

DOI: 10.5846/stxb201202130187

周自翔, 李晶, 冯雪铭. 基于 GIS 的关中-天水经济区土地生态系统固碳释氧价值评价. 生态学报, 2013, 33(9): - .

Zhou Z X, Feng X M, Li J. The value of fixing carbon and releasing oxygen in the Guanzhong-Tianshui economic region using GIS. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(9): - .

基于 GIS 的关中-天水经济区土地 生态系统固碳释氧价值评价

周自翔, 李晶*, 冯雪铭

(陕西师范大学旅游与环境学院, 西安 710062)

摘要: 气体调节服务功能是生态服务功能的重要的一部分, 生态系统的固碳释氧功能, 对于人类社会和整个动物界以及全球气候平衡, 都具有重要意义。本文采用光合作用方程式, 利用遥感估算模型, 基于植被 NPP (第一性生产力) 物质质量测算结果, 测算关中-天水经济区绿色植物固碳释氧物质质量, 以此为基础, 分别采用造林成本法和工业制氧法测算其价值量, 探讨关天经济区生态系统固碳释氧价值的时间变化、空间分布。结果表明: 1) 1998—2007 年关天水经济区年固定 CO₂ 的价值量为 226.35 亿元/a。十年间 2005 年固定 CO₂ 的价值量最高, 为 301.73 亿元/a, 2002 年最低, 为 159.06 亿元/a。释放 O₂ 价值量取两种测评方法的平均值, 年平均价值量为 240.45 亿元/a, 比固定 CO₂ 的年均值多 14.1 亿元/a。2) 从各土地利用类型来看, 1998 年和 2007 年平均固碳释氧价值排序为: 林地 > 草地 > 耕地 > 其他类型。耕地向林地、草地转变时, 平均固碳释氧价值分别增加了 1614.29 元/(hm² · a)、1960.67 元/(hm² · a), 林地、草地向耕地转变时平均固碳释氧价值分别减少了 1081.37 元/(hm² · a)、1706.60 元/(hm² · a)。3) 从空间分布上来看, 南部各县的单位面积固定 CO₂ 和释放 O₂ 价值普遍高于北部各县, 总体上分布沿南部向北部逐渐降低。

关键词: NPP; 土地生态系统; 固碳释氧价值; 关中-天水经济区

The value of fixing carbon and releasing oxygen in the Guanzhong-Tianshui economic region using GIS

ZHOU Zixiang, FENG Xueming, LI Jing

College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, Shaanxi, China

Abstract: Quantitatively evaluating the functions of CO₂ fixation and O₂ production is important in the study of ecological systems. This article attempts to measure and evaluate the rate of carbon fixation and oxygen release in terrestrial ecological systems using remote sensing, to provide baseline data for the regional environment. Changing land use and land cover types influence vegetation composition and health, so understanding the effects of these changes on carbon fixation and oxygen production provides an important tool for monitoring ecosystem responses to environmental change. Solar radiation is the primary source for physical and biological processes in the atmosphere and on the surface of the earth. This is the only energy source used by green plants during photosynthesis. Green plants produce all organic assimilates through photosynthesis. Net plant productivity (NPP) is the total amount of organic matter accumulated by vegetation per unit area and time, and equals the difference between the carbon absorbed by photosynthesis and the carbon released by autotrophic respiration. NPP reflects not only the productivity of a plant community in its natural environment, but also its ability to sequester carbon. The balance between carbon fixation and oxygen production plays a key role in global biogeochemical

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41001388, 41071057, 40901131)

收稿日期: 200-00-00; **修订日期:** 200-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lijing@snnu.edu.cn

carbon cycles. So, carbon flows through an ecosystem are an important determinant of the ecosystem's ability to act as a carbon sink. Using remote-sensing images and precipitation, temperature, and total solar radiation data from 1998 to 2007, and a light utilization efficiency model, we studied the effects of changes in these parameters and land use and cover types on the ability of plants to fix carbon and produce oxygen in the Guanzhong-Tianshui economic region. The results show: 1) the economic value of carbon fixation is 22.635 billion yuan $\cdot a^{-1}$ in the Guanzhong-Tianshui economic region. Over the past ten years, the highest value of carbon fixation was in 2005 at 30.173 billion yuan $\cdot a^{-1}$; the minimum was 15.906 billion yuan $\cdot a^{-1}$ in 2002. By taking an average of the two measuring methods the value of oxygen released, the average value is 24.045 billion yuan $\cdot a^{-1}$, more than 1.41 billion yuan $\cdot a^{-1}$ higher than the value of carbon fixation. 2) From the perspective of land use types in the Guanzhong-Tianshui economic region, forestland > grassland > cultivated land > other types. From 1998 to 2007, the value for farmland converted to forest land or grassland for average carbon fixation and oxygen production has increased by 1,614.29 yuan/hm² $\cdot a$ and 1,960.67 yuan/hm² $\cdot a$, respectively. Forest land and meadow changed to cultivated land has had the average value for carbon fixation and oxygen production reduced to 1,081.37 yuan/hm² $\cdot a$ and 1706.60 yuan/hm² $\cdot a$, respectively. 3) From a spatial distribution perspective, unit area value of carbon fixation and oxygen production in the southern counties is higher than in the northern counties of the Guanzhong-Tianshui economic region with the value gradually declining from the south to north. By examining the values of carbon fixation and oxygen production based on the NDVI data in various climate scenarios, we were able to explore the influences of land use and cover changes on carbon fixation and oxygen production, as well as the effects of climate change. Carbon fixation and oxygen production in northern China's agriculture and animal husbandry region and the endangered central loess region—which has serious soil erosion and high evaporation rates is—declining in value. Therefore, study of this fragile ecological environment is relevant.

Key Words: carbon fixation; Guanzhong-Tianshui economic region; ecosystem NPP; oxygen production

生态系统服务一般指自然生态系统及其所属物种支撑和维持人类生存的条件和过程^[1]。有机质生产为人类的生存和生产提供最基本的物质资料,植被净第一性生产力(Net Primary Productivity, NPP),即绿色植物在单位面积、单位时间内所累积的有机物数量,能很好地来说明植物的生理生态过程,也是研究碳循环的重要指标^[2-4]。气体调节服务功能也是生态服务功能的重要的一部分。气体调节服务功能指的是生态系统对于 CO₂/O₂ 平衡, O₃ 防紫外线, SO₂ 水平方面的服务功能^[5]。本文只考虑生态系统的 CO₂/O₂ 平衡功能。绿色植物通过光合作用吸收空气中的 CO₂, 生成葡萄糖等有机物质并释放出 O₂, 绿色植物的这种功能对于维护大气中 CO₂/O₂ 的稳定有着重要作用^[6-8]。随着工业生产的发展, 排入大气的 CO₂ 越来越多, 而绿色植物在光合作用中能够固定大气中的 CO₂ 并释放出 O₂, 因此对缓解大气 CO₂ 浓度升高有重要作用^[9-10]。因此定量评价生态系统固定 CO₂ 和释放 O₂ 功能的价值, 对于人类合理生产生活行为具有重要意义。

