

引用格式: 杨丽雯, 董丽青, 张立伟, 等. 固碳服务供需平衡和服务流量化评估: 以引黄入晋南干线为例[J]. 资源科学, 2019, 41(3): 557-571. [Yang L W, Dong L Q, Zhang L W, et al. Quantitative assessment of carbon sequestration service supply and demand and service flows: A case study of the Yellow River Diversion Project South Line[J]. *Resources Science*, 2019, 41(3): 557-571.] DOI: 10.18402/resci.2019.03.13

固碳服务供需平衡和服务流量化评估 ——以引黄入晋南干线为例

杨丽雯^{1,2}, 董丽青², 张立伟³, 何秉宇⁴, 张永清²

(1. 山西能源学院, 晋中 030600; 2. 山西师范大学地理科学学院, 临汾 041000;

3. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119;

4. 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐市 830046)

摘要: 生态系统服务流可建立生态系统服务供需间的时空连接, 因此明确生态系统服务流的传输路径和流量有利于提高生态系统服务价值评估的准确度。引黄入晋工程南干线是解决太原市供水的重要工程, 工程的可持续发展必须有良好的生态环境作保障, 而固碳服务供需平衡和服务流的量化研究可作为科学依据。SPANs模型旨在模拟生态系统服务从供给区到需求区的流动过程并制图, 具有广阔的应用前景。为更好地评估引黄入晋工程南干线的固碳服务, 本文基于SPANs模型, 量化供需平衡关系, 以研究区主风向路径为基础, 绘制了服务流传输路径图并量化服务流。结果表明: 2000—2015年, 引黄入晋南干线固碳服务供给量基本保持稳定, 而需求量逐年增加, 导致供需盈余逐年减少, 供需平衡关系呈现减弱趋势。研究区土地利用变化速率较小是固碳服务供给总量变化较小的主要原因, 火力发电厂碳排放量持续稳定增加是影响固碳服务需求总量和供需差的主要因素。本文揭示了固碳服务供需盈余关系变化规律和影响因素, 以期为当地的生态环境管理决策提供数据支撑, 同时为使用SPANs模型分析生态系统固碳服务流提供借鉴。

关键词: SPANs模型; 固碳服务; 供需平衡; 服务流; 引黄入晋南线

DOI: 10.18402/resci.2019.03.13

1 引言

生态系统固碳服务(以下简称“固碳服务”)将大气中捕获的碳固定起来, 可以抵消人类向大气中排放的部分CO₂, 从而起到调节气候的作用, 是生态系统服务中调节服务的重要组成部分^[1], 是生态系统服务研究领域最受关注的问题^[2]。固碳服务供给量化与制图一直广受关注^[3-6], 然而大多数研究缺少考虑区域供需空间平衡关系和服务流传输, 导致评价结果无法为决策提供可靠依据^[7-9]。近年来一些国内外者开始关注区域间固碳服务供需平衡和服务流传输, 如Sahle等^[10]和年蔚等^[11]分析了区域固碳服务空间平衡关系并制图, Zank等^[12]和Bagstad等^[13]

分析了固碳服务的受益者, Schröter等^[14]提出了服务流流量计算依据, 李婷等^[15]绘制了服务流传递示意图。上述研究均未绘制出具体的服务流传输路径图, 也没有量化服务流流量, 但这些工作对进一步研究固碳服务从供给到需求的传递动态非常重要。

生态系统服务流能够有效地耦合具有空间异质性特征的生态系统服务的供需, 生态系统服务流的量化是解决当前生态系统服务价值评估不精确的突破口^[16]。近几年, 美国佛蒙特大学基于生态系统服务人工智能(Artificial Intelligence for Ecosystem Services, ARIES)项目提出了“服务路径属性网络”(Service Path Attribution Networks, SPANs)模

收稿日期: 2018-08-10, 修订日期: 2018-12-18

项目基金: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41601182); 山西省“1331工程”重点学科建设计划项目。

作者简介: 杨丽雯, 女, 新疆乌鲁木齐人, 博士, 副教授, 主要研究方向为生态系统服务流。E-mail: beautifulife2133@163.com

通讯作者: 何秉宇, E-mail: BYhe718@163.com

型^[17-18]。SPANs模型集成生态学和地理学常用的模拟模型,旨在模拟生态系统服务从供给区到需求区的流动过程并绘制空间图。该模型扩展了生态系统服务的研究视角,具有广泛的应用前景,但由于模型开发和使用的较短,覆盖的生态系统服务类型尚不全面,且应用案例主要集中在北美洲和欧洲,案例数量有限^[19]。目前利用SPANs模型来模拟某项具体的生态系统服务空间流动的实例十分缺乏^[9]。

万家寨引黄入晋工程通过总干线、南干线、联接段每年向太原供水6.4亿m³,为太原市经济、社会、环境的可持续发展提供了可靠的水资源保障^[20]。巩固引黄入晋工程的成果,必须有良好的生态环境支持,而固碳服务供需平衡和服务流的量化研究可作为科学依据。本文利用遥感影像、气象、水文和土地利用类型等数据,探讨固碳服务的供需时空平衡状况及影响因素,并运用SPANs模型,以主风向风场图为基础,分析服务流传输路径并量化服务流流量,以期为当地的生态环境管理决策提供支撑。

2 数据与方法

2.1 供给量化与制图

本文中地上部分碳密度值和地下部分碳密度值分别依据参考文献^[21,22]和^[23,24]确定。土壤碳密度值根据全国平均水平来确定^[22,23]。土地覆被数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心^[25]。使用InVEST模型输出固碳服务供给图。

2.2 需求量化与制图

人为和自然的CO₂排放源都是固碳服务的需求者^[26,27]。碳排放者是固碳服务的使用者,使用者聚集区则是固碳服务的需求区^[13]。

固碳服务需求量=居民呼吸碳排放量+牲畜(猪、牛和羊)呼吸碳排放量+农业N₂O排放量+火力发电厂碳排放量+供暖碳排放量+土地利用变化产生的碳排放量。

(1)

由于土地利用类型转化产生的影响较小,所以省略了土地利用变化产生的碳排放量的计算。

居民呼吸碳排放量=研究区人口总数×每人平均每年呼吸产生的碳排放量^[28]。

(2)

牲畜呼吸碳排放量=牲畜数量×每只(头)牲畜平均每年呼吸产生的碳排放量^[28]。

(3)

农业N₂O排放量=0.01×每年氮肥施用量×44÷28^[10]。

(4)

火力发电厂碳排放量=实际发电量(部分电厂发电量用发电装机容量的70%估算^[29])×电与碳转化系数^[30]。

(5)

热力公司供热碳排放量=单位供暖面积耗煤量×供暖面积×煤与碳转化系数^[31]。

(6)

2.3 服务流传输路径与流量量化

2.3.1 服务流路径

植物固定和土壤储存的碳在分配到使用地点之前,首先被景观改变(土地利用类型的改变)所产生的碳释放量所消耗。在服务流模型中,碳释放生态系统作为碳源,所有的碳源通过大气环流与碳汇和使用者联系在一起。依据每一个使用地点的相对碳排放量来计算需求量,将每个县域内植被固定和土壤储存碳量的残余量分配给每一个使用地点^[12]。未被固定的碳,随大气环流运动到其他区域,被其他地区的生态系统提供的固碳服务所消耗,因此服务流路径主要依据风场图确定,但由于数据的可获得性,目前依据主风向的运动路径确定。

2.3.2 服务流流量计算

Villamagna等^[32]认为实际被使用的服务构成了服务流。本文分2种情况讨论:一是当供给量≥需求量,服务流以需求量为基础来计算,等于单位时间单位面积上固碳服务实际被使用或消费量;二是当供给量<需求量,生态系统固碳能力无法满足人类固碳服务需求,通过计算单位时间单位面积的固碳服务的供给量来量化服务流。

2.4 模型验证

由于研究区缺少碳储量实测值,故引进相对误差(RE)说明模型输出精度^[26,33],公式如下:

$$RE = \frac{Rs - Ra}{Ra} \times 100\% \quad (7)$$

式中:RE为相对误差,Rs为模型模拟结果,Ra为利用其他独立数据源计算结果。

依据Wu等^[34]和Ni^[35]研究成果取得研究区土壤和植被碳密度值。植被类型图(中国1:400万植被图数据集)^[36]和土壤类型图^[37](中国土壤特征数据集)均来源于寒区旱区科学数据中心。经计算,模型的相对误差为13.34%。因此,InVEST模型模拟的碳储量可以代表该地区的碳储量值。

