

2005—2015 年小江流域生态系统服务 供需变化及对石漠化的响应

章维鑫^{1,2,3}, 吴秀芹^{1,2,3}, 于洋⁴, 曹建华⁵

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.北京林业大学云南建水荒漠生态系统国家定位研究站,
云南 建水 654399;3.北京林业大学水土保持国家林业局重点实验室,北京 100083;
4.中国水利水电科学研究院泥沙研究所,北京,100048;5.中国地质科学院岩溶地质研究所,广西 桂林 541004)

摘要:喀斯特地区石漠化及其生态修复引起的土地利用变化,改变了地表植被覆盖等下垫面条件,进而对生态系统服务产生影响。为了探究石漠化治理工程以来生态系统服务变化情况,采用 InVEST、CASA 模型等多种模型和方法,研究了小江流域 2005—2015 年水服务、粮食服务和固碳服务的供需时空变化及对石漠化的响应。结果表明:(1)3 种服务的供给水平整体都呈现递增趋势,增幅分别为 14.34%,44.00%,40.11%,而需求方面,水服务和固碳服务呈现增加趋势,增幅为 3.26%和 61.54%,粮食服务呈现减小趋势,减幅为 6.98%。(2)水服务和粮食服务的供需比均呈现增加趋势,且供给大于需求,而固碳服务的供需比呈现减小趋势,2015 年供给小于需求。(3)石漠化面积越大的区域,粮食服务越低,随着石漠化程度的加重,水服务和固碳服务都呈现递减趋势,而随着石漠化面积减小,水服务和固碳服务变化不明显,粮食服务呈现一定程度的增加趋势,其中变化的面积越大,趋势越明显。流域内生态系统服务的供需状况及对石漠化的响应可在一定程度上反映石漠化治理对人类福祉的影响,能够为区域内生态系统的管理以及石漠化综合治理提供重要的参考。

关键词:生态系统服务供给;生态系统服务需求;生态系统服务供需比;石漠化;小江流域

中图分类号:K903;Q148

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2019)05-0139-12

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2019.05.021

The Changes of Ecosystem Services Supply-demand and Responses to Rocky Desertification in Xiaojiang Basin During 2005—2015

ZHANG Weixin^{1,2,3}, WU Xiuqin^{1,2,3}, YU Yang⁴, CAO Jianhua⁵

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2.Jianshui Station for Desert Ecological System Observation and Research, Beijing Forestry University,

Jianshui, Yunnan 654399; 3.Key Laboratory of Soil and Water Conservation of State Forestry Administration,
Beijing Forestry University, Beijing 100083; 4.Department of Sediment Research, China Institute of Water Resources
and Hydropower Research, Beijing 100048; 5.Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004)

Abstract: The land use changes caused by the Karst Rocky Desertification Comprehensive Control and Restoration Project change the underlying surface conditions, such as vegetation cover, and then affect the ecosystem services. In order to identify the changes of ecosystem services, the spatio-temporal changes of supply and demand of water, food and carbon services were explored based on InVEST model, CASA model and multiple methods in Xiaojiang Basin during 2005—2015. The results showed that: (1) The supply of water, food and carbon services showed a significantly increasing trend during 2005—2015, with a growth rate of 14.34%, 44.00% and 40.11%, respectively. The demand of water and carbon also showed a significantly increasing trend, with a growth rate of 3.26% and 61.54%, respectively while food showed a decreasing trend, with decrease rate of 6.98%. (2) The supply-demand ratio of water and food services were increasing and greater than 0, while carbon was decreasing in 2015. (3) The larger area of rocky desertification was, the lower the food service was. With the aggravation of rocky desertification, the water and carbon services decreased. With the decreasing area of rocky desertification, the changes of water and carbon services were not significant, and the food services increased. The larger the changing area was, the more significant the

收稿日期:2019-03-19

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502500,2016YFC0502506);国家自然科学基金项目(41671080)

第一作者:章维鑫(1993—),男,安徽池州人,硕士,主要从事 3S 技术在资源环境中的应用研究。E-mail:zwishin@bjfu.edu.cn

通信作者:吴秀芹(1974—),女,辽宁阜新,博士,教授,主要从事 GIS 应用以及土地利用变化研究。E-mail:wuxq@bjfu.edu.cn

trend was. By analyzing the supply and demand of ecosystem services and the relationships with rocky desertification in Xiaojiang Basin, it could provide important advice for the management of regional ecosystems and the comprehensive management of rocky desertification.

Keywords: ecosystem services supply; ecosystem services demand; supply-demand ratio; rocky desertification; Xiaojiang Basin

生态系统服务是指人类从自然界中直接获取的物质的和非物质的收益,例如,从自然界获取的食物、提供更加舒适的生存环境、为人类提供科学知识、艺术的灵感和娱乐休憩功能等^[1-2]。近年来,越来越多的学者开始研究生态系统服务和人类福祉的关系,着重关注人类的需求。因为离开人类受益者,生态系统的结构和过程就无法形成生态系统服务^[3]。因此,研究的方向多集中在分析生态系统服务的供给、需求以及供需平衡状况,常用某个区域内人类对生态系统服务的需求是否得到满足来衡量服务对人类福祉的影响^[3]。生态系统服务供给和需求的空间特征及空间匹配状况能够为环境资源的空间配置及经济发展提供重要参考,对实现生态安全和社会经济可持续发展具有重要推动作用^[4]。

生态系统服务的供需研究的关键和难点在于刻画供需的空间异质性^[3]。目前,生态系统服务供需空间化的模型和方法大致可分为:土地利用估算、数据空间叠置、生态过程模拟、专家经验判别以及 InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)模型、ARIES (ARtificial Intelligence for Ecosystem Services)模型等^[5]。这些模型和方法取得了大量的成果^[6],如 Burkhard 等^[7]构建了一个生态系统服务供给和需求与景观单元的联系矩阵,分析了生态系统服务供给和需求及其平衡状况的空间格局;杨莉等^[8]基于县级统计数据 and 土地利用数据,分析了黄河流域生态系统粮食、油料和肉类 3 类食物生产服务的供给与消费及平衡状况;Palomo 等^[9]在西班牙国家公园及附近保护区,通过实地考察及问卷调查的方式探究了娱乐活动、食物供给和气候调节等的供给和需求关系;Boithias 等^[10]采用 InVEST 模型估算西班牙北部埃布罗河盆地的水资源供给和需求关系。上述的研究多采用单一的方法,通过综合多种模型和方法,评估区域的生态系统服务供需及关系,能够更加完整地评估区域的生态系统状况。

云南省小江流域属于典型的岩溶断陷盆地区,是我国石漠化最为典型、发育程度最为严重的地区之一^[11-12]。已有研究^[13]表明,断陷盆地石漠化面积占喀斯特地区石漠化面积的 32%。石漠化的发展加速了区域内生态环境的恶化,吞噬了人类的生存空间,导致了自然灾害频发,加剧了地区的贫困。因此,国家自 2000 年

左右,实施了一系列的生态保护和恢复工程,如退耕还林工程、天然林保护工程、石漠化综合治理生态工程等,有效缓解了西南地区石漠化程度,改善了区域的生态环境^[14-16]。虽然石漠化治理取得了一定的成效,但是总体形势还是很严峻,需要继续关注石漠化综合治理情况。

通过对小江流域进行实地调查走访,发现水、粮食以及固碳服务受到了不同利益相关方的重视,且这 3 项服务对于区域内人类福祉的提升具有重要的作用。基于以上背景,本文选取了 2005 年、2010 年和 2015 年 3 期数据,运用包括 InVEST 模型、CASA 模型在内的多种模型和方法并以小江流域内的行政村为基本评价单元,探讨了该时间段内水、粮食和固碳服务供给和需求的时空变化,以及对石漠化的响应关系,以期对小江流域生态系统服务的管理和石漠化的综合治理提供重要参考。