国内外虽然对生态系统的服务功能分类不尽相同, 而且固碳释氧功能有多种名称或类别, 但实际的功能是一样的。Constanza^[11] 及 Daily^[12] 等在上世界上最先开展了对全球生物圈生态服务价值的估算。根据 Costanza 等^[11] 的估算, 森林生态系统气候调节(温室气体调节等)的平均价值是 141 $\cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 美元, 土壤形成(有机物积累等)的平均价值是 10 $\cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 美元, 原材料(木材等)的平均价值是 138 $\cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 美元。国内不少学者对区域植被净第一生产力和固碳释氧价值的总量进行了研究, 张宪洲^[13] 利用 Miami 模型、筑构模型、TM 模型, 分别估算了我国自然植被净第一性生产力。余新晓等^[14] 根据全国第 5 次资源清查资料(1994—1998 年)及 Costanza 等人的计算方法估算了我国森林生态系统固碳释氧服务功能的经济价值是 14399.23 亿元/a。马长欣等^[15] 估算了 1999—2003 年陕西省森林生态系统年固碳经济价值是 328.27 亿元, 年释氧经济价值为 732.35 亿元, 总价值 1060.62 亿元。陈莉等^[16] 应用 CITYGREEN 模型估算了深圳市 1990、1995、2000、2005 年绿地固碳释氧的生态服务价值分别为 44.69 亿元、45.49 亿元、44.71 亿元、40.78 亿元。

关中-天水经济区作为环北部湾经济区和继成渝经济区之后西部的第 3 个重点发展经济区,政治、经济和文化得到快速发展。本文以关中-天水经济区为研究区,利用 SPOT(NDVI)数据并采用模型估算第一性生产力(NPP)计算该区域生态系统服务的物质量,依据光合作用方程式,基于植被 NPP 测算结果,分别测算关中-天水经济区土地生态系统固碳释氧物质量、价值量,研究其时空变化情况,为土地资源可持续利用和经济社会可持续发展的顺利实施提供决策基础,对于保护和改善区域生态环境、深化人地关系研究,具有十分重要的意义。

1 数据源和研究方法

1.1 研究区概况

关中-天水经济区在行政单元上分为关中地区、陕南商洛部分区县和甘肃省天水市。地理坐标为 $104^{\circ}34'47''\text{E}$ — $110^{\circ}48'38''\text{E}$, $35^{\circ}51'17''\text{N}$ — $33^{\circ}21'38''\text{N}$ 总面积约 $8.01 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。关中包括西安、铜川、宝鸡、咸阳、渭南 5 个省辖地级市;陕南商洛地区,位于陕西省东南部,秦岭南麓,与鄂豫两省交界,辖商州、洛南、丹凤、山阳、商南、镇安、柞水 7 县(区);天水位于甘肃东南部,辖武山、甘谷、秦安、清水、张家川回族自治县五县和秦州、麦积两区(见图 1)。关中-天水经济区地处内陆,降水量偏少,属暖温带半湿润、半干旱气候。这里地势平坦,土壤肥沃,渠道纵横,自然条件优越,适宜人类生产、生活。关中-天水经济区是《国家西部大开发“十一五”规划》中提出的三大重点经济区之一,是深入推进西部大开发的一个重大措施,对于贯彻落实科学发展观,推动甘陕两省乃至整个西北地区的长远发展,都具有重大的战略意义。

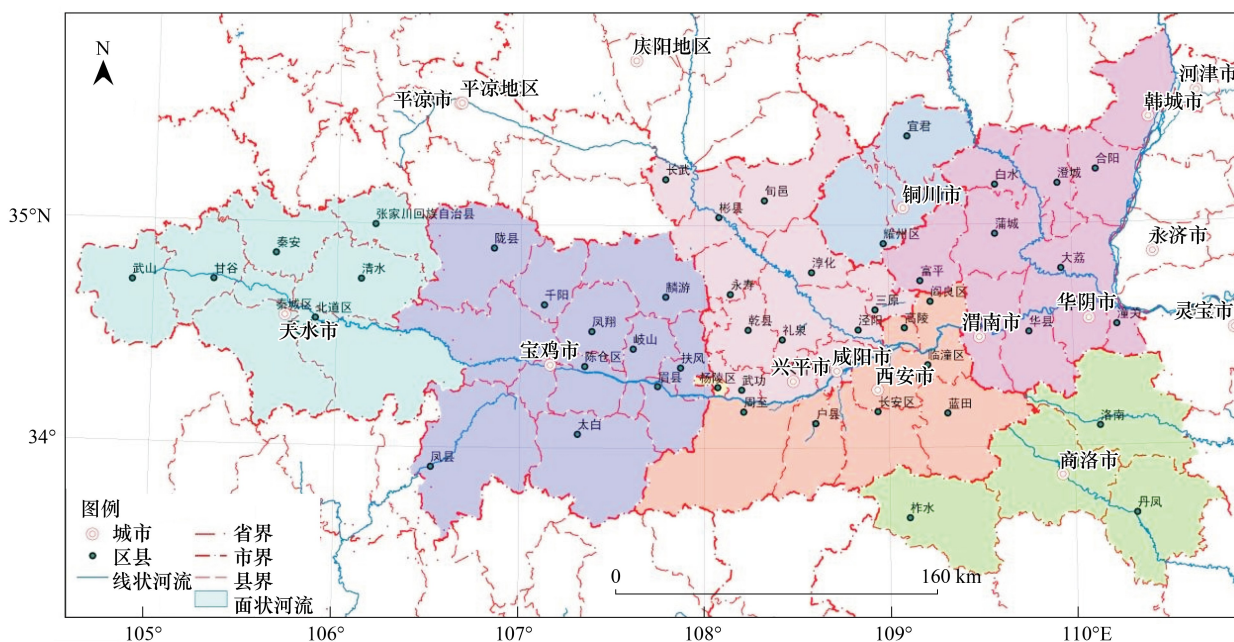


图 1 关中-天水经济区行政区划图

Fig.1 Administrative Division of the Guanzhong-Tianshui Economic zone

1.2 数据来源和方法

本文主要基础数据包括 1998 年和 2007 年的美国陆地卫星 TM 影像,分辨率为 30 m,1998—2007 年 10 年的 SPOT(NDVI)数据,分辨率为 1000 m。本文采用辅助数据为关中-天水经济区的行政区划、土壤植被分布图、自然地理基础资料和野外样点调查资料,数字高程数据。用 ArcGIS9.3 作为数据处理分析平台,参照关中-天水经济区土地利用图,在 ERDAS 环境下,将 TM 遥感影像进行拼接、辐射校正、裁剪和监督分类,根据研究区域范围相对较大,地形不很复杂的特点,建立了关天地区六大类土地景观类型,分为耕地、林地、草地、水体、建筑用地和未利用地。