2.5 研究区概况

万家寨引黄入晋工程从黄河万家寨水库取水,

2019年3月

分别向太原、大同和朔州供水。工程由总干线、南干线、联结段和北干线4部分组成。引黄入晋工程南干线位于东经 $111^{\circ}07'35''$ – $112^{\circ}45'53''$,北纬 $38^{\circ}08'11''$ – $39^{\circ}45'21''$,包括偏关县、河曲县、五寨县、神池县、宁武县、静乐县和朔城区(图1),区域总面积 $1.16 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。研究区属于温带大陆性气候,多年平均气温 9.9°C ,年降水量为 415.4 mm ,全年以北风和西北风为主^[38]。地貌类型复杂多样,水土流失严重,植被覆盖率较低,生物多样性贫乏^[39,40]。

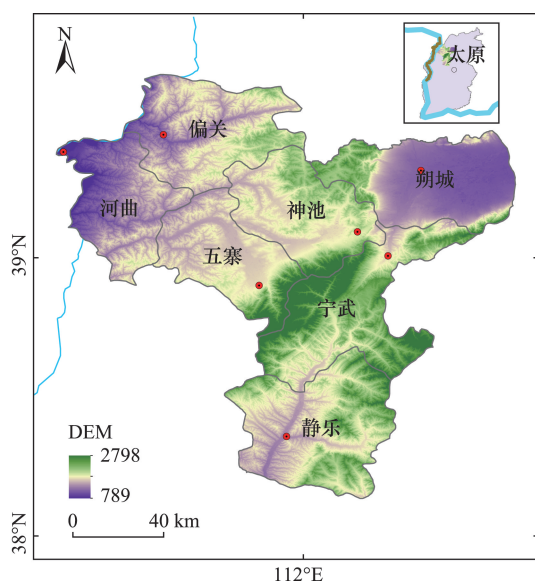


图1 研究区地理位置与高程

Figure 1 Location and digital elevation model of the study area

3 结果与分析

3.1 供给

固碳服务的供给源主要为植被和土壤^[12]。植被在研究区的中部地区较为丰富(图2),主要包括五寨县、宁武县和神池县。碳储量高值主要分布于宁武县境内,神池县和五寨县次之。这些区域林地面积较大,植被类型主要为落叶阔叶林。碳储量较高的宁武县,主要植被类型为寒温性针叶林,境内有 5.45 万 hm^2 原始次生林,森林覆盖率超过38%。研究区的西部以针叶林和针阔叶混交林为主,面积较大,东部以阔叶林为主。西部沿黄区域的河曲县属于典型的黄土丘陵沟壑区,土质疏松,沟壑纵横,植被稀疏。植被类型主要为蒿类草丛、白羊草和黄背草草丛,森林覆盖率仅为14.6%,水土流失严重^[41],故其固碳服务供给量较低。

2000—2015年,研究区地上部分、地下部分和土壤碳储量在固碳服务供给总量中所占比例分别为7.85%~7.93%、7.91%~7.93%和84.16%~84.23%,由此可见,土壤碳库是影响固碳服务供给总量的主要因素。

由于研究区1999年以来大力推行退耕还林还草政策,林地的面积维持稳定,水土流失状况得到控制,2000—2015年研究区固碳服务供给总量仅下降0.44%(图3),主要是由于土壤碳储量下降引起的。土壤碳储量变化主要受碳库密度和土地利用

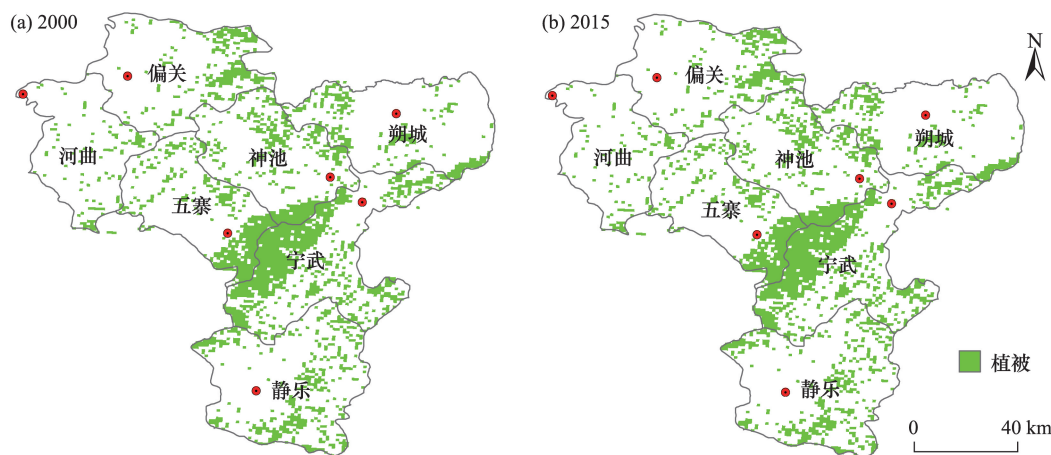


图2 研究区2000年和2015年固碳服务供给区

Figure 2 The supply areas of carbon sequestration service in the study area, 2000 and 2015

类型影响。2000—2015年研究区的土壤碳储量下降0.49%。运用综合土地利用动态度(S)揭示土地利用/土地覆被类型的年变化率^[42,43]。研究区 S 值为15.90%,表明土地利用类型的变化速率较小,因此固碳服务供给总量变化微弱。根据土地利用图计算得知,研究区农田面积减少了100 hm²,主要转化为居民建设用地。

3.2 需求

需求区包括居民区、牲畜养殖场、农田和工厂(图4)。研究区中,朔城区的居民区分布较密集;养殖场主要分布在朔城区和静乐县;农田在各个县均有分布,其中朔城区分布较为集中;火力发电厂和热力公司各县均有分布,但神池县规模较小。

2000—2015年研究区固碳服务需求总量呈上

升趋势,高等级需求区域逐渐增加,变化较快的是朔城区和宁武县(图5)。

时间(年份)、火力发电厂碳排放量、供暖碳排放量和居民呼吸碳排放量与固碳服务需求总量有显著相关关系(表1),而牲畜呼吸碳排放量和农业碳排放量与需求总量无显著相关关系。随着时间的延长,固碳服务需求总量有进一步增加的趋势。

朔城区人口增长和城市化水平提高较快,导致供暖面积稳定增加,由于研究区大部分地区由热力公司供暖,所以对电力的需求增加;另一方面,随着工业化水平逐年提高,为满足工业用电需求,火力发电量快速增加,因此朔城区固碳服务需求量增长在7个县区中最显著。火力发电厂碳排放量增加是固碳服务需求增长最显著影响因素,其次是居民

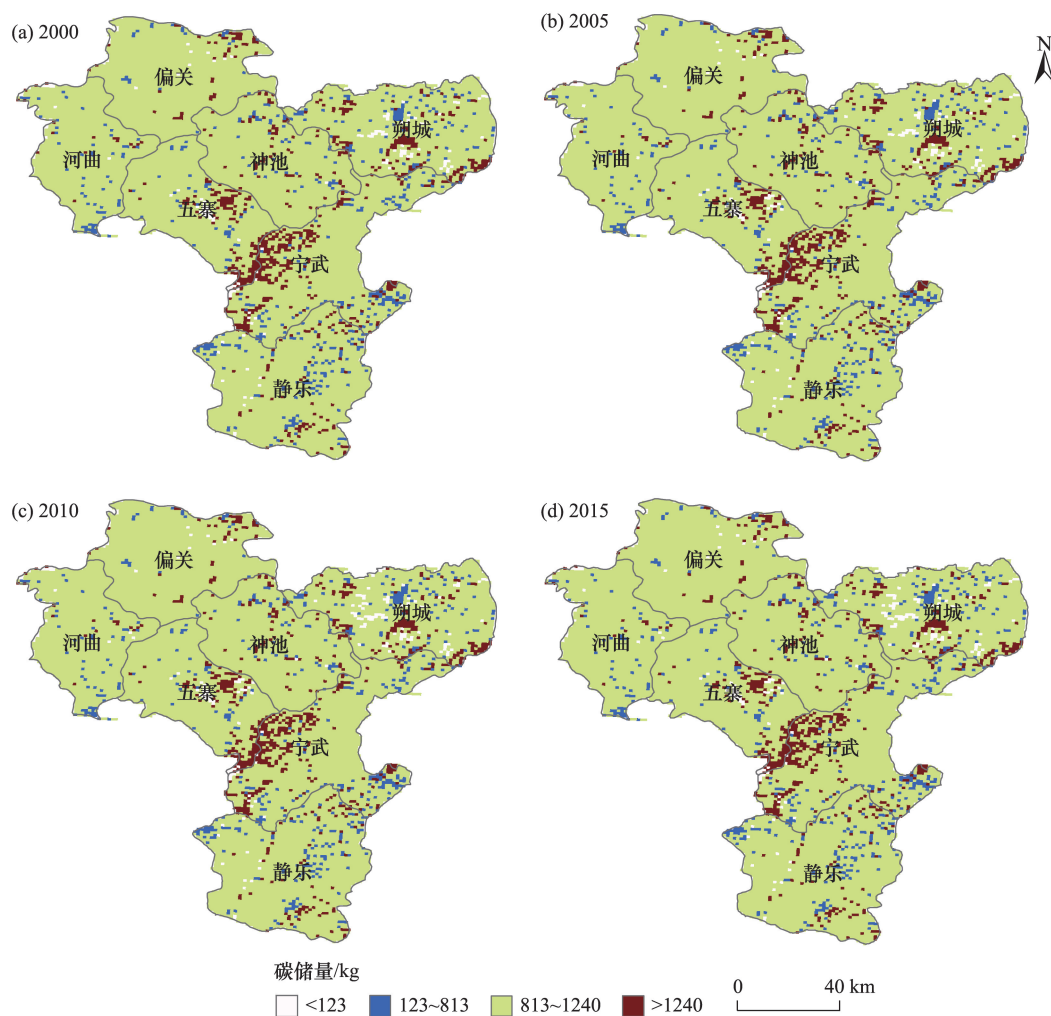


图3 研究区2000年、2005年、2010年和2015年固碳服务供给量空间分布

Figure 3 Spatial distribution of the supply of carbon sequestration service in the study area, 2000, 2005, 2010 and 2015