1 研究区概况

小江流域位于云南省中部偏东(103°30'00"—104°05'00"E,24°10'00"—24°45'00"N),横跨泸西、师宗和弥勒 3 县,面积为 1 009.28 km²(图 1)。流域内主体位于泸西县辖区。流域内共有人口 20.04 万,而农业人口占该流域人口的 86.98%。流域内多年平均气温为 15.2℃,多年平均降水量为 966.8 mm。土地利用方式主要是林地和耕地,分别占据 40.3%和 44.4%。总体地势东高西低,北高南低,中部为地势平坦的平坝区,南部为流域河谷区,为流域最低海拔地区。随着经济的发展,加上人口的压力,加剧了水土流失、土壤退化、石漠化和生态系统功能衰退等问题,严重影响了流域内生态系统服务水平。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据的来源与处理

2.1.1 土地利用和石漠化数据 土地利用数据是由泸西、弥勒和师宗 2 期(2005 年和 2009 年)国土调查的矢量数据转换而来,2015 年,在 2 期数据基础之上,利用 2015 年的遥感影像修正所得。本研究将土地利用数据分为水田、旱地、有林地、灌木林地、其他林地、草地、水域、建筑用地和裸地(未利用地)这 9 类。

石漠化分布数据来源于国家林业和草原局 2005 年、2010 年和 2015 年 3 次石漠化监测数据。

2.1.2 土壤数据 土壤深度来源于世界土壤数据库(<https://soilgrids.org/>),反映了研究区域内单个栅

格的平均土壤深度,原始数据分辨率为 250 m,通过裁剪、投影转换、重采样等处理后生成研究区域 30 m 分辨率的土壤深度栅格数据。

植物可利用水含量即土壤有效含水量,为田间持

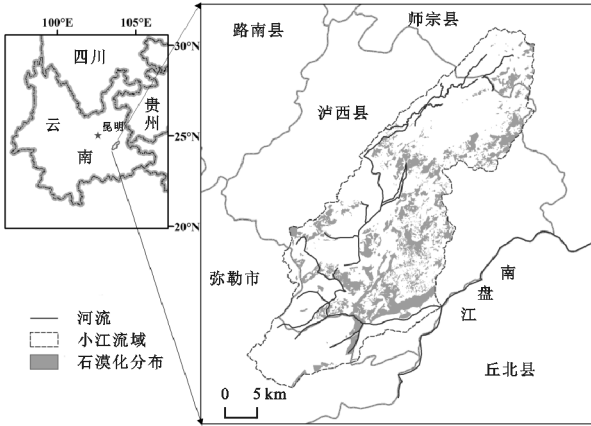


图 1 研究区概况及 2005—2010 年降水情况

2.1.3 气象数据 气象数据主要包括降水数据和气温数据,均来源于中国气象数据网(<http://data.cma.gov.cn>)和国家地球系统科学数据共享平台(<http://www.geodata.cn/>)。潜在蒸发量采用 FAO Penman—Monteith 公式计算。本研究选取研究区域及周边共 6 个气象站点,运用插值生成降水、气温和潜在蒸发量数据。

2.1.4 遥感和地形数据 Landsat 数据在研究区植被生长季云量多(云量多大于 80%),无法求生长季的月最大值,因此本文采用了 16 d 合成的 MODIS—NDVI 产品(<https://earthexplorer.usgs.gov/>),分辨率为 250 m,为了减小异常值的影响,采用最大值合成的方法(MVC)获得 2005 年、2010 年和 2015 年的月最大值数据。地形数据来源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn>)提供的 30 m 分辨率的 GDEM V2 数字高程数据,经镶嵌、裁剪和填注处理后生成研究区域 30 m 分辨率的 DEM 数据。

2.2 研究方法

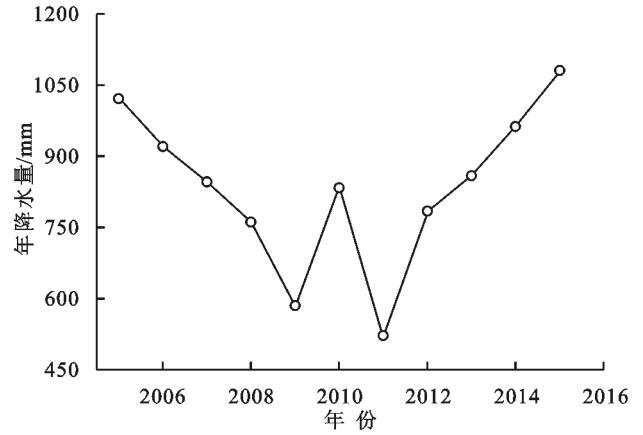
2.2.1 水服务供给 本文利用 InVEST 模型的产水模块评估小江流域的水供给服务的水平。该模型的产水量评估模块是基于水量平衡法:降雨量减去实际蒸发量,计算得出每个栅格的产水量。计算公式为:

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

式中: $Y(x)$ 为栅格 x 的产水量(mm); $AET(x)$ 为栅格单元 x 的年实际蒸散量(mm); $P(x)$ 为栅格单元 x 的年降水量(mm)。

2.2.2 水服务需求 水需求可划分为 4 大类:工业需水、人口需水、农业需水以及生态需求,其中工业需水通过万元工业产值平均用水量的方式来测算,人口

水量与永久萎蔫系数之间的差值,表示研究区域单个栅格的土壤中可被植物有效利用水分的比例,取值范围在 0~1。该数据参考周文佐^[17]非线性拟合土壤 AWC 估算模型进行计算。



需水采用云南省用水定额标准来测算,农业和生态用水根据联合国粮农组织(FAO)提出的基于参考植被的计算方法^[12]。其计算公式为:

$$WS_{total} = W_{industry} + W_{population} + W_{agriculture} + W_{ecology} \quad (2)$$

$$W_{industry} = G_{industry} \times A_{industry} \quad (3)$$

$$W_{population} = \sum_{i=1}^n P_i \times w_v + \sum_{j=1}^n P_j \times w_t \quad (4)$$

$$W_{agriculture} + W_{ecology} = ET_p = PET \times K_p \times K_s \times 1000 \quad (5)$$

式中: WS_{total} 为小江流域总的水服务需求量(m^3); $W_{industry}$ 为工业需水量(m^3); $W_{population}$ 为总的人口需水量(m^3); $W_{agriculture}$ 表示总的农业需水量(m^3); $W_{ecology}$ 为总的生态需水量(m^3)。 $G_{industry}$ 为工业总产值(万元), $A_{industry}$ 为万元工业产值平均用水量(万元/ m^3); P_i 为第 i 个村庄的人口数(人); w_v 为农村每人每年所需的用水量(m^3/a); P_j 为第 j 个城镇的人口数; w_t 表示城镇每人每年所需的用水量(m^3/a); ET_p 为植被生态需水定额(mm); PET 为参考作物蒸发蒸腾量(mm); K_p 为植被系数; K_s 土壤水分限制系数。植被系数和土壤水分限制系数均参考周晓东^[12]的计算方法。

2.2.3 粮食服务供给 粮食供给可以通过统计年鉴的数据计算,统计年鉴中提供了各行政村的各个年份的粮食产量,本文将粮食产量看成是区域的粮食的供给量。总的粮食服务的供给计算公式为:

$$FS_{total} = \sum_{i=1}^n V_i \quad (6)$$

式中: FS_{total} 为总的粮食供给服务量(t/a); V_i 表示第 i 个行政村的粮食产量(t/a)。计算数据来源于泸西、弥勒和师宗的统计年鉴^[18-26]。

2.2.4 粮食服务需求 本文采用肖玉等^[27]的方法,将粮食服务需求划分为 5 类,分别为人口粮食需求、饲料用粮需求、工业用粮需求、种子用粮需求以及粮

食的耗损,计算公式为:

$$FD_{\text{total}} = G_{\text{pop}} + G_{\text{pon}} + G_{\text{ind}} + G_{\text{seed}} + G_{\text{waste}} \quad (7)$$

式中: FD_{total} 为小江流域总的粮食的需求(t/a); G_{pop} 为人口用粮的需求(t/a); G_{pon} 为饲料用粮的需求(t/a); G_{ind} 为工业用粮的需求(t/a); G_{seed} 为种子用粮的需求(t/a); G_{waste} 为粮食的耗损(t/a)。计算方法均参考肖玉等^[27]的方法。

2.2.5 固碳服务供给 净生态系统生产力(net ecosystem productivity, NEP)可以用来衡量区域固碳服务的供给量,计算公式^[28]为:

$$NEP = NPP - R_h \quad (8)$$

式中:NEP为区域总的固碳量($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$);NPP为净初级生产力固碳量($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$); R_h 为异养动物呼吸固碳量($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$)。