1.2.1 第一性生产力 NPP 物质量计算

第一性生产力(NPP),是指绿色植物在单位面积、单位时间内所累积的有机物数量,它反映了植被类型在一定环境条件下的生产能力。目前,NPP 模型分为三类,即气候生产力模型、生理生态过程模型和遥感模型(光能利用率模型)^[2,17-18],其中植被 NPP 估算的主要发展方向之一是光能利用率模型。NPP 是陆地地表碳循环过程的重要组成部分,能够反应出陆地生态系统的质量状况,因为在区域或全球尺度上,人们无法直接和全面测量 NPP,利用光能利用率模型估算 NPP 成为一种重要的研究方法。本文在分析对比各类 NPP 评测模型的基础上,选择基于遥感数据的光能利用率模型对关中-天水经济区 10 个年份 NPP 空间格局进行构建,并和国内其它研究以及实测数据进行比较,使得结果更加可靠。光能利用率模型中植被 NPP 可以由植被吸收的光合有效辐射($APAR$)和实际光能利用率(ε)两个因子的积表示,具体模型如下:

$$NPP(x,t) = APAR(x,t) \times \varepsilon(x,t) \quad (1)$$

式中, $APAR(x,t)$ 表示像元 x 在 t 月份吸收的光合有效辐射(MJ/m^2); $\varepsilon(x,t)$ 表示像元 x 在 t 月份的实际光能利用率(gC/MJ)。

$$APAR(x,t) = SOL(x,t) \times FPAR(x,t) \times 0.5 \quad (2)$$

$$FPAR(x,t) = (FPAR(x,t)_{NDVI} + FPAR(x,t)_{SR}) / 2$$

$$FPAR(x,t)_{NDVI} = \frac{(NDVI(x,t) - NDVI_{i,min}) \times (FPAR_{max} - FPAR_{min})}{(NDVI_{i,max} - NDVI_{i,min})} + FPAR_{min}$$

$$FPAR(x,t)_{SR} = \frac{(SR(x,t) - SR_{i,min}) \times (FPAR_{max} - FPAR_{min})}{(SR_{i,max} - SR_{i,min})} + FPAR_{min}$$

$$SR(x,t) = \frac{(1 + NDVI(x,t))}{(1 - NDVI(x,t))}$$

式中, $SOL(x,t)$ 表示 t 月份在像元 x 处的太阳总辐射(MJ/m^2); $FPAR(x,t)$ 为植被层对入射光合有效辐射的吸收比例;常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射(波长为 0.38—0.71 μm) 占太阳总辐射的比例; $FPAR(x,t)_{NDVI}$ 和 $FPAR(x,t)_{SR}$ 分别表示由归一化植被指数($NDVI$)和比值植被指数(SR)计算所得的植被层对入射光合有效辐射的吸收比例; $FPAR(x,t)_{max}$ 和 $FPAR(x,t)_{min}$ 的取值与植被类型无关,分别为 0.95 和 0.001; $NDVI_{i,min}$ 和 $NDVI_{i,max}$ 分别为第 i 种植被类型的 $NDVI$ 最小值和最大值; $SR_{i,max}$ 和 $SR_{i,min}$ 和分别为第 i 种植被类型的比值植被指数最大值和最小值; $NDVI(x,t)$ 和 $SR(x,t)$ 分别表示 t 月份像元 x 处的归一化植被指数和比值植被指数。

Potter 等^[19]认为在理想条件下植被具有最大光能利用率,而在现实条件下的最大光能利用率主要受温度和水分的影 响,即:

$$\varepsilon(x,t) = T_{\varepsilon 1}(x,t) \times T_{\varepsilon 2}(x,t) \times w_{\varepsilon}(x,t) \times \varepsilon_{max} \quad (3)$$

式中, $T_{\varepsilon 1}(x,t)$ 、 $T_{\varepsilon 2}(x,t)$ 和 $w_{\varepsilon}(x,t)$ 分别表示低温、高温和水分的胁迫系数; ε_{max} 是理想条件下的最大光能利用率(gC/MJ);取值根据朱文泉等人^[20]的研究方法获得。

$$T_{\varepsilon 1}(x,t) = 0.8 + 0.02 \times T_{opt}(x) - 0.0005 \times [T_{opt}(x)]^2$$

$$T_{\varepsilon 2}(x,t) = \frac{1.184}{\{1 + \exp[0.2 \times (T_{opt}(x) - 10 - T(x,t))]\}} \times \frac{1}{\{1 + \exp[0.3 \times (-T_{opt}(x) - 10 + T(x,t))]\}}$$

$$W_{\varepsilon}(x,t) = 0.5 + 0.5 \times E(x,t) / E_p(x,t)$$

$$E(x,t) = \frac{\{P(x,t) \times R_n(x,t) \times [(P(x,t))^2 + (R_n(x,t))^2 + P(x,t) \times R_n(x,t)]\}}{\{[P(x,t) + R_n(x,t)] \times [(P(x,t))^2 + (R_n(x,t))^2]\}}$$

$$R_n(x,t) = [E_{po}(x,t) \times P(x,t)]^{0.5} \times \left\{ 0.369 + 0.589 \times \left[\frac{E_{po}(x,t)}{P(x,t)} \right]^{0.5} \right\}$$

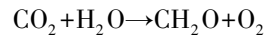
$$E_p(x,t) = [E(x,t) + E_{po}(x,t)] / 2$$

式中 $T_{opt}(x)$ 为研究区内 $NDVI$ 值达到最高时的月均气温。式中 $E(x,t)$ 为区域实际蒸散量, $P(x,t)$ 为

向元 x 在 t 月的降水量 (mm), $R_n(x, t)$ 为太阳净辐射量, $E_{po}(x, t)$ 为局地潜在蒸散量 (mm), 由 Thornthwaite 植被-气候关系模型的计算法求取^[18], 取月均值。

1.2.2 固碳释氧测评模型

在生态系统中, 有机物吸收空气中二氧化碳, 通过光合作用生成碳水化合物并释放出氧气, 其化学式为:



本次测算是以净第一性生产力为基础, 根据光合作用方程式, 每生产 1.00 kg 干物质能固定 1.63 kg CO₂, 释放 1.2 kg 的 O₂, 以此为基础, 从生态系统的净第一性生产力物质质量可以测算出生态系统固定 CO₂ 的物质质量及固定 O₂ 的物质质量。使用造林成本法可以估算出该区生态系统固定 CO₂ 的价值。本研究采用中国造林成本 260.90 元/t。使用工业制氧法估算其释放 O₂ 的价值。本研究采用中国造林成本 352.93 元/t 和工业制氧成本 0.4 元/kg^[8,21] 的平均值。

1.2.3 固碳释氧价值量变化趋势分析方法

为了研究固碳释氧价值量的空间整体趋向性, 本文引入最小二乘法, 计算每个象元在时间上的动态倾向。计算公式如下:

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n X_i T_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n T_i}{\sum_{i=1}^n T_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^n T_i \right)^2} \quad (4)$$

式中: B 为线性倾向值; x 为固碳释氧象元价值量; t 为年份; $n = 10$, 当 $B > 0$ 时, 随着时间 t 的增加, x 呈上升趋势; 当 $B < 0$, 随着时间 t 的增加, x 呈下降趋势。