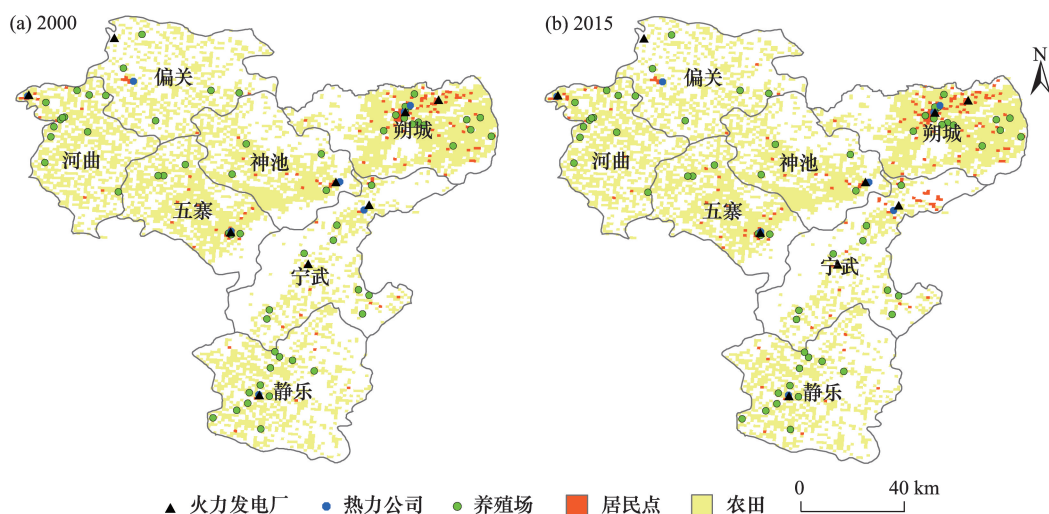


图4 研究区2000年和2015年固碳服务需求区

Figure 4 The demand areas of carbon sequestration service in the study area, 2000 and 2015

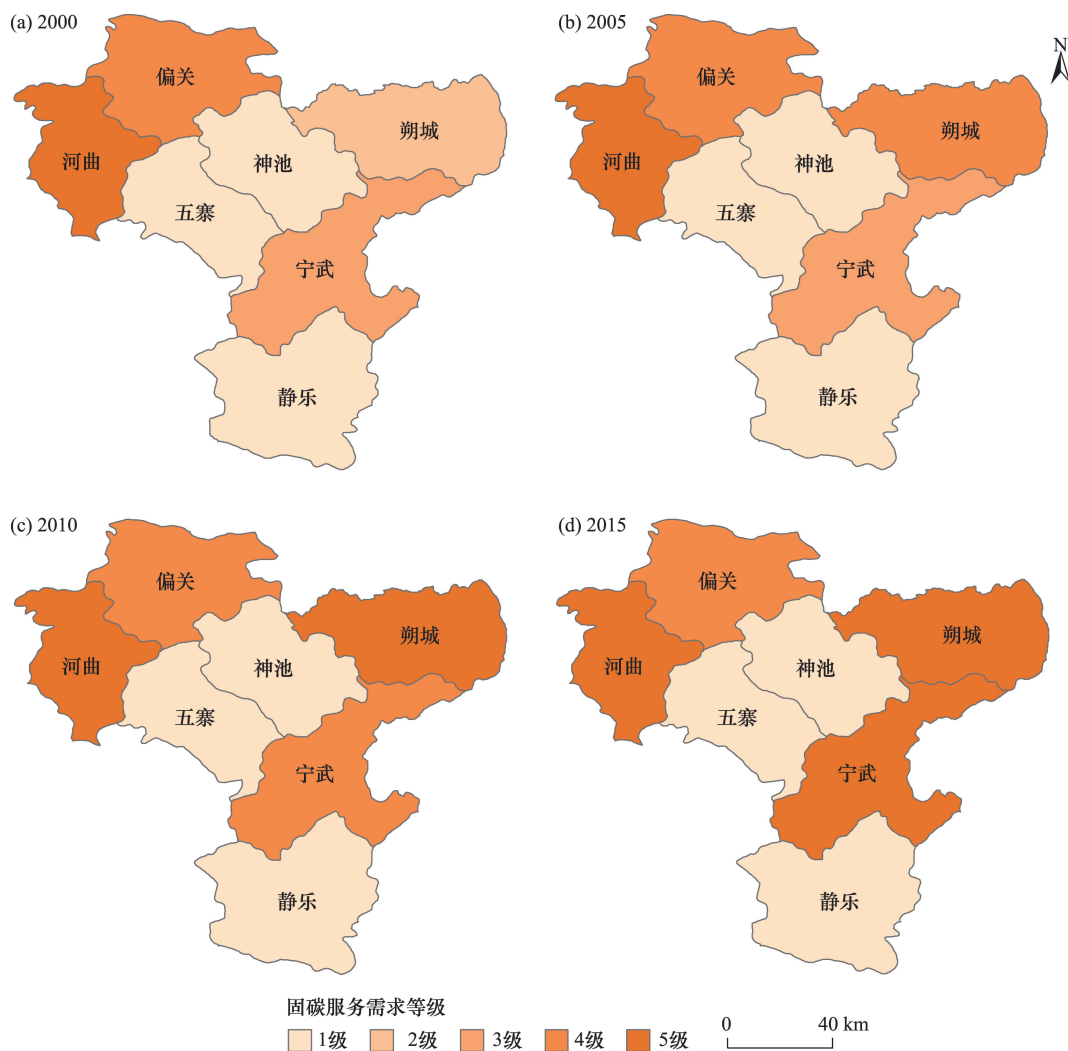


图5 研究区2000年、2005年、2010年和2015年固碳服务需求等级图

Figure 5 The demand rank map of carbon sequestration service in the study area, 2000, 2005, 2010 and 2015

表1 研究区固碳服务需求总量与其影响因素的回归方程

Table 1 Regression equations for carbon sequestration service demand and influencing factors

	固碳服务需求总量				
	相关系数	<i>R</i>	<i>F</i>	<i>Sig.</i>	回归方程
火力发电厂碳排放量	0.999**	0.999	655.94	0.001	$Y=1.29X+231.52$
供暖碳排放量	0.981*	0.981	51.68	0.019	$Y=12.25X+1018.20$
居民呼吸碳排放量	0.951*	0.953	20.02	0.047	$Y=e^{(88.43-341.69/X)}$
时间	0.995**	0.995	181.54	0.005	$Y=22.54X-43990.19$

备注:时间是指2000、2005、2010和2015四个年份。

呼吸和牲畜呼吸碳排放量增加(表2)。

偏关县固碳服务需求量主要受火力发电厂碳排放量的影响,其次受到牲畜呼吸碳排放量和居民呼吸碳排放量的影响。

河曲县固碳服务需求量相对较高,神池县固碳服务需求量相对较低(图5)。其中,河曲县2000—2015年火力发电厂碳排放量占全县碳排放量85%以上,因此火力发电是影响固碳服务需求最主要因素,其次是居民呼吸和牲畜呼吸碳排放量;神池县境内多利用风能和光能发电,因此固碳服务需求量主要影响因素是牲畜呼吸碳排放量,其次是居民呼吸碳排

放量。

五寨县2000—2010年固碳服务需求量持续增加,其中火力发电厂和供暖碳排放量影响较小,而牲畜呼吸碳排放量是显著影响因素,其次是居民呼吸碳排放量。由于牲畜呼吸碳排放量2015年比2010年下降14.76万t,使得全县固碳服务需求量显著下降。