本研究通过 CASA 模型计算 NPP, 计算公式^[29-30]为:

$$NPP(x, t) = APRA(x, T) \times \epsilon(x, t) \quad (9)$$

式中:NPP(x, t)为 x 像元上的植被 t 月净初级生产力($\text{C kg}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$);APRA(x, t)为 x 像元上的植被 t 月吸收的光和有效辐射(MJ/m^2); $\epsilon(x, t)$ 为 x 像元上的植被 t 月的实际光能利用率(kg/MJ)。公式中使用的参数是朱文泉等^[29-30]将 CASA 改进后,对 NPP 模型进行校正后的参数,适用于中国陆地情况。

R_h 的计算经验方程^[28,31]为:

$$R_h = 0.592 \times R_s^{0.714} \quad (10)$$

式中: R_s 为年土壤呼吸速率($\text{C kg}/\text{m}^2 \cdot \text{a}$), R_s 的计算则采用利用中国的土壤呼吸监测数据对其模型进行了区域化改进,更新后的土壤呼吸模型^[32]:

$$R_s = (R_0 + M \times D_s) \times E_{B \times T} \times \frac{P + P_0}{K + P} \quad (11)$$

式中: R_0 气温为 0°C 时土壤有机碳的密度($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$); D_s 为土壤有机碳密度(kg/m^2); B 为温度参数; T 为年平均温度($^\circ\text{C}$); P 为年平均降水量(mm); M 、 P_0 、 K 是回归参数,其中 P_0 、 K 是与土壤呼吸速率与降水相关的系数,在本文中参考文献^[32]参数值为 $B = -1.39$, $R_0 = 0.558$, $M = 0.118$, $P_0 = 2.972$, $K = 5.657$ 。

2.2.6 固碳服务需求 本文选择排放系数法计算固碳服务需求,该方法是联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)提出的一种估算方法^[33]。本文基于能源统计数据 and 人均碳排放数据以及行政单元,可视化空间分布特征。计算公式为:

$$C_e = \sum_{i=1}^n P_i \times \varphi \quad (12)$$

式中: C_e 为碳排放总量(t/a); P_i 为第 i 村的人口数量(人); φ 为人均碳排放量(t/a)。

人均碳排放数据(φ)通过云南省能源消耗量来

计算,采用 IPCC 在《国家温室气体排放清单指南》提供的碳排放量来计算,计算公式为:

$$C_E = \sum_{i=1}^n E_j \times CEF_i \times \frac{12}{44} \quad (13)$$

$$\varphi = \frac{C_E}{P} \times \frac{G_x}{G_y} \quad (14)$$

式中: C_E 为总碳排放量(t); E_j 为第 j 类能源的实物量(t); CEF_j 为第 j 类能源的碳排放系数($\text{CO}_2 \text{ kg}/\text{kg}$);本研究参照云南省统计年鉴^[34-36]中主要的能源种类,选取煤炭、石油、天然气; P 为云南省人口数; G_x 为小江流域的人均 GDP; G_y 为云南省人均 GDP。由于本研究区的经济水平没有达到云南省的平均水平,根据一些学者^[37]的研究结论,GDP 与碳排放成明显的正比。因此,对云南的人均碳排放进行修正后得到小江流域的人均碳排放。

2.2.7 生态系统服务供需比 为了描述生态系统服务供需的之间的关系,本文参考文献^[38-39]建立的生态系统服务的供需比公式,以行政村为基本单位,构建小江流域生态系统服务供需关系。其计算公式为:

$$ESDR_a = \frac{S_a - D_a}{(S_{\text{max}} + D_{\text{max}})/2} \quad (15)$$

式中:ESDR_{*a*}为 a 村的生态系统服务的供需比,大于 0 表示供给大于需求,等于 0 表示供给等于需求,小于 0 表示供给小于需求; S_a 为 a 村的供给量(t); D_a 为 a 村的需求量(t), S_a 、 D_a 均用 ArcGIS 区域统计功能求出; S_{max} 为流域内最大的供给水平(t); D_{max} 为流域内最大的需求水平(t)。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务供给和需求变化及供需关系

3.1.1 水服务供需关系及动态转变 InVEST 模型的结果显示,从整体上看,小江流域 2005—2015 年产水量呈现递增趋势,由 2005 年的 $2.03 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 增加到 2015 年的 $2.37 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,增加了 14.34%,虽然在 2010 年有显著的下降,这主要是由于 2005 年和 2015 年是丰水年份,而 2010 年相对干旱(图 1)。在同一年份内(图 2),流域内单位面积的产水量空间上呈现较大的差异;不同年份间,流域单位面积产水量的空间分布规律表现较为一致,流域北部的单位面积的产水量明显高于中部和南部地区,主要是由于该区域内北部的降雨相对充足。2005—2010 年间(图 3),流域所有区域产水量均呈减少趋势,其中中部地区产水量减小的幅度相对较大,而南部地区减小的幅度较小;2010—2015 年间(图 3),小江流域大部分区域产水量则表现为增加,其中流域的南部地区增加的幅度相对较大。

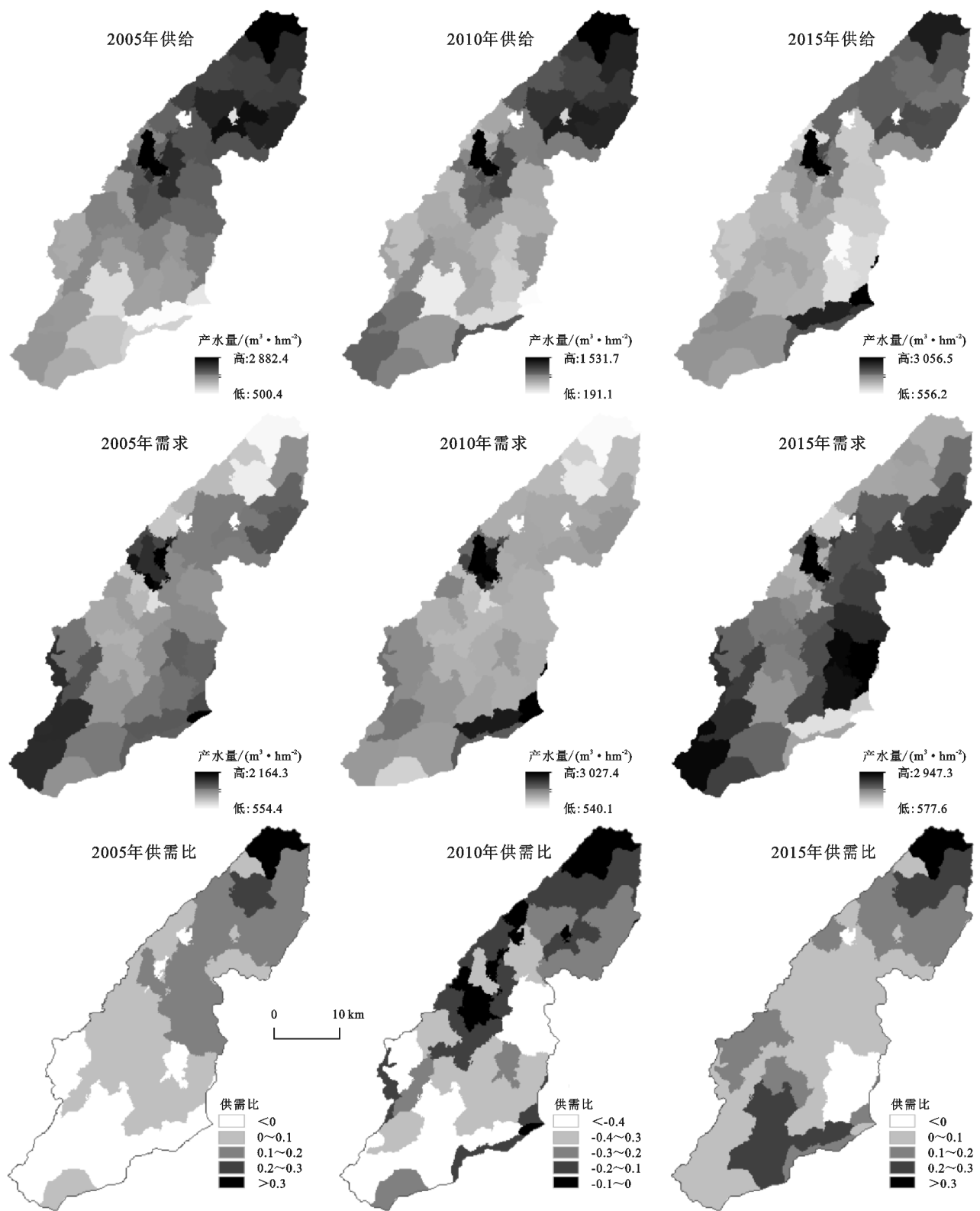


图 2 小江流域 2005—2015 年水服务供需关系

通过计算小江流域总的水服务的需求,结果显示,2005—2015 年间小江流域水服务需求量由 $1.84 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,增加到 $1.90 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,增加了 3.26%。以行政村为基本单元,将 3 个年份的水服务需求空间化,得到小江流域的单位面积需水量的空间分布情况(图 2)。结果显示,不同年份内的空间分布差异较小,均表现为中部和西南部地区需水量较高,这是由于中部是流