2 结果分析

2.1 土地生态系统净第一性生产力测评

1998—2007 年关中-天水经济区的 NPP 单位面积物质质量基本围绕 7 t/(hm² · a) 上下波动, 以 5 年为一个周期。前 5 年波动比后 5 年波动大。前 5 年最大值为 1999 年的 8.40 t/(hm² · a), 最小值为 2002 年 4.68 t/(hm² · a), 极差为 3.82 t/(hm² · a); 后 5 年最大值是 2005 年的 8.88 t/(hm² · a), 最小值为 2003 年的 6.09 t/(hm² · a), 极差为 2.79 t/(hm² · a)。其中 2002 年 NPP 值处最低谷, 这是由于当年降雨量较少, 人类破坏较明显, 因此 NPP 值低。

由表 1 和图 2 可以看出 1998—2007 年十年间关中-天水经济区各土地利用类型的 NPP 的变化趋势, 由于无法获得每一年的土地利用数据, 本文只考虑了研究初期和研究末期的土地生态系统各土地利用类型的植被 NPP 物质质量以及固定和释放氧气的物质质量价值量变化。从均值看, 1998 年和 2007 年 NPP 排列顺序均为林地 > 草地 > 耕地 > 其它类型。由于在分类过程中, 将滩涂、湿地等归入未利用地, 因此, 1998 年未利用地的 NPP 平均值高于耕地的平均值。从总量来看, 1998 年各类型 NPP 排序为耕地 > 林地 > 草地 > 其它类型。2007 年 NPP 排列顺序为耕地 > 草地 > 林地 > 其它类型。这是由各类型面积决定的。

表 1 关中-天水经济区土地生态系统 NPP 变化表

Table 1 Net primary productivity of different landuse types in Guanzhong-Tianshui Economic Zone

土地类型 Landuse catagory	土地利用面积/hm ² Landuse area		NPP (t/a) The matter amount of NPP		NPP 平均值(t/hm ² · a) Average of The matter amount of NPP	
	1998 年	2007 年	1998 年	2007 年	1998 年	2007 年
耕地 Cropland	3554103.08	3531712.47	18068916	19791951	5.215	5.763
林地 Woodland	1954046.47	1860564.77	17369961	14519391	9.307	8.067
草地 Grassland	2283670.80	2340985.40	15548169	15321134	7.063	6.765
水域 Water body	81959.32	89584.35	387200.1	429649	4.945	5.008
建筑用地 Buildland	141119.77	159660.35	598156.3	719856.6	4.376	4.653
未利用地 Unuse land	13095.04	9799.51	74098.36	46695.66	5.369	4.670

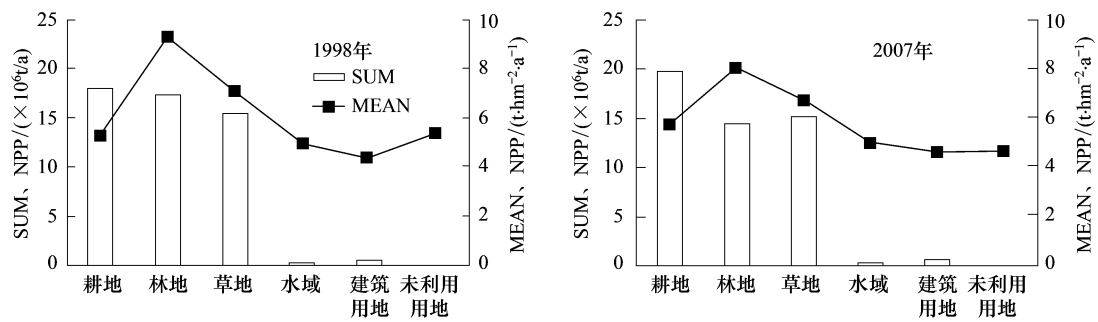


图2 关中-天水经济区土地生态系统 NPP 物质质量均值和总量变化

Fig. 2 The change of Net primary productivity release by landuse ecosystem in Guanzhong-Tianshui Economic Zone

2.2 土地生态系统固碳释氧物质质量测评

土地生态系统固碳释氧物质质量由 NPP 测算得到。见表2,关中-天水经济区 1998—2007 年固定 CO₂,2007 年比 1998 年减少了 0.2%。总体来看,10 年来,固定 CO₂ 动态变化持稳定状态。而各市每年变化情况也同整个区域变化趋势基本相同,总体来看,咸阳市增加了 1%,商洛市减少了 0.3%,天水市增加了 0.2%,宝鸡市减少了 1%,杨陵区增加了 1.9%,渭南市增加了 0.5%,西安市减少了 0.8%,铜川市减少了 0.1%。整个关中-天水经济区释放 O₂ 1998—2007 年呈减少趋势,各市变化情况与固定 CO₂ 基本相同。

表2 关中-天水经济区固定 CO₂ 和释放 O₂ 物质质量变化表 (t/a)

Table 2 The matter of CO₂ fixation and O₂ release in Guanzhong-Tianshui Economic Zone

市级 City name		1998	1999	2000	2001	2002
咸阳市	固定 CO ₂ CO ₂ fixation	8294092	12052921	10349245	7646167	6024350
	释放 O ₂ O ₂ release	6106080	8873316	7619076	5629080	4435104
商洛市	固定 CO ₂ CO ₂ fixation	13342772.5	17202857	15284706	10975018	9543699
	释放 O ₂ O ₂ release	9822900	12664680	11252544	8079768	7026036
天水市	固定 CO ₂ CO ₂ fixation	12954897.7	16397311	15017027	10576842	10624047
	释放 O ₂ O ₂ release	9537348	12071640	11055480	7786632	7821384
宝鸡市	固定 CO ₂ CO ₂ fixation	23661732	28528912	26156773	17569770	15577877
	释放 O ₂ O ₂ release	17419680	21002880	19256520	12934800	11468376
杨陵区	固定 CO ₂ CO ₂ fixation	78404.956	123278	109233	78029.4	58297.28
	释放 O ₂ O ₂ release	57721.44	90756.84	80416.92	57444.96	42918.24
渭南市	固定 CO ₂ CO ₂ fixation	10603850.9	15431357	13316921	9111211	8013553
	释放 O ₂ O ₂ release	7806516	11360508	9803868	6707640	5899548
西安市	固定 CO ₂ CO ₂ fixation	12064200.5	14697743	13090220	9389419	8652545
	释放 O ₂ O ₂ release	8881620	10820424	9636972	6912456	6369972
铜川市	固定 CO ₂ CO ₂ fixation	3835846.4	4953391	4460674	3142624	2469695
	释放 O ₂ O ₂ release	2823936	3646668	3283932	2313588	1818180
总和 Total	固定 CO ₂ CO ₂ fixation	84835796.96	1.09E+08	97784799	68489081	60964062
	释放 O ₂ O ₂ release	62455801	80530873	71988809	50421409	44881518
市级 City name		2003	2004	2005	2006	2007
咸阳市	固定 CO ₂ CO ₂ fixation	8496994	9835273	12963716	9120029	9153982
	释放 O ₂ O ₂ release	6255456	7240692	9543840	6714132	6739128
商洛市	固定 CO ₂ CO ₂ fixation	13033773	14709854	17927392	12198529	12934343
	释放 O ₂ O ₂ release	9595416	10829340	13198080	8980512	9522216
天水市	固定 CO ₂ CO ₂ fixation	12355628	13399969	18920877	13243603	13268119
	释放 O ₂ O ₂ release	9096168	9865008	13929480	9749892	9767940