宁武县的火力发电厂碳排放量大幅增加,是影响固碳服务需求量最主要的因素,其次是居民呼吸碳排放量和牲畜呼吸碳排放量。静乐县固碳服务需求量显著影响因素是牲畜呼吸碳排放量,其次是

表2 研究区各县区固碳服务需求量构成情况表

Table 2 Composition of carbon sequestration service demand in each county

时间	2000年						2005年					
县区	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	小计	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	小计
朔城区	43.97	3.37	62.22	36.75	5.71	152.02	126.75	6.48	64.61	64.58	6.02	268.43
河曲县	282.92	0.67	22.22	15.23	2.49	323.53	293.35	1.58	22.96	14.79	1.96	334.63
神池县	0.00	0.41	16.65	30.48	3.30	50.83	0.00	0.83	17.15	34.62	2.73	55.32
五寨县	0.29	0.44	17.39	34.98	4.25	57.35	0.29	1.04	17.96	39.46	4.03	62.80
宁武县	139.57	0.96	24.49	18.38	3.91	187.31	144.14	2.10	25.39	20.91	3.56	196.11
静乐县	2.04	0.55	24.93	35.96	2.84	66.32	2.11	1.09	25.94	27.73	2.42	59.28
偏关县	187.49	0.53	17.97	27.75	2.97	236.71	194.63	1.13	18.65	27.71	2.43	244.55
小计	656.27	6.93	185.86	199.53	25.47	1074.06	761.28	14.23	192.66	229.80	23.15	1221.12
时间	2010年						2015年					
县区	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	小计	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	小计
朔城区	158.30	11.20	82.20	61.50	6.45	319.58	198.30	16.38	83.26	31.32	5.82	335.10
河曲县	272.70	2.40	23.60	19.30	1.91	319.86	280.30	3.58	23.79	17.14	2.51	327.35
神池县	0.00	1.30	17.20	35.20	2.70	56.46	0.00	2.06	17.36	52.01	4.47	75.89
五寨县	0.30	1.60	17.50	39.30	4.77	63.49	3.16	2.49	17.69	24.52	3.66	51.52
宁武县	209.40	2.60	26.10	21.10	3.60	262.84	238.57	3.95	26.34	27.24	1.79	297.88
静乐县	2.30	1.90	25.50	27.00	2.75	59.50	2.61	3.04	25.65	37.50	2.72	71.52
偏关县	190.40	1.80	18.20	22.60	2.76	235.77	200.22	2.65	18.41	34.27	2.79	258.34
小计	833.42	22.85	210.41	225.88	24.95	1317.50	923.20	34.15	212.49	224.00	23.75	1417.60

注:*A*代表火力发电厂碳排放量,*B*代表供暖碳排放量,*C*代表居民呼吸碳排放量,*D*代表牲畜呼吸碳排放量,*E*代表农业碳排放量。

2019年3月

居民呼吸碳排放量,而火力发电厂碳排放量和供暖产生的碳排放不是主要影响因素。

综上所述,2000—2015年,火力发电厂碳排放量增加是影响研究区固碳服务需求总量增加最显著因素,其次是居民呼吸碳排放量和供暖碳排放量。由于研究区大部分区域采用热力供暖,因此供暖产生的碳排放量与火力发电厂碳排放量呈显著相关关系,供暖通过增加火力发电厂碳排放来影响固碳服务需求总量。农业生产产生的碳排放量较小,不是固碳服务需求总量的主要影响因素,它与火力发电厂碳排放量、供暖碳排放量、居民呼吸碳排放量和牲畜呼吸碳排放量之间也没有显著的关联性。牲畜呼吸碳排放总量与研究区固碳服务需求总量之间也没有显著的相关关系,但由于五寨、神池和静乐县3个县的火力发电厂碳排放量和供暖碳排放量均较小,且居民呼吸碳排放量小于牲畜呼吸碳排放量,因此五寨县、神池县和静乐县的固碳服务需求总量最显著影响因素是牲畜呼吸碳排放量,其次是居民呼吸碳排放量。

3.3 供需空间平衡关系

2000—2015年期间研究区内固碳服务需求总量持续快速增长,而供给总量则保持基本稳定,所以固碳服务供需盈余持续减少,但因供给量一直大于需求量,因此供需整体处于平衡状态。研究区对固碳服务供需平衡关系贡献较大的3个县分别为神池县、静乐县和五寨县,上述3个县固碳服务供给量基本稳定,同时需求变化幅度不显著,所以供需平

衡维持较好,供需盈余额较大。

研究区固碳服务供给总量与火力发电厂碳排放量、供暖碳排放量、居民呼吸碳排放量、牲畜呼吸碳排放量、农业碳排放量、需求总量和供需差都无显著的相关性,表明人类的生产和生活没有充分考虑生态系统固碳服务的供给能力。回归分析显示,固碳服务总需求与供需差的相关系数为-1.00,表明供需差主要由需求决定。火力发电厂碳排放量与固碳服务需求总量之间呈显著的线性正相关,表明随着火力发电厂碳排放量的增加,固碳服务需求总量有增加的趋势。由于火力发电厂碳排放量是影响需求最显著的因素,而供需差主要由需求决定,所以火力发电厂碳排放量显著影响固碳服务的供需差,进而影响供需平衡关系。回归分析表明:火力发电厂碳排放量与固碳服务供需差之间呈显著的线性负相关,因此随着火力发电厂碳排放量的增大,供需缺口将进一步加大。农业碳排放量与固碳服务需求总量无显著关联性,表明农业生产产生的碳排放量不是显著影响研究区固碳服务供需平衡关系的因素(表1,表3,表4)。牲畜呼吸碳排放量在五寨县、神池县和静乐县是固碳服务需求量主要影响因子,然而在研究区固碳服务供需平衡关系中不具有显著作用。综上所述,工业发展是影响研究区固碳服务供需平衡的最显著因子。

时间(年份)与固碳服务供给总量没有显著的相关性,这可能是因为研究区大力推行退耕还林还草工程等措施,使得林地的面积维持较稳定,水土流

表3 研究区固碳服务供需平衡关系影响因素相关系数矩阵

Table 3 Correlation matrix of influencing factors that affect the balance between supply and demand

	时间	供给	A	B	C	D	E	需求	供需差
时间		-0.419	0.998**	0.995**	0.960*	0.653	-0.406	0.995**	-0.994**
供给	-0.419	1	-0.424	-0.332	-0.599	-0.663	-0.035	-0.469	-0.480
A	0.998**	-0.424	1	0.990*	0.946	0.698	-0.467	0.999**	-0.998**
B	0.995**	-0.332	0.990*	1	0.941	0.589	-0.387	0.981*	-0.979*
C	0.960*	-0.599	0.946	0.941	1	0.608	-0.196	0.951*	-0.953*
D	0.653	-0.663	0.698	0.589	0.608	1	-0.764	0.729	-0.733
E	-0.406	-0.035	-0.467	-0.387	-0.196	-0.764	1	-0.473	0.471
需求	0.995**	-0.469	0.999**	0.981*	0.951*	0.729	-0.473	1	-1.000**
供需差	-0.994**	-0.480	-0.998**	-0.979*	-0.953*	-0.733	0.471	-1.000**	1

注:①A代表火力发电厂碳排放量,B代表供暖碳排放量,C代表居民呼吸碳排放量,D代表牲畜呼吸碳排放量,E代表农业碳排放量。②

**表示0.01水平上显著,*表示在0.05水平上显著。③时间是指2000、2005、2010和2015四个年份。

失得到有效治理,生态系统固碳服务的供给量稳定性较好,不随着时间而明显变动。时间与固碳服务需求总量呈正相关,与供需差呈显著负相关,表明:随着时间的推移,需求有进一步增加的趋势,而供需盈余会逐渐减少,供需平衡关系有变弱趋势(表4)。

2000—2015年河曲县和偏关县的固碳服务供需一直处于不平衡状态。其中,河曲县供需缺口问题比较突出。河曲县属于典型的黄土丘陵沟壑区,水土流失严重,森林覆盖率较低,虽然国家大力推行退耕还林还草和移民并村等措施,但是由于管护问题,经济林成活率低,长势普遍较差^[44],故其固碳服务供给能力也较低。由于火力发电厂碳排放量