域的人口密集区,人类社会的水资源消耗多,西南部是植被的密集区,生态需求消耗也较高。2005—2010 年(图 3)水需求服务大部分地区呈现减少,只有中部和南部的少部分地区呈现增加趋势;而在 2010—2015 年(图 3)的东部和南部区域表现为增加,中西部和南部的少部分区域呈现减少。

小江流域 2005 年、2010 年和 2015 年的水服务

的供需比呈现先减小后增加的趋势,由 2005 年的 0.10 减小到 2010 年的 -0.54,而后增加到 2015 年的 0.22,流域的供需情况逐渐呈现好转。从空间来看(图 2),在 2005 年,流域南部地区供需比均小于 0,水供给无法满足需求,而其他地区供需比均大于 0,且

越往北供需比越大。而到 2010 年,由于干旱的影响,流域均呈缺水的情况,其中南部最为严重,供需比小于 -0.4。在 2015 年流域供需比得到好转,大部分地区的供需比都大于 0,但是都在 0~0.1,表现为较低水平的供给大于需求。

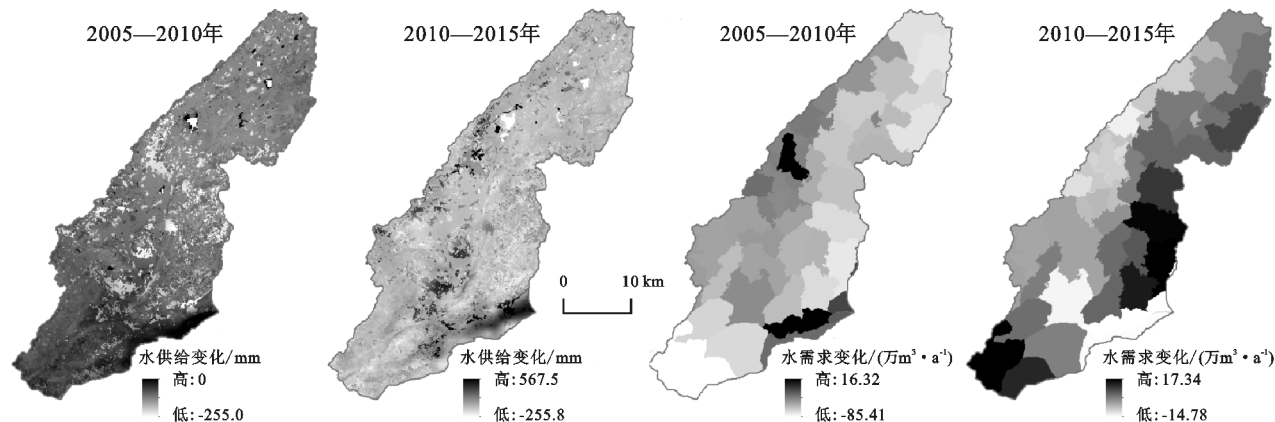


图 3 小江流域 2005—2015 年水服务供给和需求的变化

3.1.2 粮食服务供需关系及动态转变 通过计算小江流域 2005 年、2010 年和 2015 年的粮食供给情况。结果显示,流域 2005—2015 年的粮食供给服务均呈增加趋势,由 2005 的 7.5×10^4 t/a 增加到 2015 年 10.8×10^4 t/a,增加了 44.00%。同一年份内(图 4),流域单位面积的粮食供给服务空间上分布不均匀;不同年份间,流域单位面积粮食供给服务的空间分布规律表现较为一致,均表现为中部地区明显高于南部和北部地区,这是由于中部地区为沉积平坝区,水土资源优越,石漠化面积少,适合粮食种植。2005—2010 年(图 5),小江流域 1/2 以上的区域粮食供给服务呈现增加,其中比较显著的集中在中东部;北部的地区呈现减少趋势;2010—2015 年(图 5)几乎所有的区域都呈现增加趋势,仅有中部的几个村镇呈现一定程度的减小。

图 4 反映了 2005 年、2010 年和 2015 年粮食需求服务,结果显示,2005 年到 2015 年粮食需求服务整体上呈现轻微递降的趋势,由 2005 年的 4.3×10^4 t/a 下降到 2015 年的 4.0×10^4 t/a,下降了 6.98%。在同一年份内,空间上呈现较大的差异;不同年份间,空间分布规律表现较为一致,流域中部的单位面积的粮食需求量明显高于北部和南部地区,这是由于中部地区人口增加明显,增加了粮食的需求。2005—2010 年(图 5),除个别地区(中枢镇等)粮食需求量呈现增加外,其余地区均同样呈现减小趋势;而在 2010—2015 年也与 2005—2010 年相类似。

小江流域 2005 年、2010 年和 2015 年的粮食服务的供需比表明,粮食供需比是呈现逐渐增大的趋势,由 2005 年的 0.55 增加到 2015 年的 0.92,粮食供给大于需求。从空间上来看(图 4),2005 年,流域北部的区域供需均大于 0.3,中部和南部大部分区域都

集中在 0~0.3。而到 2010 年,中部和南部区域供需比都超过了 0.3,部分区域超过了 0.6,到 2015 年,供需比大于 0.3 的区域占总流域的 52.8%,比 2005 年增长了 10.2%,但是中部县城及附近的区域自 2005 年起供需比一直都小于 0。

3.1.3 固碳服务供需关系及动态转变 基于 CASA 模型和土壤呼吸模型计算的 2005 年、2010 年和 2015 年小江流域固碳服务供给能力结果显示,流域 2005—2015 年固碳服务整体上呈现先略减小后增加的趋势,由 2005 年的 3.59×10^6 t/a 下降到 2010 年的 3.38×10^5 t/a,后又增加到 2015 年的 5.03×10^5 t/a,整体上,增加了 40.11%。同一年份内(图 6),单位面积固碳服务空间上呈现一定的差异,表现为东北部和西南部较高,中部较低,这是由于东北部和西南部为植被资源丰富的地区。不同年份固碳服务的空间分布表现较为一致。2005—2010 年(图 7),流域内 34.1% 的区域固碳服务呈增加趋势,而下降的区域占 65.9%;2010—2015 年间,流域内大部分区域固碳服务是呈现增加区域,占总流域 95.2%,下降的区域仅占 4.8%。

通过排放系数法计算的 2005 年、2010 年和 2015 年的小江流域固碳服务的需求结果显示,2005—2015 年小江流域固碳服务的需求是呈现明显的上升趋势,由 2005 年的 3.25×10^5 t/a 增加到 2015 年的 5.25×10^5 t/a,增加了 61.54%。各年份单位面积固碳需求量空间上呈现一定的差异,表现为由中部向四周递减的趋势(图 6),中部地区人口众多,对资源的消耗较大,对固碳的需求也较高。2005—2010 年(图 7),所有区域的需求量均呈现增加趋势,而 2010—2015 年,南部的少部分地区需求呈现递减,其他区域呈现增加趋势。

