟, 赵军. 基于 MODIS-NDVI 数据的植被碳汇空间格局研究——以石羊河流域为例. *山地学报*, 2018, 36(4): 644-653.
- [21] 赵军, 杨建霞, 朱国锋. 生态输水对青土湖周边区域植被覆盖度的影响. *干旱区研究*, 2018, 35(6): 1251-1261.
- [22] 高超, 赵军, 李传华, 魏伟, 王建邦, 康重阳. 石羊河流域草地覆盖与其生态服务功能变化. *草业科学*, 2019, 36(1): 27-36.
- [23] 张恒玮. 基于 InVEST 模型的石羊河流域生态系统服务评估[D]. 兰州: 西北师范大学, 2016.
- [24] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1948, 193(1032): 120-145.
- [25] Gupta S C, Larson W E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. *Water Resources Research*, 1979, 15(6): 1633-1645.
- [26] Allen-Wardell G, Bernhardt P, Bitner R, Burquez A, Buchmann S, Cane J, Cox P A, Dalton V, Feinsinger P, Ingram M, Inouye D, Jones C E, Kennedy K, Kevan P, Koopowitz H, Medellín R, Medellín-Morales S, Nabhan G P, Pavlik B, Tepedino V, Torchio P, Walker S. The potential consequences of pollinator declines on the conservation of biodiversity and stability of food crop yields. *Conservation Biology*, 1998, 12(1): 8-17.
- [27] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究. *水土保持通报*, 1996, 16(5): 1-20.
- [28] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 黄丽, 张光远. 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. *水土保持学报*, 2000, 14(2): 19-24.
- [29] 郑度, 姚檀. 青藏高原隆升与环境效应. 北京: 科学出版社, 2004.
- [30] 贾坤, 姚云军, 魏香琴, 江波, 赵祥. 植被覆盖度遥感估算研究进展. *地球科学进展*, 2013, 28(7): 774-782.
- [31] 赵健赟. 地表植被覆盖度遥感估算及其气候效应研究进展. *测绘与空间地理信息*, 2015, 38(8): 77-80, 84-84.
- [32] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 刚成诚, 周伟, 居为民. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. *地理学报*, 2012, 67(9): 1255-1268.
- [33] Hao R F, Yu D Y, Wu J G. Relationship between paired ecosystem services in the grassland and agro-pastoral transitional zone of China using the constraint line method. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 240: 171-181.
- [34] Thomson J D, Weiblen G, Thomson B A, Alfaro A, Legendre P. Untangling multiple factors in spatial distributions: lilies, gophers, and rocks. *Ecology*, 1996, 77(6): 1698-1715.
- [35] Lester S E, Costello C, Halpern B S, Gaines S D, White C, Barth J A. Evaluating tradeoffs among ecosystem services to inform marine spatial planning. *Marine Policy*, 2013, 38: 80-89.
- [36] 刘新平, 张铜会, 赵哈林, 岳广阳. 流动沙丘降雨入渗和再分配过程. *水利学报*, 2006, 37(2): 166-171.
- [37] 荒漠生态系统服务功能监测与评估技术研究项目组. 荒漠生态系统功能评估与服务价值研究. 北京: 科学出版社, 2014.
- [38] 尹立河, 王晓勇, 黄金廷, 马洪云, 张俊, 董佳秋, 贺帅军. 干旱区植被盖度增加对降水入渗补给地下水的影响——试验研究与数值模拟. *地质通报*, 2015, 34(11): 2066-2073.
- [39] 李小英, 段争虎, 陈小红, 谭明亮. 黄土高原西部人工灌木林土壤水分分布规律. *干旱区研究*, 2014, 31(1): 38-43.