较大,固碳服务供给量小于火力发电厂碳排放量,同时牲畜呼吸碳排放量、居民呼吸碳排放量和供暖产生的碳排放量稳定增加,使得供需缺口持续增加。偏关县林地和草地合占全县总面积的21.31%,境内丘陵起伏,沟壑纵横,受风沙和水土流失双重危害的土地面积占土地总面积的80.6%,强度以上侵蚀占水土流失总面积的80%以上,由于没有天然森林,乔木林都是人工林,以杨树为主^[45],因而其固碳服务供给量较低。自1999年退耕还林还草工程实施以来,林地和草地面积稳定增加,土壤侵蚀得到控制,强度以上侵蚀降至水土流失区域总面积的70%^[46],因此其固碳服务供给量较为稳定。固碳服务需求的增加主要是由火力发电厂碳排放量、供暖产生的碳排放量和牲畜呼吸碳排放量的增加引起的。朔城区2000年固碳服务供给量大于需求量,2005年、2010年和2015年均处于供不应求状况,且供需缺口持续增加(表5)。宁武县供需平衡在2000—2005年维持较好,2005—2010年逐渐变差,2015年供需失去平衡。

总体上,研究区固碳服务供需处于比较脆弱的平衡状态。需求总量随着时间快速增加,而供给量仅能保持基本稳定,使得供需盈余逐渐减少,平衡

表4 研究区时间、火力发电厂碳排放量与固碳服务供需差的回归方程

Table 4 Regression equations for time, carbon emissions of thermal power plants and the difference between carbon sequestration service supply and demand

	固碳服务供需差		
	<i>F</i>	<i>Sig.</i>	回归方程
火力发电厂碳排放量	455.41	0.002	$Y=-1.30X+1239.44$
时间	159.96	0.006	$Y=-22.67X+45708.61$

注:① 回归方程的常数项和一次项系数均通过了0.05水平上的*t*检验。② 时间是指2000、2005、2010和2015四个年份。

表5 研究区2000年、2005年、2010年和2015年固碳服务供需平衡表/万t

Table 5 Balance between supply and demand of carbon sequestration service in the study area, 2000, 2005, 2010 and 2015 (10 thousand t)

县区	2000年			2005年		
	供给	需求	供需差	供给	需求	供需差
朔城区	220.16	152.02	68.14	219.65	268.44	-48.79
河曲县	156.73	323.53	-166.8	156.21	334.64	-178.43
神池县	180.68	50.83	129.85	180.5	55.32	125.18
五寨县	178.9	57.35	121.55	177.82	62.8	115.02
宁武县	266.57	187.31	79.26	266.97	196.1	70.87
静乐县	251.75	66.32	185.43	251.55	59.28	192.27
偏关县	204.2	236.71	-32.51	204.22	244.55	-40.33
县区	2010			2015		
	供给	需求	供需差	供给	需求	供需差
朔城区	216.98	319.58	-102.6	216.62	335.1	-118.49
河曲县	156.15	319.86	-163.71	155.9	327.35	-171.45
神池县	180.6	56.46	124.14	185.72	75.89	109.83
五寨县	177.75	63.49	114.26	177.51	51.51	126
宁武县	266.97	262.85	4.12	266.31	297.88	-31.57
静乐县	251.55	59.5	192.05	251.48	71.52	179.96
偏关县	204.22	235.77	-31.55	204.17	258.34	-54.16

2019年3月

关系有逐年减弱的趋势。火力发电厂碳排放量迅猛增加是影响固碳服务需求总量最显著因素,也是供需盈余关系稳定性的最显著影响因素。此外,居民呼吸碳排放量、供暖碳排放量和牲畜呼吸碳排放量的增加,对供需平衡关系也产生了一定的影响,农业排放量对供需平衡的影响则相对较小。

3.4 服务流

3.4.1 服务流路径

2000年,研究区内固碳服务供给量小于需求量的县区主要为河曲县和偏关县。偏关县未被当地植被固定和土壤储存的碳,随大气运动,被输送到神池县和五寨县。由于偏关县未被固定的碳量为28.54万t,远小于神池县和五寨县固碳服务供给的盈余量,所以偏关县固碳需求缺口可能由神池县和五寨县来弥补,同时可能有一部分未被固定的碳随风运动到河曲县。由于河曲县固碳服务供给量小于需求量,所以从偏关县输送到河曲县的碳,与河曲县没有被当地固定的碳混合在一起,一部分可能被风输送到五寨县,被五寨县的植被和土壤所提供的固碳服务所消耗,另一部分可能被风输送到研究区以外。

2005年,研究区固碳服务供不应求的区域有朔城区、河曲县和偏关县。朔城区未被当地植被固定和土壤储存的碳,随风运动到神池县和宁武县。由于神池县和宁武县固碳服务的供给量大于需求量,其盈余量为198.23万t,远高于朔城区固碳服务需求量缺口,所以朔城区固碳服务需求量缺口被神池县和宁武县的植被和土壤所提供的固碳服务供给量平衡。偏关县未被当地植被固定和土壤储存的碳,一部分被风输送到了神池县和五寨县。由于偏关县固碳服务需求量缺口为39.40万t,远低于神池县消耗朔城区输送的碳量后剩余的固碳服务供给量,同时五寨县固碳服务供给也有盈余量,所以偏关县固碳服务需求缺口一部分可能被神池和五寨的固碳服务供给盈余量所平衡,另外一部分则可能被风输送到河曲县。河曲县固碳服务的供给量小于需求量,未被当地植被固定和土壤储存的碳,一部分被风输送到五寨县,被五寨县固碳服务供给赢余量所消耗,另一部分与偏关县输送来的碳一起,随北风流动到研究区外。

2010年,研究区固碳服务供不应求的区域有朔城区、河曲县和偏关县。朔城区未被本地植被固定和

土壤储存的碳,被风输送到神池县和宁武县。由于神池县和宁武县固碳服务供给量大于需求量,其盈余量为分别为124.25万t和7.23万t,大于朔城区固碳服务需求量缺口,所以朔城区固碳服务需求量缺口可被神池县和宁武县2个县的固碳服务供给盈余量所平衡。偏关县未被当地植被固定和土壤储存的碳,可分为以下2部分:①一部分被风输送到了神池和五寨县。由于偏关县固碳服务需求量缺口为28.59万t,小于神池县消耗朔城区输送的碳量后剩余的固碳服务供给量,同时五寨县固碳服务供给也有盈余量,因而偏关县固碳服务需求缺口一部分可能被神池县和五寨县固碳服务供给盈余量所平衡。②一部分可能随风运动到河曲县。由于河曲县的固碳服务供给量小于需求量,从偏关县输送到河曲县的碳与河曲县的未被当地植被固定和土壤储存的碳一起运动,主要有以下2种路径:一部分被风输送到五寨县,为五寨县生态系统固碳服务供给盈余量所平衡;另一部分被北风输送到研究区以外。

2015年,研究区固碳服务供不应求的区域有朔城区、宁武县、河曲县和偏关县。朔城区未被当地植被固定和土壤储存的碳,一部分被风输送到神池县和宁武县,一部分被风输送到研究区外。神池县固碳服务供给量大于需求量,其盈余量为112.29万t,略大于朔城区输送的碳量。朔城区固碳服务需求量缺口可被神池县固碳服务供给盈余量所消耗。偏关县未被当地植被固定和土壤储存的碳,可分为以下2部分:①一部分被风输送到神池县和五寨县。由于偏关县固碳服务需求量缺口为46.23万t,小于五寨县和神池县固碳服务供给盈余量,所以偏关县固碳服务需求缺口的一部分可能被神池县和五寨县固碳服务的供给盈余量填补。②一部分可能被风输送到河曲县。由于河曲县的固碳服务供给量小于需求量,从偏关县输送到河曲县的碳,与河曲县没有被当地植被固定和土壤储存的碳一起运动,主要有以下2种路径:一部分可能被输送到五寨县,被五寨县的植被和土壤提供的固碳服务所固定;另一部分可能被风输送到研究区以外。宁武县未被当地植被固定和土壤储存的碳量为31.57万t,一部分可能被风输送到静乐县,被静乐县植被和土壤提供的固碳服务所固定;另一部分可能被风输送到研究区以外(图6)。