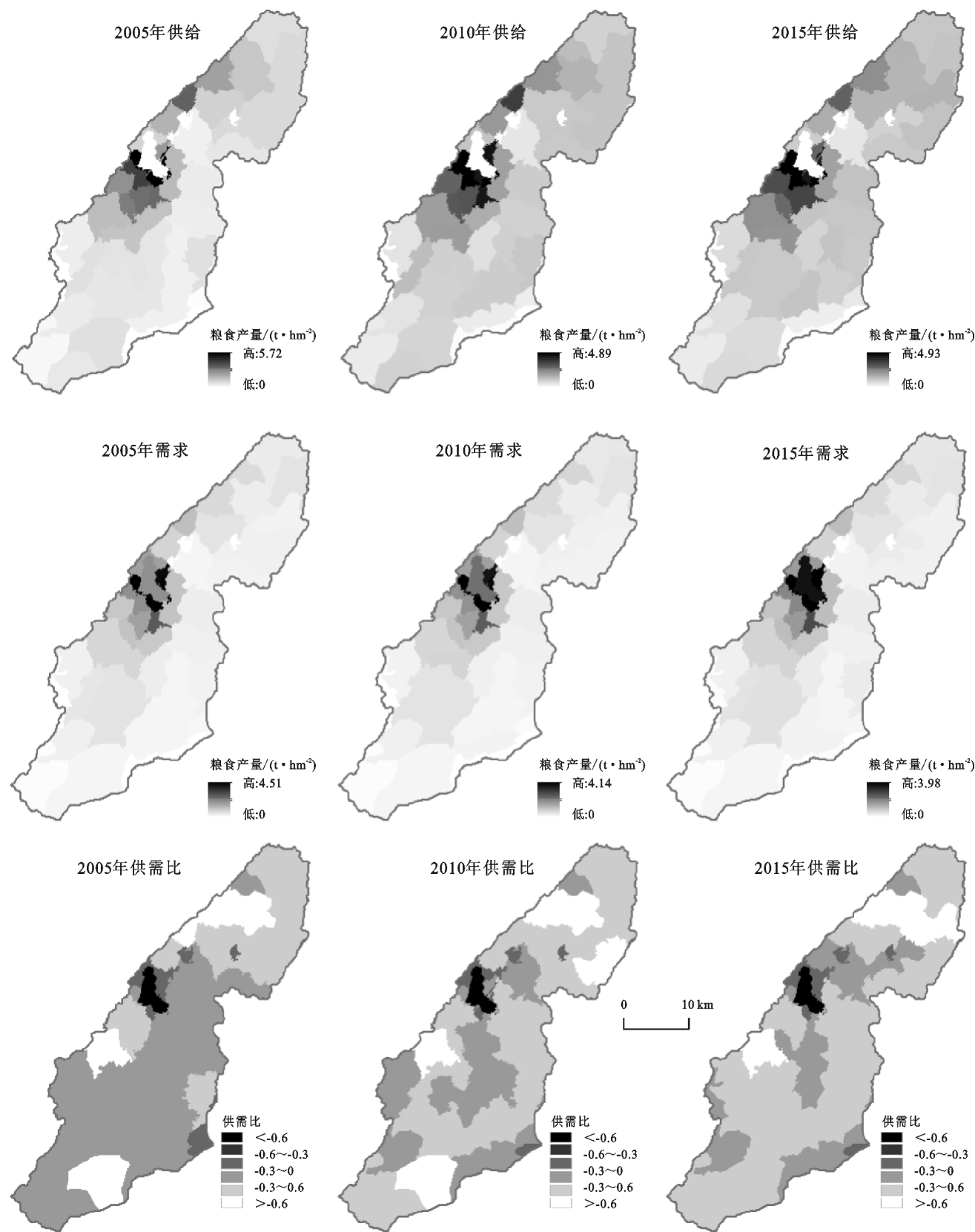


图 4 小江流域 2005—2015 年粮食服务供需关系

小江流域 2005 年、2010 年和 2015 年的固碳服务的供需比呈现先减小后上升的变化趋势,由 2005 年的 0.10 下降到 2010 年的-0.36,后又增加到 2015 年的-0.04,流域固碳服务的供给小于需求。从空间上来看(图 6),2005 年虽然大部分的区域均为供给大

于需求,但是这个供需比都位于 0~0.3 的低水平;2010 年固碳服务供需进一步恶化,供需比小于 0 的区域进一步扩大,扩大的区域多位于小江河的两岸,到 2015 年出现供需比小于 0 的区域有所减小,固碳服务的供需关系得到轻微的缓和。