宝鸡市	固定 CO ₂ CO ₂ fixation	20210696	22388865	29748315	20982175	21366692
	释放 O ₂ O ₂ release	14879040	16482600	21900600	15447000	15730080
杨凌区	固定 CO ₂ CO ₂ fixation	77522.64	97551.91	132911	92082.45	93150.91
	释放 O ₂ O ₂ release	57071.88	71817.36	97848.6	67790.76	68577.36
渭南市	固定 CO ₂ CO ₂ fixation	10754903	11748421	15395448	10404926	11082011
	释放 O ₂ O ₂ release	7917720	8649144	11334072	7660068	8158536
西安市	固定 CO ₂ CO ₂ fixation	10782157	11774370	15350313	10680200	11151890
	释放 O ₂ O ₂ release	7937784	8668248	11300844	7862724	8209980
铜川市	固定 CO ₂ CO ₂ fixation	3622871	4026312	5212365	3560474	3800557
	释放 O ₂ O ₂ release	2667144	2964156	3837324	2621208	2797956
总和 Total	固定 CO ₂ CO ₂ fixation	79334545	87980616	1.16E+08	80282019	82850745
	释放 O ₂ O ₂ release	58405800	64771005	85142089	59103327	609944134

由表 3 可以看出,关中-天水经济区土地生态系统 1998 年固定 CO₂ 为 84835797 t/a,2007 年为 82850745 t/a,整体上看,2007 年比 1998 年减少了 2.3%,从各土地利用类型来看,1998 年固定 CO₂ 的物质质量总量排序分别为:耕地>林地>草地>其它类型,2007 年为耕地>草地>林地>其它类型。1998—2007 年整个关中-天水经济区释放 O₂ 的物质质量呈减少趋势,变化情况与固定 CO₂ 的物质质量一致。

表 3 关中-天水经济区土地生态系统固定 CO₂ 和释放 O₂ 物质质量变化表(t/a)

Table 3 The matter of CO₂ fixation and O₂ release of different landuse types in Guanzhong-Tianshui Economic Zone

土地类型 Landuse category	固定 CO ₂ 的物质质量 The matter of CO ₂ fixation		释放 O ₂ 物质质量 The matter of O ₂ release	
	1998 年	2007 年	1998 年	2007 年
耕地 Cropland	29452333.83	32260880	21682700	23750341
林地 Woodland	28313037	23666607	20843954	17423269
草地 rassland	25343514.95	24973449	18657802	18385361
水域 Water body	631136.1398	700327.9	464640.1	515578.8
建筑用地 Buildland	974994.7057	1173366	717787.5	863827.9
未利用地 Unuse land	120780.3274	76113.92	88918.03	56034.79
合计 total	84835796.96	82850745	62455801	60994413

2.3 土地生态系统固定 CO₂ 和释放 O₂ 价值量测评

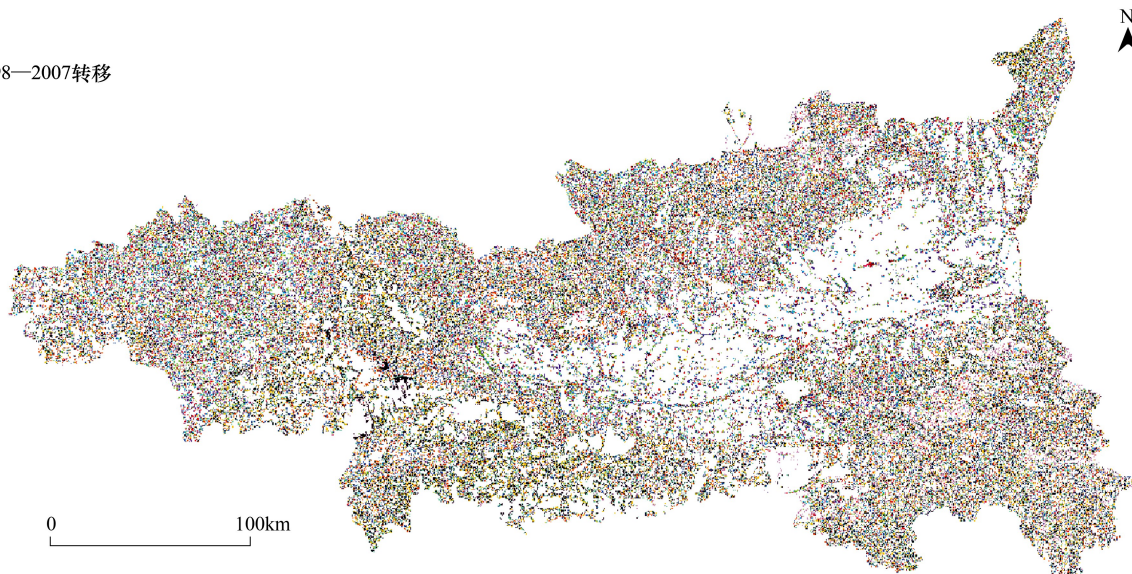
基于关中-天水经济区固定 CO₂ 和释放 O₂ 物质质量的测算结果,得出 1998—2007 年固定 CO₂ 的价值量年均值为 226.35 亿元/a,其中 2005 年价值量最大,为 301.73 亿元/a,2002 年价值量最小,为 159.06 亿元/a。释放 O₂ 的价值取中国造林成本 352.93 元/t 和工业制氧成本 0.4 元/k^[8,21] 的平均值,测算出年平均值为 240.45 亿元/a,比固定 CO₂ 的平均值多 14.1 亿元/a。土地生态系统 1998 年固定 CO₂ 的价值量为 221.33 亿元,2007 年为 216.16 亿元,释放 O₂ 的价值 1998 年为 235.12 亿元,2007 年为 229.62 亿元。从各土地利用类型来看,1998 年和 2007 年平均单位面积固碳释氧价值排序为:林地>草地>耕地>其他类型。

研究土地利用覆盖类型的变化对 NPP 的影响,得出 1998 年—2007 年固碳释氧价值的变化。由表 4 和图 3 可以看出,当耕地向林地、草地转变时,平均固碳释氧价值分别增加了 1614.29 元/(hm²·a)、1960.67 元/(hm²·a),而向其他用地类型转变时,则减少了 1099.15 元/(hm²·a);林地、草地向耕地转变时分别减少了 1081.37 元/(hm²·a)、1706.60 元/(hm²·a),向其他用地类型转变时,分别减少了 2571.96 元/h(hm²·a)、2929.37 元/(hm²·a);其他用地类型向耕地、草地、林地转变时,分别增加了 1302.591 元/(hm²·a)、2017.85 元/(hm²·a)、2276.465 元/(hm²·a)。因为其他用地类型即水域、建筑用地和未利用地本身具有较低的平均 NPP 值。