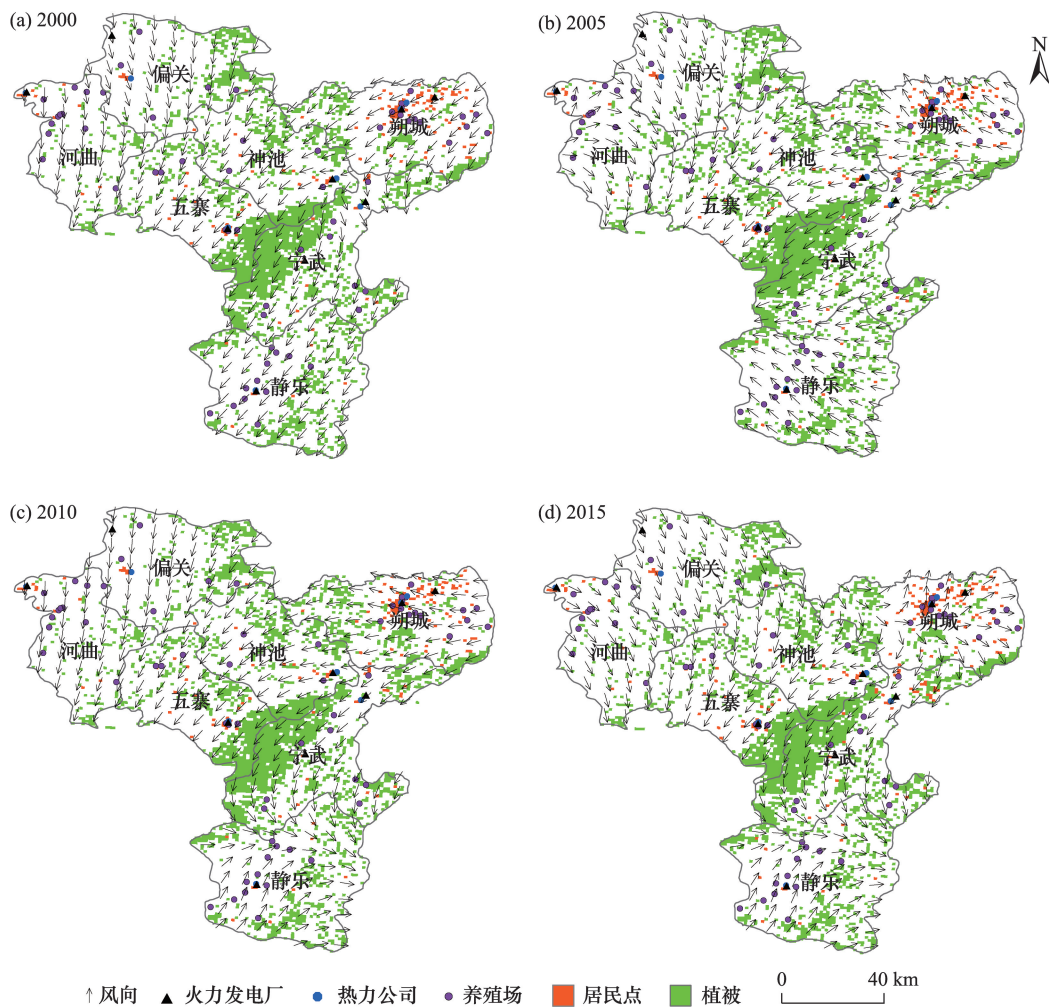


图6 研究区2000年、2005年、2010年和2015年主风向图

Figure 6 Prevailing wind directions in the study area, 2000, 2005, 2010 and 2015

3.4.2 服务流流量

2000—2015年,研究区朔城区、河曲县、宁武县和偏关县固碳服务流流量较大,神池县、五寨县和静乐县流量较小。偏关县固碳服务流流量基本稳定,而河曲县和五寨县服务流流量略有下降,其他各县服务流流量显著上升,其中服务流流量上升较快的是神池县和朔城区(表6)。

4 结论与讨论

4.1 结论

4.1.1 供给

研究区的固碳服务供给区在中部分布较广。2000—2015年固碳服务供给总量基本保持稳定,这不仅与实施退耕还林还草政策、林地面积维持稳

表6 研究区2000年、2005年、2010年和2015年固碳服务流流量/(t/km²)

Table 6 Flow rate of carbon sequestration service in the study area, 2000, 2005, 2010 and 2015 (t/km²)

县区	2000年	2005年	2010年	2015年
朔城区	848	1 225	1 210	1 208
河曲县	1 181	1 177	1 177	1 175
神池县	345	376	384	516
五寨县	416	455	460	374
宁武县	942	987	1 322	1 340
静乐县	322	288	289	348
偏关县	1 214	1 214	1 214	1 214

定、水土流失治理成效显著有关,而且也与土地利用类型变化速率较低有关。固碳服务供给量高值分布在宁武县,低值分布在河曲县。

2019年3月

4.1.2 需求

固碳服务的需求区为居民区、牲畜养殖场、农田和工厂区。研究区固碳服务供需关系处于平衡状态,然而由于需求量快速增加,供给量保持稳定,使得供需盈余逐渐减少,供需平衡关系有减弱趋势。火力发电量的迅猛增长是影响需求的最显著因素,也是供需差加大的最主要原因。此外,居民呼吸碳排放量、供暖碳排放量和牲畜呼吸碳排放量的增加,对供需平衡产生也产生一定影响,而农业排放量对供需关系的影响相对较小。

4.1.3 服务流

研究区中,朔城区、河曲县、宁武县和偏关县固碳服务流流量较大,神池县、五寨县和静乐县流量较小。2000—2015年,偏关县固碳服务流流量基本保持稳定,河曲县和五寨县流量下降,其他各县显著上升,上升较快的区域为神池县和朔城区。

4.2 讨论

4.2.1 供给

与前人研究成果^[47-49]比较,发现本文的研究结果偏低。由于碳密度值与气候类型和植被覆盖类型等因素有关。文献^[48-50]研究区多为气候湿润、降水较丰富和植被覆盖度较高的地区,其碳密度值较高;而本文的研究区属于温带大陆性气候,降雨量和植被覆盖度均比上述研究区低,碳密度值也较低。此外,缺少收获木材的数据,且死亡有机碳库只估算了枯枝落叶含有的碳,可能也是导致模拟结果偏低的原因。

4.2.2 需求

供给类服务需求可用研究区实际消耗的能源、水和食物的数量表示^[50];调节服务可通过缺少服务后遭受损失的区域来识别受益人的位置,然后以满足人类所需环境状况的调节量来确定需求总量^[51,52]。由于目前有关生态系统服务需求的定量分析研究较少,具体指标选择处于探讨阶段。邓妹凤^[53]用环境舒适度表示气候调节服务的需求,环境舒适度指标低于国家环境质量标准,表示调节气候服务的需求没有被满足。年蔚等^[11]根据能源消耗总量和标准煤与碳之间的比例系数来量化固碳服务需求。李婷等^[15]基于人均碳排放数据和人口密度分布计算区域碳源的空间分布。Bagstad等^[13]使用人均碳排放

量、人口密度、火灾损失的碳量、城市化过程中土地利用类型转化过程释放的碳和燃料燃烧释放的碳计算碳需求量。农业氮肥的使用非常普遍,而且 N_2O 导致大气增温的速率是 CO_2 的298倍^[10],所以在需求量化中应予考虑。甲烷等其他温室气体由于数据的可获得性问题,未包含在内。

4.2.3 服务流

目前关于碳的空间流动尚没有成熟的理论和方法,实质性研究成果较少^[9]。Serna-Chavez等^[54]提出一个全球尺度的多种生态系统服务流分析框架,分析了固碳服务的供给热点(Provisioning Hotspots, P)、受益区(Benefiting Areas, B)、流动区(Flow Area, F)及其相互关系,认为与B、P不重合的区域都是流动区,固碳服务的空间流动可能具有空间依赖性。李婷等^[15]以碳源汇流动比率的等值线为基础,借助“等压梯度力”的原理绘制了碳源汇空间流动示意图。Costanza^[55]认为由于气候调节服务影响区域广泛,服务流不随与供给区的距离远近而变化,所以气候调节服务流属于“全球非临近”类型;而Fisher等^[8]更关注生态系统服务的传播方向,将不具有特定方向的“全球非临近”和“局部邻近”合并为“全向”服务流;也有研究将气候调节服务归为原位服务流^[56]。赵文武等^[57]认为碳汇等调节服务往往是在某一位置发生,但可从不同方向传输到使用该服务的区域,属于全向服务流。参考Costanza^[55]、Fisher等^[8]和Serna-Chavez等^[54]的研究,马琳等^[19]认为气候调节服务流动无方向性,以水气为媒介,受周边因素影响较小,媒介可由供给区域向四周传递,处于供给区域之外的一定距离内均可利用服务,同时由于水气具有强流动性,所以其影响范围为全球尺度。高吉喜等^[58]提出供—受生态域理论模型,认为人类活动密集区域是接受固碳服务的受体,也就是受益区,植被状况良好的陆地生态系统是固碳服务的供体,也就是供给区;联系这两者之间的 O_2 和 CO_2 是生态介质,也就是服务流媒介。这些研究在碳源汇的空间流动方面进行了有益的尝试,但并没有具体给出服务流流动路径、流量大小和流动过程等。由于生态系统服务从供给区到受益区流动具有复杂性和动态性,量化流速和流量以及绘制明确具体的服务流传输路径图是未来研究的难点和重点。

参考文献(References):