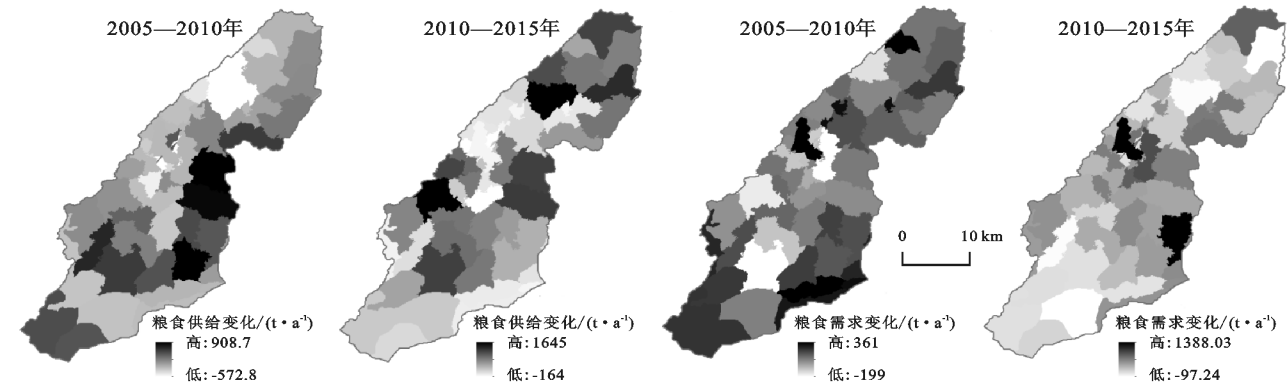


图 5 小江流域 20005—2015 年粮食服务供需变化

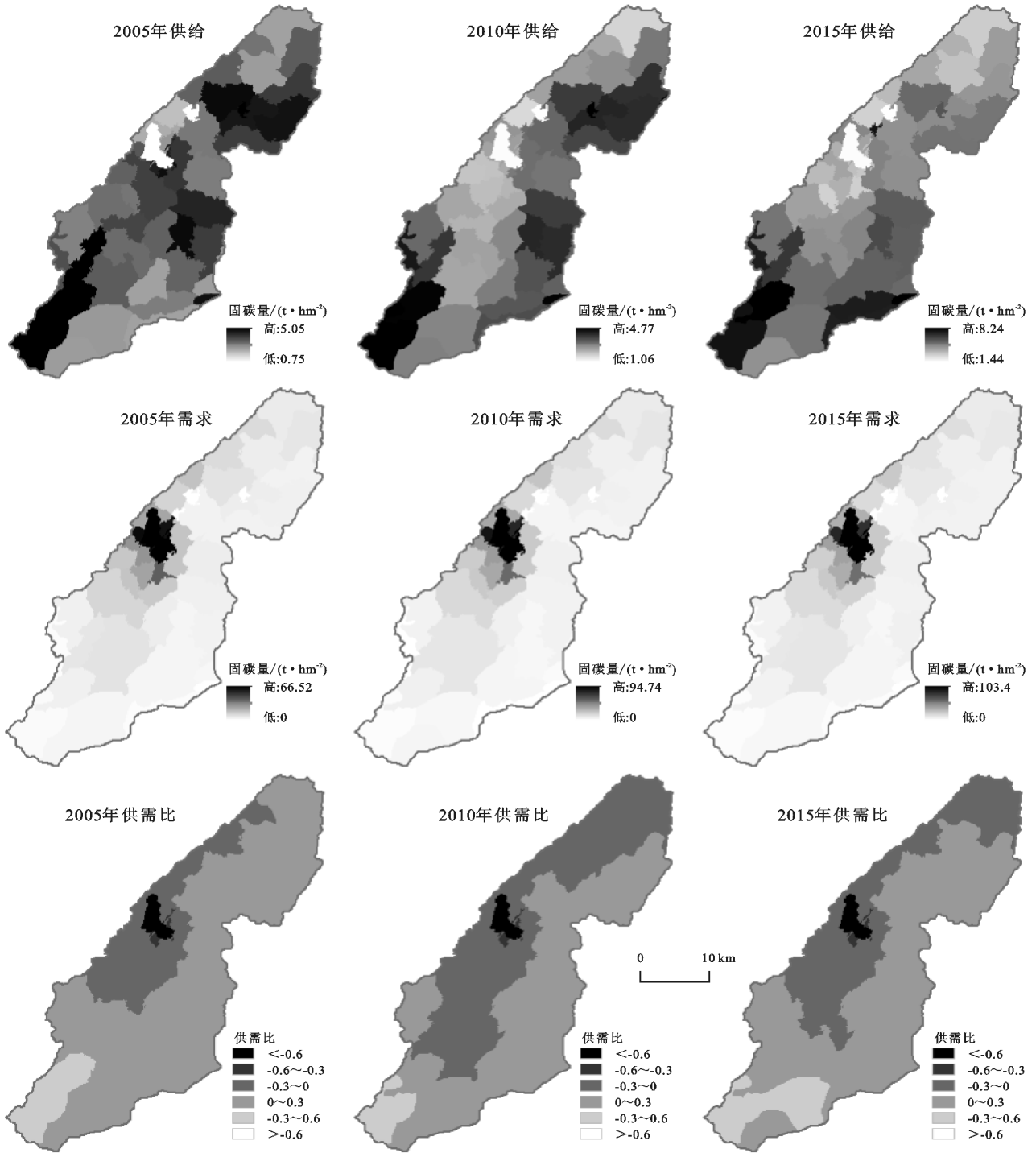


图 6 小江流域 2005—2015 年固碳服务供需关系

3.2 生态系统服务对石漠化的响应

2005—2015 年的石漠化分布与土地利用情况的结果显示(表 1),石漠化区域中,主要分布林地、灌木林地、其他林地、裸地和旱地这 5 种地类,其中旱地所占的面积均是最大的,其次是裸地和灌木林地。

而后通过对比 2005—2015 年小江流域石漠化区和非石漠化区这 5 种地类下的产水服务和固碳服务发现(表 2,表 3),在有林地、灌木林地和其他林地中,石漠化区的产水服务和固碳服务均小于非石漠化区,

而在裸地和旱地中,石漠化区的固碳服务均高于非石漠化区,而产水服务非石漠化区和石漠化区相差不大。可见,生态系统服务对不同土地利用下的石漠化和非石漠化区的响应不一样。

表 1 2005—2010 年小江流域石漠化区土地利用类型面积占比 单位: %

年份	有林地	灌木林地	其他林地	裸地	旱地
2005	10.84	24.49	8.88	22.19	28.92
2010	12.15	23.00	9.18	23.07	27.56
2015	11.40	23.05	9.41	23.87	27.81

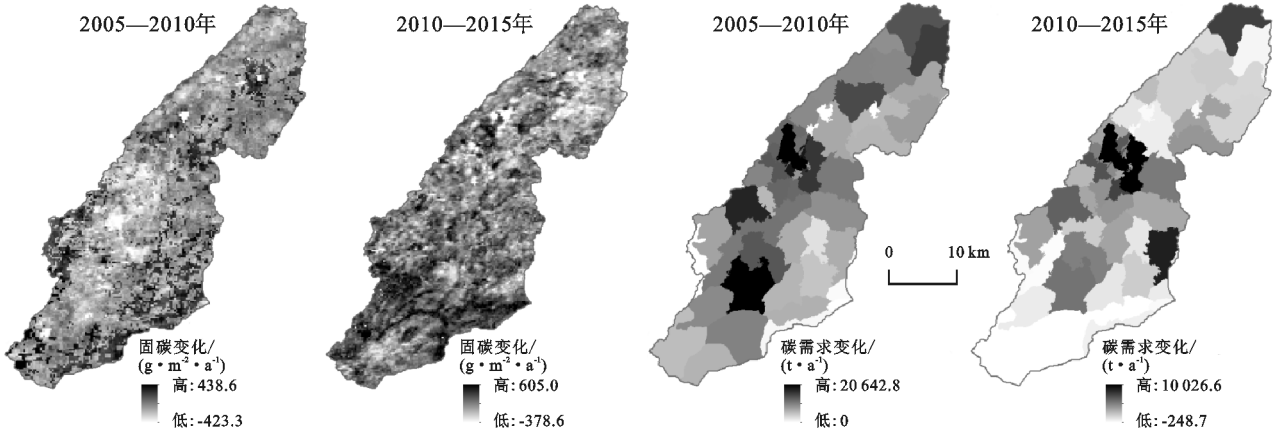


图 7 小江流域 20005—2015 年固碳服务供需变化

表 2 2005—2015 年小江流域非石漠化区和石漠化区 5 种主要土地利用类型固碳服务 单位: g/(m² · a)

年份	有林地		灌木林地		其他林地		裸地		旱地	
	非	石	非	石	非	石	非	石	非	石
2005	426.42	390.30	398.60	387.48	360.30	341.69	308.83	326.81	325.47	343.83
2010	420.51	380.96	397.59	388.71	356.54	346.25	304.05	326.09	301.81	327.83
2015	631.03	580.07	567.35	578.68	547.57	540.22	479.10	506.40	435.94	489.29

表 3 2005—2015 年小江流域非石漠化区和石漠化区 5 种主要土地利用类型产水服务 单位: mm

年份	有林地		灌木林地		其他林地		裸地		旱地	
	非	石	非	石	非	石	非	石	非	石
2005	245.47	231.76	258.59	237.89	231.03	227.04	155.90	156.56	181.84	180.16
2010	126.22	119.57	130.59	118.19	119.82	103.36	67.94	46.52	95.55	95.08
2015	293.74	291.63	295.23	291.28	283.76	273.41	181.78	186.65	208.90	207.09

2005 年、2010 年和 2015 年具有石漠化分布的村镇与 3 种生态系统服务的关系结果显示,大部分行政村的石漠化面积均小于 5 km²。在 2005 年(图 8),随着石漠化面积的增加,单位面积的产水量和单位面积的固碳量的变化趋势均不显著,而单位面积粮食产量呈现一定程度的降低趋势($R^2 = 0.15, P = 0.013$)。在 2010 年和 2015 年也表现出同样的规律。这些结果表明,粮食的供给量受到的影响明显强于产水和固碳服务,随着石漠化面积越大,粮食服务越少。

不同程度石漠化与产水量和固碳服务之间的关系(图 9)表明,在 2005 年和 2010 年,产水服务随着石漠化程度的加重,呈现出递减的趋势,其中 2010 年表现的更加明显,而在 2015 年,石漠化程度对产水量没有特别的影响。在 2005 年、2010 年和 2015 年(图

9),随着石漠化程度从轻度石漠化到重度石漠化,固碳服务均呈一定程度的减小;但是在极重度石漠化下,固碳服务在 2005 年和 2015 年则表现为增加的趋势。从上述结果来看,石漠化程度的加深,一定程度上降低了产水服务,在水丰富的年份影响相对不明显,而在 2010 年较干旱的年份,影响则相对明显;石漠化程度的加重,也降低了固碳水平,但是在极重度石漠化区,反而有一定的促进作用。

不同行政村的石漠化面积的变化和 3 种生态系统服务的变化之间的关系(图 10)表明,在 2005—2010 年间,随着各行政村石漠化面积的减小,粮食服务呈增大趋势,而对于固碳服务和产水服务影响不明显;在 2010—2015 年间,石漠化面积的变化对产水服务和固碳服务影响也不明显,对粮食服务和 2005—

2010 年表现一致,但是显著性明显低于 2005—2010 年。通过对比 2005—2010 年和 2010—2015 年各行政村石漠化面积的变化可以发现,2005—2010 年石漠化面积增大