2.4 固定 CO₂ 和释放 O₂ 价值的空间差异

- | | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| □ 未变化 | ■ 耕地-未利用地 | ■ 林地-未利用地 | ■ 草地-未利用地 | ■ 水域-未利用地 | ■ 未利用地-耕地 |
| ■ 耕地-林地 | ■ 林地-耕地 | ■ 草地-耕地 | ■ 水域-耕地 | ■ 建设用地-耕地 | ■ 未利用地-林地 |
| ■ 耕地-草地 | ■ 林地-草地 | ■ 草地-林地 | ■ 水域-林地 | ■ 建设用地-林地 | ■ 未利用地-草地 |
| ■ 耕地-水域 | ■ 林地-水域 | ■ 草地-水域 | ■ 水域-草地 | ■ 建设用地-草地 | ■ 未利用地-水域 |
| ■ 耕地-建设用地 | ■ 林地-建设用地 | ■ 草地-建设用地 | ■ 水域-建设用地 | ■ 建设用地-水域 | |

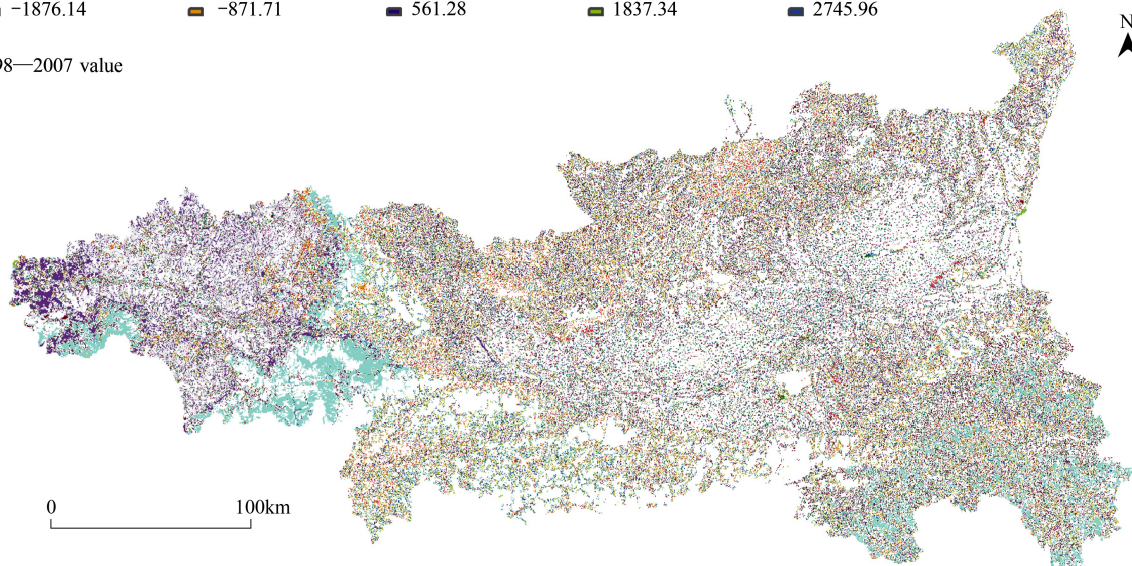
1998—2007转移



(元/hc.a)

- | | | | | | |
|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| ■ -3946.72 | ■ -1706.59 | ■ -570.40 | ■ 0 | ■ 1857.06 | ■ 3092.35 |
| ■ -3321.50 | ■ -1514.75 | ■ -347.33 | ■ 948.44 | ■ 1960.67 | |
| ■ -3002.37 | ■ -1291.68 | ■ -69.36 | ■ 1062.31 | ■ 2093.88 | |
| ■ -2501.34 | ■ -1081.36 | ■ 153.91 | ■ 1204.90 | ■ 2183.72 | |
| ■ -2377.14 | ■ -1035.15 | ■ 410.32 | ■ 1614.29 | ■ 2440.36 | |
| ■ -1876.14 | ■ -871.71 | ■ 561.28 | ■ 1837.34 | ■ 2745.96 | |

1998—2007 value

图3 (a)1998—2007年关天经济区土地利用变化和(b)土地生态系统固定CO₂和释放O₂价值量变化Fig. 3 The change of value of CO₂ fixation and O₂ release by landuse ecosystem in Guanzhong-Tianshui Economic Zone

本文基于 ArcGIS 软件,将关中-天水经济区的 10 个时期的固碳释氧价值图与行政区划图进行叠加,得出 1998—2007 年 10a 关中-天水经济区区域平均固碳释氧价值量空间分布图(图 4)和变化趋势图(图 5)。

表 4 1998 年—2007 年土地利用转移和固碳释氧价值变化
Table 4 Change of landuse and CO₂ fixation and O₂ release value in 1998—2007

1-耕地 2-林地 3-草地 4-其他					
土地类型 Landuse category	面积/hm ² Area	转移价值/(元/hm ² ·a) Transfer Value	地类 Landuse category	面积/hm ² Area	转移价值/(元/hm ² ·a) Transfer Value
12	28132.65	1614.29	31	54590.49	-1706.60
13	73705.14	1960.67	32	28557.09	-871.72
14	26618.67	-1099.15	34	4340.25	-2929.37
21	41508.36	-1081.37	41	8882.73	1302.591
23	79906.50	153.92	42	1376.37	2017.85
24	3646.62	-2571.96	43	2301.93	2276.465

图 4 中可见,南部各县的单位面积固定 CO₂和释放 O₂价值普遍高于北部各县,总体上从南部向北部逐渐降低。关中三大地貌区中,在秦岭-关山这一地貌区,林地是主体的土地利用类型,植被覆盖度高,所以此区的价值量最高,如处于秦岭的凤县、太白县、丹凤县、柞水县、周至县、商州区,其 10 年平均价值量分别为 7306.35 元/(hm²·a)、7304.34 元/(hm²·a)、6906.37 元/(hm²·a)、6840.94 元/(hm²·a)、6461.57 元/(hm²·a)、6167.27 元/(hm²·a);关中盆地由于分布有大面积的耕地,此区的价值量也较高,如岐山县、扶风县、武功县、临潼区等具有较高的价值量,分别为 5088.54 元/(hm²·a)、5024.71 元/(hm²·a)、4894.70 元/(hm²·a)、4645036 元/(hm²·a),而大荔县由于存在面积较大的沙苑,区域平均价值量较低,为 3886.76 元/(hm²·a),西安市区由于建筑用地居多,其价值量最低,为 2537.58 元/(hm²·a);渭北高原区植被覆盖度较低,导致此区价值量较低,如彬县、长武县等价值量较低,分别为 3755.62 元/(hm²·a)、3657.04 元/(hm²·a),而处于子午岭南段的宜君县境内森林覆盖率高具有较高的价值量,为 4885.64 元/(hm²·a);天水市天然林地主要分布在东部、东南部的小陇山、西秦岭和关山林区,导致其单位面积固定 CO₂和释放 O₂价值量整体分布上由东南向西北依次降低,东南部麦积区价值量最高,为 5954.69 元/(hm²·a),而西部甘谷县价值量最低,为 3354.99 元/(hm²·a)。