- [1] MA(Millennium Ecosystem Assessment). Ecosystems and Human Well-Being Synthesis[M]. Washington DC: Island Press, 2005.
- [2] Tubiello F N, Salvatore M, Golec R D C, *et al.* Agriculture, forestry and other land use emissions by sources and removals by sinks: 1990–2011 analysis[J]. *Acta Oto-laryngologica*, 2014, 4(7): 375–376.
- [3] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 等. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J]. *地理学报*, 2017, 72(11): 2064–2078. [Wang P T, Zhang L W, Li Y J, *et al.* Spatio-temporal characteristics of the trade-off and synergy relationships among multiple ecosystem services in the Upper Reaches of Hanjiang River Basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11): 2064–2078.]
- [4] 刘海, 武靖, 陈晓玲. 丹江口水源区生态系统服务时空变化及权衡协同关系研究[J]. *生态学报*, 2018, 38(13): 1–16. [Liu H, Wu J, Chen X L. Study on spatial-temporal change and trade-off/synergy relationships of ecosystem services in the Danjiangkou water source area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(13): 1–16.]
- [5] 李建国, 王欢, 王净, 等. 基于线性拟合的城市化过程对陆地生态系统生产力的影响: 以江苏省为例[J]. *资源科学*, 2018, 40(1): 32–43. [Li J G, Wang H, Wang J, *et al.* Impact of urbanization on terrestrial ecosystem production using Linear Modeling for Jiangsu[J]. *Resources Science*, 2018, 40(1): 32–43.]
- [6] 尚二萍, 许尔琪. 黔桂喀斯特山地主要生态系统服务时空变化[J]. *资源科学*, 2017, 39(10): 2000–2015. [Shang E P, Xu E Q. Temporal and spatial variation of main ecosystem services in Guizhou and Guangxi Karst Mountainous region[J]. *Resources Science*, 2017, 39(10): 2000–2015.]
- [7] 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. [Li S C, Zhang C Y, Liu J L, *et al.* The tradeoffs and synergies of ecosystem services: Research progress, development trend, and themes of geography[J]. *Geographical Research*, 2013, 32(8): 1379–1390.]
- [8] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making[J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 643–653.
- [9] 肖玉, 谢高地, 鲁春霞, 等. 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. [Xiao Y, Xie G D, Lu C X, *et al.* Involvement of ecosystem service flows in human wellbeing based on the relationship between supply and demand[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(10): 3096–3102.]
- [10] Sahle M, Saito O, Fürst C, *et al.* Quantification and mapping of the supply of and demand for carbon storage and sequestration service in woody biomass and soil to mitigate climate change in the socio-ecological environment[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 624: 324–354.
- [11] 年蔚, 陈艳梅, 高吉喜, 等. 京津冀固碳释氧生态服务供-受关系分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(9): 783–791. [Nian W, Chen Y M, Gao J X, *et al.* Relationship between provision and reception of ecological service of carbon fixation and oxygen release Beijing–Tianjin–Hebei Region [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(9): 783–791.]
- [12] Zank B, Bagstad K J, Voigt B, *et al.* Modeling the effects of urban expansion on natural capital stocks and ecosystem service flows: A case study in the Puget Sound, Washington, USA[J]. *Landscape & Urban Planning*, 2016, 149: 31–42.
- [13] Bagstad K J, Villa F, Batker D, *et al.* From theoretical to actual ecosystem services: Mapping beneficiaries and spatial flows in ecosystem service assessments[J]. *Ecology & Society*, 2014, 19(2): 706–708.
- [14] Schröter M, Barton D N, Remme R P, *et al.* Accounting for capacity and flow of ecosystem services: A conceptual model and a case study for Telemark, Norway[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 36(1): 539–551.
- [15] 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. [Li T, Li J, Wang Y Z, *et al.* The spatial flow and pattern optimization of carbon sequestration ecosystem service in Guanzhong–Tianshui economical region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(20): 3953–3969.]
- [16] 刘慧敏, 刘绿怡, 任嘉衍, 等. 生态系统服务流量化研究进展[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2723–2730. [Liu H M, Liu L Y, Ren J Y, *et al.* Progress of quantitative analysis of ecosystem service flow[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8): 2723–2730.]
- [17] Villa F, Bagstad K, Voigt B, *et al.* Artificial Intelligence for Ecosystem Services[EB/OL]. (2016–06–07)[2018–09–10]. http://aries.integratedmodelling.org/?page_id=632.
- [18] Bagstad K J, Johnson G W, Voigt B, *et al.* Spatial dynamics of ecosystem service flows: A comprehensive approach to quantifying actual services[J]. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 117–125.
- [19] 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. [Ma L, Liu H, Peng J, *et al.* A review of ecosystem services supply and demand[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(7): 1277–1289.]
- [20] 孟杰. 万家寨引黄工程南干线供水区水资源实时监控与调度系统研究[J]. *山西水利水电*, 2010, 41(7): 1–5. [Meng J. Study on water resources real time monitoring and dispatching system for water supply area of south main line of Wanjiashai Yellow River Diversion Project[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2010, 41(7): 1–5.]
- [21] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. *中国科学*:

2019年3月

- 地球科学, 2003, 33(1): 72–80. [Liu K R, Wang S Q, Cao M K. Carbon storage of vegetation and soil in China[J]. *Science in China*, 2003, 33(1): 72–80.]
- [22] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. 土壤学报, 2004, 41(5): 687–699. [Xie X L, Sun B, Zhou H Z, *et al.* Soil carbon stocks and their influencing factors under native vegetations in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5): 687–699.]
- [23] 黄玫, 季劲钧, 曹明奎, 等. 中国区域植被地上与地下生物量模拟[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4156–4163. [Huang M, Ji J J, Cao M K, *et al.* Modeling study of vegetation shoot and root biomass in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4156–4163.]
- [24] Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, *et al.* A global analysis of root distributions for terrestrial biomes[J]. *Oecologia*, 1996, 108(3): 389–411.
- [25] 中国科学院地理与资源研究所, 中国科学院资源环境科学数据中心, 资源环境数据云平台. 中国土地利用现状遥感监测数据[EB/OL]. (2017–04–20)[2018–09–10]. <http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=99>. [Institute of Geography and Resources, Chinese Academy of Sciences, Resource and Environment Science Data Center of Chinese Academy of Sciences, Resource and Environment Data Cloud Platform. Remote Sensing Monitoring Data of Land Use Status in China [EB/OL]. (2017–04–20)[2018–09–10]. <http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=99>.]
- [26] Shen Q, Chen Q, Tang B S, *et al.* A system dynamics model for the sustainable land use planning and development[J]. *Habitat International*, 2009, 33(1): 15–25.
- [27] Zhao C, Sander H A. Quantifying and mapping the supply of and demand for carbon storage and sequestration service from urban trees[J]. *Plos One*, 2015, 10(8): e0136392.
- [28] Myhre G, Shindell D, Bréon F M. *et al.* Anthropogenic and Radiative Forcing [A]. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [29] 郭利杰, 顾宇桂. 发电装机容量与发电量关系研究[J]. 科技和产业, 2012, 12(12): 71–73. [Guo L J, Gu Y G. The relation between power generation capacity and power generation[J]. *Science Technology and Industry*, 2012, 12(12): 71–73.]
- [30] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国国家标准综合能耗计算通则(GB/T 2589–2008)[EB/OL].(2008–02–03)[2018–09–10]. <http://www.doc88.com/p-9857272251623.html>. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Management Committee. General Principles for Calculation of Total Production Energy Consumption (GB/T 2589–2008) [EB/OL].(2008–02–03)[2018–09–10]. <http://www.doc88.com/p-9857272251623.html>.]
- [31] 中国发展改革委员会应对气候变化司. 省级温室气体清单编制指南(试行)[EB/OL].(2011–05)[2018–09–10]. <https://wenku.baidu.com/view/7ae95325f111f18583d05a67.html>. [Climate Change Division of National Development and Reform Commission. Guidelines for the Preparation of Provincial Greenhouse Gas Inventories (Proposed Regulations) [EB/OL].(2011–05)[2018–09–10]. <https://wenku.baidu.com/view/7ae95325f111f18583d05a67.html>.]
- [32] Villamagna A M, Angermeier P L, Bennett E M. Capacity, pressure, demand, and flow: A conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery[J]. *Ecological Complexity*, 2013, 15(5): 114–121
- [33] He C, Zhang D, Huang Q, *et al.* Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD–urban and InVEST models[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 75(C): 44–58.
- [34] Wu H, Guo Z, Peng C. Distribution and storage of soil organic carbon in China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(2): 1048–1058.
- [35] Ni J. Carbon storage in terrestrial ecosystems of China: Estimates at different spatial resolutions and their responses to climate change[J]. *Climatic Change*, 2001, 49(3): 339–358.
- [36] 国家自然科学基金委, 国家地球系统科学数据平台, 寒区旱区科学数据平台. 中国 1: 400 万植被图[EB/OL]. (2017–04–20)[2018–09–10]. <http://westdc.westgis.ac.cn/data/6d9d92f7-854d-4314-bf0f-e24ec02527e2>. [National Natural Science Foundation of China, National Earth System Science Data Platform, Scientific Data Platform for Cold and Dry Areas. The Vegetation Map of China(1: 4000000) [EB/OL]. (2017–04–20)[2018–09–10]. <http://westdc.westgis.ac.cn/data/6d9d92f7-854d-4314-bf0f-e24ec02527e2>.]
- [37] 国家自然科学基金委, 国家地球系统科学数据平台, 寒区旱区科学数据平台. 中国土壤特征数据集[EB/OL]. (2017–04–20)[2018–09–10]. <http://westdc.westgis.ac.cn/data/f60cda94-cef5-4859-b2ae-0b8148ceae00>. [national Natural Science Foundation of China, National Earth System Science Data Platform, Scientific Data Platform for Cold and Dry Areas. A China Soil Characteristics Dataset [EB/OL]. (2017–04–20)[2018–09–10]. <http://westdc.westgis.ac.cn/data/f60cda94-cef5-4859-b2ae-0b8148ceae00>.]
- [38] 原玉英, 刘社教. 兴建万家寨引黄工程南干备用水源的必要性和可行性[J]. 山西水利, 2005, 21(5): 65–66. [Yuan Y Y, Liu S J. The necessity and feasibility of building reserve water resource of south main line of Wanjiashai Yellow River Diversion Project[J]. *Shanxi Water Resources*, 2005, 21(5): 65–66.]
- [39] 马克平, 黄建辉, 于顺利. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II 丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. 生态学报, 1995, 15(3): 268–277. [Ma K P, Huang J H, Yu S L. Plant community di-