1 km²和减小 1 km²的村镇明显多于 2010—2015 年,可以看出,随着石漠化面积变大,即石漠化治理面积加大,对生态系统服务的正向影响越明显。

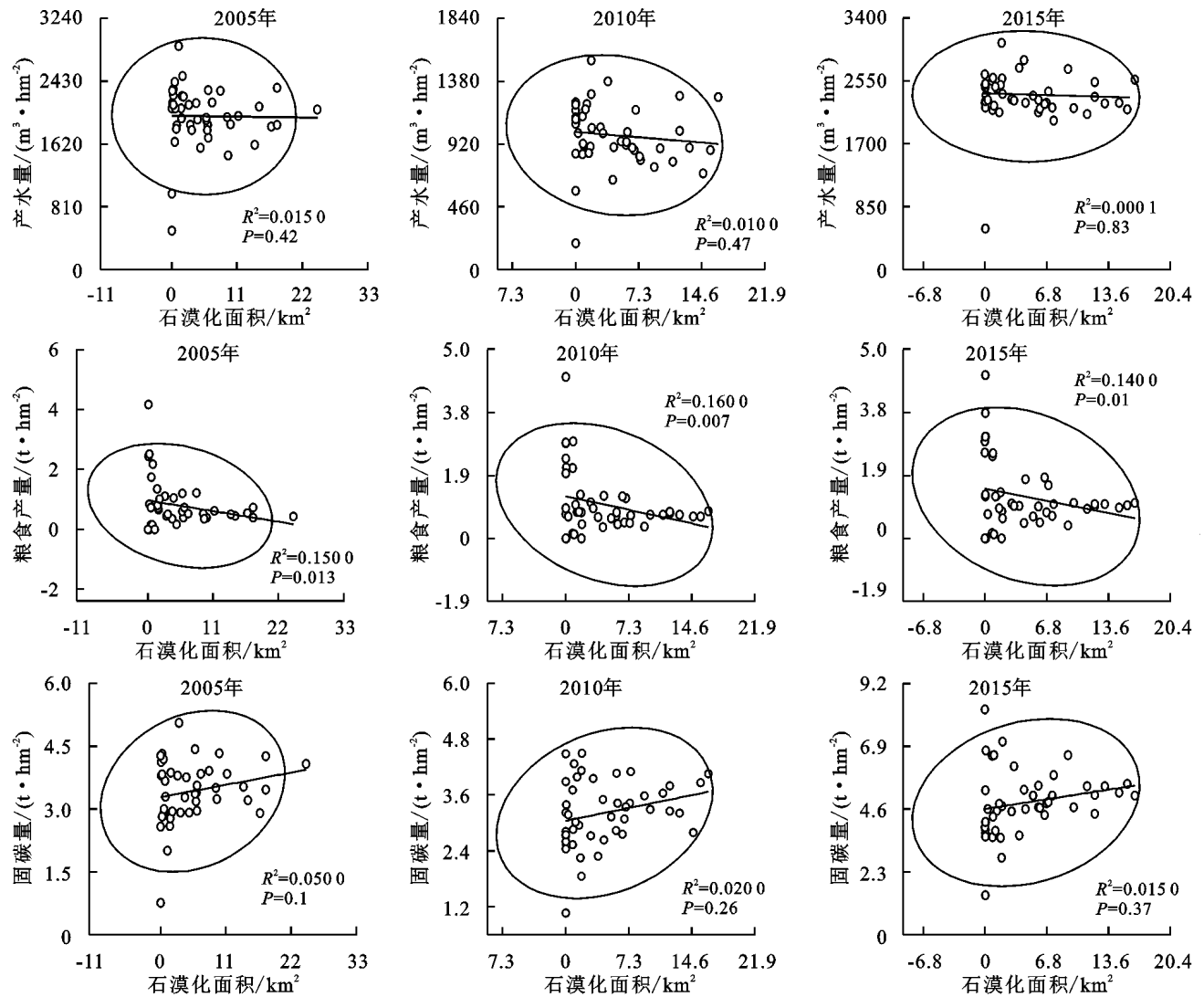


图 8 小江流域 2005—2015 年生态系统服务对石漠化面积的响应

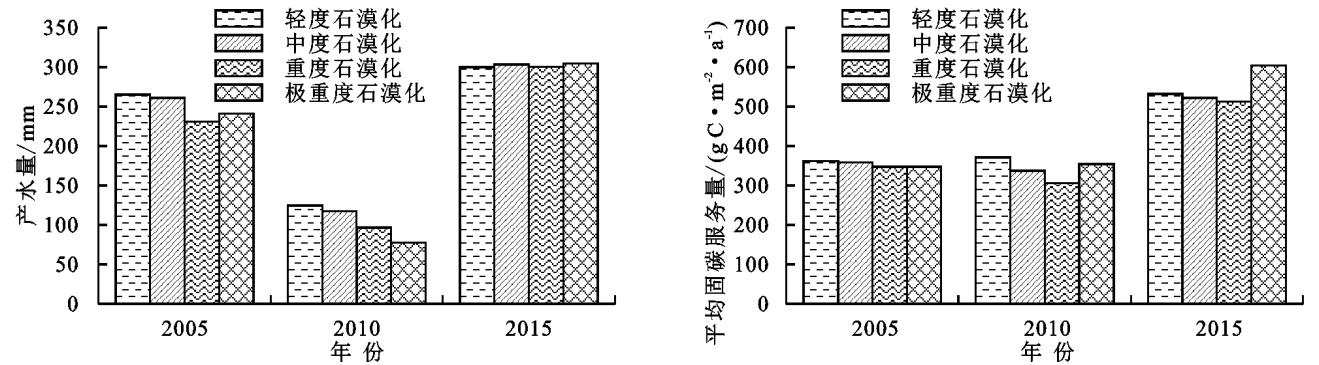


图 9 小江流域 2005—2015 年生态系统服务对石漠化程度的响应

4 结论

(1)在水服务方面,小江流域 2005—2015 年整体上供给量是呈现递增的趋势,增幅为 14.34%。不同年份间,流域产水量的空间分布规律均表现为北部高山区的产水量明显高于中部平坝区和南部河谷地区;水需求服务也呈现增加趋势,增幅为 3.26%。不

同年份内的空间分布差异较小,均表现为中部平坝区和西南部河谷区的森林区域需水量较高;而流域水服务供需比是呈现先减小后增加的趋势,由 2005 年的 0.10 增加到 2015 年的 0.22。南部河谷地区供需比增加最大,大部分地区均表现为较低水平的供给大于需求的情况。

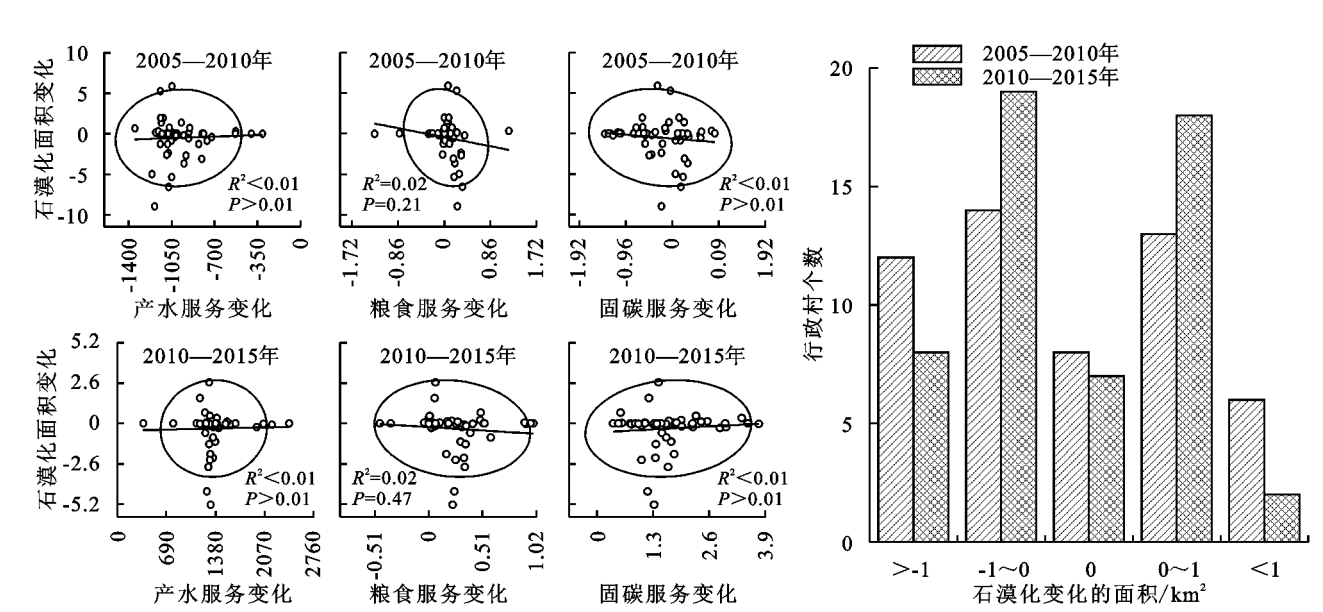


图 10 小江流域 2005—2015 年生态系统服务对石漠化的面积变化的响应

(2)在粮食服务方面,小江流域 2005—2015 年整体上供给量是呈现递增的趋势,增幅为 44.00%。不同年份间,流域供给服务的空间分布规律均表现为中部平坝区明显高于南部河谷和北部中高山地区;粮食需求服务呈递减趋势,减幅为 6.98%。不同年份间,空间分布规律均表现为流域中部平坝区的需求量明显高于北部中高山和南部河谷地区;流域粮食服务的供需比是呈现逐渐增大,由 2005 年的 0.55 增加到 2015 年的 0.92。大部分区域供需比均大于 0,只有县城及附近的区域供需比小于 0。