从图 5 可见,减少显著的象元主要分布在西安市城区、洛南县、凤县、渭滨区的小部分区域,倾向度<-80,此部分面积占全区的 2%;减少较显著的像元主要分布在秦岭-关山区大部分区域和渭北高原的旬邑县、宜君县,倾向度介于-80—0 之间,占全区的 17%;增加较显著的像元主要分布在秦岭-关山区的小部分区域,如周志、户县的交界地带,华县的北部,关中盆地的东部,如合阳县、澄城县、蒲城县,西部如陈仓区、金台区,天水市的张家川回族自治区,倾向度介于 0—80,占全区的 23%;增加显著的像元占大部分面积,占全区的 57%,倾向度>80,主要分布在天水市、渭北高原区、关中盆地大部分区域以及商洛市。

3 讨论

本文采用改进的 NPP 遥感估算模型,模拟了 1998—2007 年关中-天水经济区的植被净第一生产力 NPP 和固碳释氧的物质质量和价值量,并对其变化趋势及其价值量进行了时空分析。由于生态系统的复杂性及所选模型的差异,对 NPP 及固碳释氧的测定有一定的误差。该研究方法基于遥感数据,而景象选取时间的天气状况的差异也会造成遥感影像效果的差异,所以给解译结果造成误差。本研究使用的 SPOT(NDVI)数据,分辨率较低,使得数据准确性不太好,在今后的研究中 NPP 的测算精度有待进一步提高。但是运用遥感模型能够模拟参数在空间上的连续分布,由于本文采用 10 年连续数据,数据过多,为了便于展示,采用区域统计的方法,在 ArcGIS 空间分析模块下计算了 10 年平均价值量,更加清晰地展示了空间分布效果,且在县域尺度上定量分析了关中-天水经济区固碳释氧服务功能的差异及其变化度,对进一步完善协调区域生态系统结构、功能提供科学合理的参考价值。在算法上涉及经济参数,这些参数本身是变动的,只能采用一个参考量,其在取值上会存在偏差。本研究中所涉及的经济参数比较多,如:工业制氧价格等,这些参数本身也是随时间而变动的,使得计算结果存在误差。本文仅做了 NPP 在时间的变化分析,由于全球环境恶化,有很多动因,以后将重

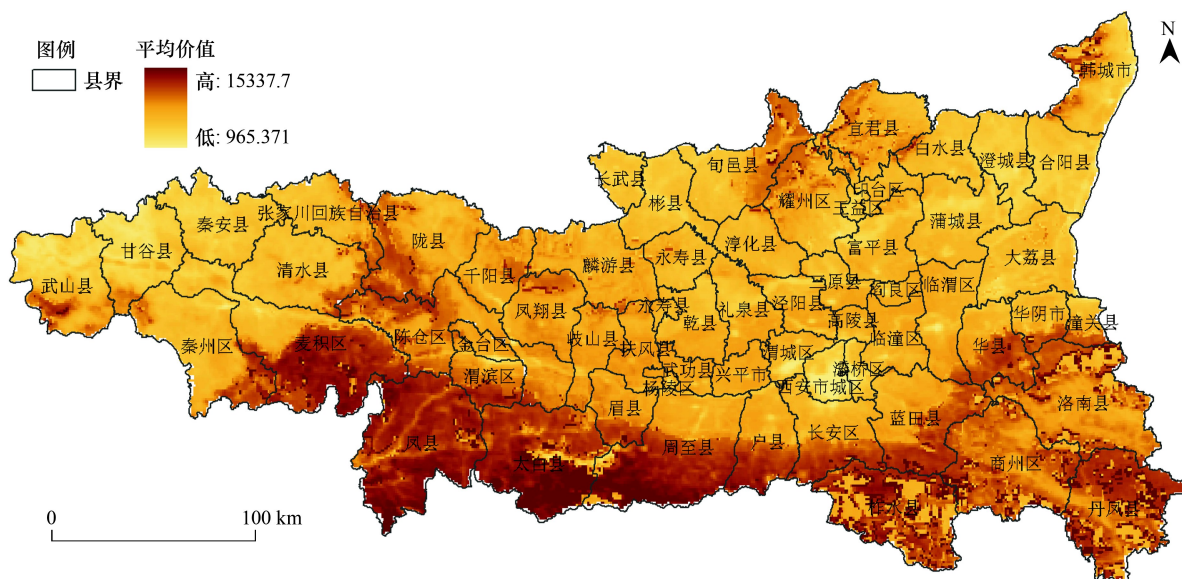


图 4 1998—2007 年关中-天水经济区各个县固定 CO_2 和释放 O_2 平均价值量 ($\text{元}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$) 空间分布图

Fig. 4 The distribution of CO_2 fixation and O_2 release in Guanzhong-Tianshui Economic Zone in 1998—2007

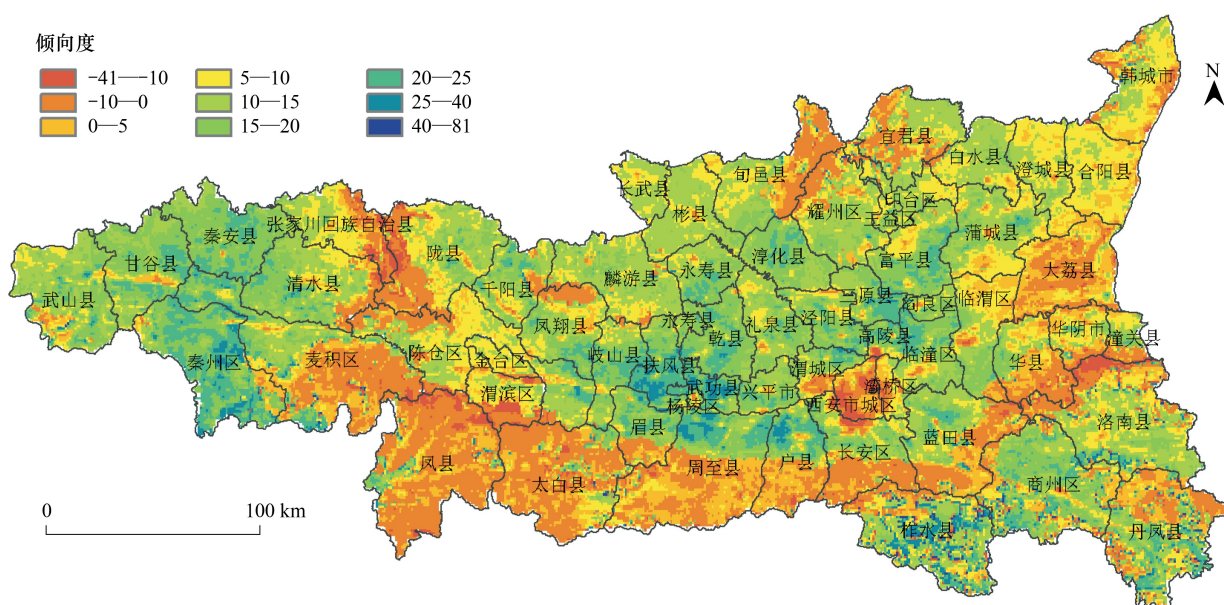


图 5 1998—2007 年关中-天水经济区固碳释氧价值量变化趋势

Fig. 5 Change trend of CO_2 fixation and O_2 release in Guanzhong-Tianshui Economic Zone from 1998—2007