- iversity in Dongling mountain, Beijing, China: II species richness, evenness and species diversity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(3): 268–277.]
- [40] 贾燕春, 张峰. 万家寨引黄工程沿线植物群落物种多样性研究[J]. 武汉植物学研究, 2008, 26(3): 282–287. [Jia Y C, Zhang F. Species diversity of plant community alongside Wanjiashai Yellow River Diversion Project, Shanxi[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2008, 26(3): 282–287.]
- [41] 贾宁凤, 段建南, 李旭霖, 等. 荒漠化防治综合效益的多维灰色预测评估研究: 以晋西北河曲县为例[J]. 中国沙漠, 2005, 25(5): 711–715. [Jia N F, Duan J N, Li X L, et al. Multidimensional gray forecasting for composite effect of combating desertification: Taking Hequ County in northwest of Shanxi Province as example[J]. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(5): 711–715.]
- [42] 刘晓娜, 封志明, 姜鲁光, 等. 西双版纳土地利用/土地覆被变化时空格局分析[J]. 资源科学, 2014, 36(2): 233–244. [Liu X N, Feng Z M, Jiang L G, et al. Spatial-temporal pattern analysis of land use and land cover change in Xishuangbanna[J]. *Resources Science*, 2014, 36(2): 233–244.]
- [43] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展, 1999, 18(1): 81–87. [Wang X L, Bao Y H. Study on the methods of land use dynamic change research[J]. *Progress in Geography*, 1999, 18(1): 81–87.]
- [44] 何萍. 河曲县退耕还林工程存在的问题及对策[J]. 山西林业科技, 2016, 4(1): 59–60. [He P. Study on problems and countermeasures in Grain for Green Project in Hequ County[J]. *Shanxi Forestry Science and Technology*, 2016, 4(1): 59–60.]
- [45] 庞琪伟. 晋西北黄土丘陵区柠条能源林适生立地、合理密度及生物量研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009. [Pang Q W. A Study on Suitable Site, Rational Density and Biomass of the Energy Plantations of Caragana Microphylla Lam in Loess Hilly Region of the Northwest Shanxi Province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009.]
- [46] 张变华. 偏关县退耕还林(草)工程与区域经济发展的关联分析[D]. 太原: 山西大学, 2011. [Zhang B H. Relational Analysis between Returning Farmland to Forest (Grass) Engineering and Local Economic Development in Pianguan County[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2011.]
- [47] 张影, 谢余初, 齐姗姗, 等. 基于InVEST模型的甘肃白龙江流域生态系统碳储量及空间格局特征[J]. 资源科学, 2016, 38(8): 1585–1593. [Zhang Y, Xie Y C, Qi S S, et al. Carbon storage and spatial distribution characteristics in the Bailongjiang Watershed in Gansu based on InVEST model[J]. *Resources Science*, 2016, 38(8): 1585–1593.]
- [48] 李银, 陈国科, 林敦梅, 等. 浙江省森林生态系统碳储量及其分布特征[J]. 植物生态学报, 2016, 40(4): 354–363. [Li Y, Chen G K, Lin D M, et al. Carbon storage and its distribution of forest ecosystems in Zhejiang Province, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(4): 354–363.]
- [49] 朱华娟. 鄱阳湖滨湖区土地利用预测及固碳生态系统服务价值评估[D]. 南昌: 南昌大学, 2013. [Zhu H J. Research on Land Use Forecast and Valuation of Carbon Sequestration Ecosystem Service in Coastal Zone of Poyang Lake[D]. Nanchang: Nanchang University, 2013.]
- [50] 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. [Yang L, Zhen L, Pan Y, et al. Ecosystem services supply and consumption: A case in Yellow River watershed, China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(3): 131–138.]
- [51] Stürck J, Poortinga A, Verburg P H. Mapping ecosystem services: The supply and demand of flood regulation services in Europe[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 38(3): 198–211.
- [52] Baró F, Palomo I, Zulian G, et al. Mapping ecosystem service capacity, flow and demand for landscape and urban planning: A case study in the Barcelona metropolitan region[J]. *Land Use Policy*, 2016, 57: 405–417.
- [53] 邓妹凤. 榆林市生态系统服务供需平衡研究[D]. 西安: 西北大学, 2016. [Deng M F. A Study for Ecosystem Service Balance between Supply and Demand in Yulin City[D]. Xi'an: Northwest University, 2016.]
- [54] Serna-Chavez H M, Schulp C J E, Van Bodegom P M, et al. A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 39: 24–33.
- [55] Costanza R. Ecosystem services: Multiple classification systems are needed[J]. *Biological Conservation*, 2008, 141(2): 350–352.
- [56] Vrebas D, Staes J, Vandenbroucke T, et al. Mapping ecosystem service flows with land covers coring maps for data-scarce regions[J]. *Ecosystem Services*, 2015, 13: 28–40.
- [57] 赵文武, 刘月, 冯强, 等. 人地系统耦合框架下的生态系统服务[J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 139–151. [Zhao W W, Liu Y, Feng Q, et al. Ecosystem services for coupled human and environment systems[J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(1): 139–151.]
- [58] 高吉喜. 区域生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2015. [Gao J X. Regional Ecology [M]. Beijing: Science Press, 2015.]

Quantitative assessment of carbon sequestration service supply and demand and service flows:

A case study of the Yellow River Diversion Project South Line

YANG Liwen^{1,2}, DONG Liqing², ZHANG Liwei³, HE Bingyu⁴, ZHANG Yongqing²

(1. Shanxi Energy Institute, Jinzhong 030600, China;

2. College of Geographical Science, Shanxi Normal University, Linfen 041000, China;

3. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;

4. College of Resource and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: Ecosystem service flows establish connections between the supply and demand sides of ecosystem services across space and time. Understanding the transmission paths and flows of ecosystem services are conducive to the accurate assessment of ecosystem service values. Wanjiazhai Yellow River Diversion Project South Line is very important in terms of solving the water shortage problem in Taiyuan. Since a good environmental condition is essential for the sustainability of the project, quantitative research on the supply-demand balance and service flow of carbon sequestration service can provide an indicator for the environmental condition. Service Path Attribution Networks (SPANs) model is designed for the simulation and mapping of ecosystem service flows from the supply areas to the beneficiary areas. It has broad application prospects and was used in this study. To better evaluate the ecosystem carbon sequestration service of Yellow River Diversion Project South Line, based on the SPANs model, according to the prevailing wind path in study area, the carbon sequestration service flow was quantified and mapped. The results show that the supply of carbon sequestration service remained stable, whereas the demand increased dramatically, resulting in a gradual decrease in the surplus value of supply. Therefore, the balance between the supply and demand of the service was also decreased. The stability of carbon sequestration service supply was mainly due to the small land use change rates. The total demand of carbon sequestration service and the difference between supply and demand were primarily impacted by the continuous increase in carbon emissions of thermal power plants in the area. This study revealed the change pattern and influencing factors of the balance between the supply and demand of carbon sequestration service and provided data support for local ecological environment management. Meanwhile, it can also serve as a case study of using SPANs model to analyze the carbon sequestration service flow.

Key words: Service Path Attribution Networks; carbon sequestration service; balance between supply and demand; service flow; the Yellow River Diversion Project South Line