(3)在固碳服务方面,小江流域 2005—2015 年整体上供给量呈现递增的趋势,增幅为 40.11%。不同年份固碳服务的空间分布均表现为东北部和西南部的森林区域较高,中部平坝区较低;需求服务也呈现递增趋势,增幅为 61.54%,不同年份需求量的空间分布均表现为由中部平坝区向四周递减的趋势;流域固碳服务供需比整体上呈减小趋势,由 2005 年的 0.10 下降到 2015 年 -0.04。2015 年出现供需比小于 0 的区域比 2010 年有所减小,固碳服务的供需关系得到轻微的缓和。

(4)石漠化面积越大的地区,粮食服务越低,而固碳服务越高。随着石漠化程度的加重,产水服务和固碳服务均呈现一定程度的减少,其中产水服务在干旱年份减小趋势更加明显。而随着石漠化面积减小,产水服务和固碳服务变化不明显,粮食服务呈现一定程度的增加,其中减小的面积越大,变化的趋势越明显。石漠化综合治理对于提升区域内生态系统服务的水平、改善供需关系、促进人类福祉发展具有一定的积极作用。

本文通过综合多种方法研究了生态系统服务之间的供需关系,可为区域内的生态系统的管理提供一

定的参考意见,但是研究中也存在一定的不确定性。例如,供需关系的研究是基于村镇的,在村镇内部之间也同样存在供需之间的空间异质性,如何更加精确的描述供需的匹配状况是今后生态系统服务供需研究的重要方向。

参考文献:

[1] Lique C, Piroddi C, Macías D, et al. Ecosystem services sustainability in the Mediterranean Sea: Assessment of status and trends using multiple modelling approaches [J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 1-14.

[2] Habib T J, Heckbert S, Wilson J J. Impacts of land-use management on ecosystem services and biodiversity: an agent-based modelling approach [J]. Peer J, 2016, 4: e2814.

[3] 肖玉,谢高地,鲁春霞.基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展[J].生态学报, 2016, 36(10): 3096-3102.

[4] 陈登帅.延河流域水供给服务的供需平衡与空间流动研究[D].西安:陕西师范大学, 2018.

[5] 马琳,刘浩,彭建,等.生态系统服务供给和需求研究进展[J].地理学报, 2017, 72(7): 1277-1289.

[6] 姚婧,何兴元,陈玮.生态系统服务流研究方法最新进展[J].应用生态学报, 2018, 29(1): 335-342.

[7] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, et al. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets [J]. Ecological Indicators, 2012, 21: 17-29.

[8] 杨莉,甄霖,潘影,等.生态系统服务供给—消费研究:黄河流域案例[J].干旱区资源与环境, 2012, 26(3): 131-138.

[9] Palomo I, Martín-López B, Potschin M, et al. National Parks, buffer zones and surrounding lands: Mapping ecosystem service flows [J]. Ecosystem Services, 2013, 4: 104-116.

- [10] Boithias L, Acuña V, Vergoñós L, et al. Assessment of the water supply: Demand ratios in a Mediterranean basin under different global change scenarios and mitigation alternatives [J]. *Science of The Total Environment*, 2014, 470/471: 567-577.
- [11] 王宇. 云南泸西小江流域岩溶水有效开发模式研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2006.
- [12] 周晓东. 基于 GIS 的云南小江流域植被生态需水量时空分布规律 [D]. 南宁: 中国地质科学院, 2017.
- [13] 马文瀚. 贵州喀斯特脆弱生态环境的可持续发展 [J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2003, 21(2): 75-79.
- [14] Zhang M Y, Wang K L, Liu H Y, et al. Effect of ecological engineering projects on ecosystem services in a karst region: A case study of northwest Guangxi, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 183: 831-842.
- [15] Wang J, Wang K L, Zhang M Y, et al. Impacts of climate change and human activities on vegetation cover in hilly southern China [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 81: 451-461.
- [16] 张军以, 戴明宏, 王腊春, 等. 西南喀斯特石漠化治理植物选择与生态适应性 [J]. *地球与环境*, 2015, 43(3): 269-278.
- [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] 泸西县地方志办公室. 泸西县统计年鉴 2005 [M]. 昆明: 德宏民族出版社, 2006.
- [19] 泸西县地方志办公室. 泸西县统计年鉴 2010 [M]. 昆明: 德宏民族出版社, 2011.
- [20] 泸西县地方志办公室. 泸西县统计年鉴 2015 [M]. 昆明: 德宏民族出版社, 2016.
- [21] 弥勒县地方志办公室. 弥勒县统计年鉴 2005 [M]. 昆明: 德宏民族出版社, 2006.
- [22] 弥勒县地方志办公室. 弥勒县统计年鉴 2010 [M]. 昆明: 德宏民族出版社, 2011.
- [23] 弥勒市地方志办公室. 弥勒市统计年鉴 2015 [M]. 昆明: 德宏民族出版社, 2016.
- [24] 师宗县地方志办公室. 师宗县统计年鉴 2005 [M]. 昆明: 云南省人民出版社, 2006.
- [25] 师宗县地方志办公室. 师宗县统计年鉴 2010 [M]. 昆明: 云南省人民出版社, 2011.
- [26] 师宗县地方志办公室. 师宗县统计年鉴 2015 [M]. 昆明: 云南省人民出版社, 2016.
- [27] 肖玉, 成升魁, 谢高地, 等. 我国主要粮食品种供给与消费平衡分析 [J]. *自然资源学报*, 2017, 32(6): 927-936.
- [28] 孙滨峰, 赵红, 逯非, 等. 东北森林带森林生态系统固碳服务空间特征及其影响因素 [J]. *生态学报*, 2018, 38(14): 4975-4983.
- [29] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 等. 基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算: 以中国内蒙古为例 [J]. *遥感学报*, 2005, 9(3): 300-307.
- [30] 朱文泉, 陈云浩, 徐丹, 等. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2005, 24(3): 296-300.
- [31] 谢薇, 陈书涛, 胡正华. 中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素 [J]. *环境科学*, 2014, 35(1): 334-340.
- [32] 赵倩. 1982—2013 年欧亚大陆土壤呼吸时空变化特征 [D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [33] 李婷, 李晶, 王彦泽, 等. 关中天水经济区生态系统固碳服务空间流动及格局优化 [J]. *中国农业科学*, 2017, 50(20): 3953-3969.
- [34] 云南省统计局. 云南省统计年鉴 2005 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2006.
- [35] 云南省统计局. 云南省统计年鉴 2010 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2011.
- [36] 云南省统计局. 云南省统计年鉴 2015 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [37] 李经路, 李晓玲. 云南碳排放的变动趋势与影响因素研究 [J]. *环境与可持续发展*, 2015, 40(5): 172-176.
- [38] Chen J Y, Jiang B, Bai Y, et al. Quantifying ecosystem services supply and demand shortfalls and mismatches for management optimisation [J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 650: 1426-1439.
- [39] Li J H, Jiang H W, Bai Y, et al. Indicators for spatial-temporal comparisons of ecosystem service status between regions: A case study of the Taihu River Basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2016, 60: 1008-1016.