点研究 NPP 与其经济、生活的相互关系。在关中-天水经济区水热条件较好的地区,实施退耕还林(草)工程对植被生长的变化及不同生态系统的固碳释氧有着较明显的积极作用,但对于干旱地区的作用,尚不明确。至于关中-天水经济区生态系统固碳释氧的根本制约因子有待于进一步地深入研究。

4 结论

本文以关中-天水经济区为研究区,利用 SPOT (NDVI) 数据并采用光能利用率模型估算第一性生产力 (NPP) 计算该区域生态系统服务的物质质量,依据光合作用方程式,基于植被 NPP 测算结果,分别测算关中-天水经济区土地生态系统固碳释氧物质质量,研究其时空变化,并进行分析得到以下结论:

(1) 1998—2007 年 10 年间关天经济区的 NPP 变化以 5 年为一个周期。前 5 年波动比后 5 年波动大。对

于各种土地利用类型而言,10 年来 NPP 平均值排列顺序为林地>草地>耕地>其它类型。各类型 10 年间变化较小,基本稳定。

(2) 关中-天水经济区 1998—2007 年固定 CO_2 的物质质量,整体上看,2007 年比 1998 年减少了 2.3%,从各土地利用类型来看,固定 CO_2 的物质质量排序为:1998 年为耕地>林地>草地>其它类型。2007 年为耕地>草地>林地>其它类型。整个关中-天水经济区释放 O_2 的物质质量从 1998—2007 年整体时段来看呈减少趋势,变化情况与固定 CO_2 的物质质量基本相同。

(3) 关中-天水经济区 1998—2007 年固定 CO_2 的价值量年均值为 226.35 亿元/a,其中 2005 年价值量最大,为 301.73 亿元/a,2002 年价值量最小,为 159.06 亿元/a。释放 O_2 的价值取两种测评方法的平均值,年平均值为 240.45 亿元/a,比固定 CO_2 的平均值多 14.1 亿元/a。土地利用各类型之间的转换,固碳释氧价值也随着发生转移。

(4) 从空间分布来看,南部各县的单位面积固定 CO_2 和释放 O_2 价值普遍高于北部各县,总体上分布沿南部向北部逐渐降低。关中三大地貌区中,在秦岭-关山这一地貌区,林地是主体的土地利用类型,植被覆盖度高,所以此区的价值量最高,但 10 年间下降趋势较显著。关中盆地由于分布有大面积的耕地,此区的价值量居中,渭北高原区由于植被覆盖度较低,导致此区价值量最低,但两区大部有显著的上升趋势。天水市单位面积固定 CO_2 和释放 O_2 价值量整体分布上由东南向西北此次降低,价值量呈显著增加的趋势。

References:

- [1] Zhao J Z, Xiao H, Wu G. Comparison analysis on physical and value assessment methods for ecosystems services. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(2): 290-292.
- [2] Zhu Z H. A model for estimating net primary productivity of natural vegetation. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(15): 1422-1426.
- [3] Wang J B. Chinese Terrestrial Net Ecosystem Productive Model Applied Remote Sensing Data [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004: 5-5.
- [4] Tao B. Modeling research on terrestrial net primary productivity & net ecosystem productivity in China [D]. Beijing: Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, 2003.
- [5] Li J, Ren Z Y. Research on the values of CO_2 fixation and O_2 release by landuse ecosystem in loess plateau in Northern Shaanxi Province. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(14): 2943-2950.
- [6] Daily G C. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington DC: Island Press, 1997.
- [7] Ren Z Y, Zhang Y F, Li J. The value of vegetation ecosystem services: a case of Qingling-Daba Mountains. *Journal of Geographical Sciences*, 2003, 13(2): 195-200.
- [8] Li J, Ren Z Y. The spatial analysis of land use ecological services value in Loess Plateau in Northern Shaanxi Province. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(12): 2538-2544.
- [9] Lu S W, Jin F, Yu X X, Xie Y Y, Li Y H, Wang S S. The evaluation of soil conservation of forest ecosystem in China. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(3): 16-21.
- [10] Yang X Q, Zhu W Q, Pan Y Z, Song G B. Estimation of vegetation coverage based on an improved sub-pixel model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(8): 1860-1864.
- [11] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [12] Daily G C. Nature's Service: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington DC: Island Press, 1997: 392-392.
- [13] Zhang X Z. Estimation and distribution of net primary productivity of natural vegetation in China. *Natural Science*, 1993, (1): 15-21.
- [14] Yu X X, Lu S W, Jin F, Chen L H, Rao L Y, Lu G Q. The assessment of the forest ecosystem services evaluation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 2096-2102.
- [15] Ma C X, Liu J J, Kang B W, Sun S H, Ren J H. Evaluation of forest ecosystem carbon fixation and oxygen release services in Shaanxi Province from 1999 to 2003. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(6): 1412-1422.
- [16] Chen L, Li P W, Li G C, Su D, Yuan X Z. Application of CITYGREEN model in air purification, carbon fixation and oxygen release by greenbelt system of Shenzhen City. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 272-282.
- [17] Sun R, Zhu Q J. Distribution and seasonal change of net primary productivity in china from April, 1992 to March, 1993. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(1): 36-45.

- [18] Zhou G S, Zhang X S. Study on NPP of natural vegetation in China under global climate change. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, 20(1): 11-19.
- [19] Potter C S, Klooster S A. Global model estimates of carbon and nitrogen storage in litter and soil pools: response to changes in vegetation quality and biomass allocation. *Tellus*, 1997, 49(1): 1-17.
- [20] Zhu W Q, Pan Y Z, Zhang J S. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3): 413-424.
- [21] Ren Z Y, Li J. The values of CO₂ fixation and O₂ release by vegetation ecosystem in Qnling Daba Mountains of Shaanxi Province. *Graphical Research*, 2004, 23(6): 769-775.
- [22] Ni J. Net primary productivity in forests of China: scaling-up of national inventory data and comparison with model predictions. *Forest Ecology and Management*, 2003, 176(1/3): 485-495.
- [23] Luo T X. Patterns of Biological Production and Its Mathematical Models for Main Forest Types of China [D]. Beijing: Committee of Synthesis Investigation of Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, 1996.
- [24] Fan J W, Zhong H P, Liang B, Shi P L, Yu G R. Carbon stock in grassland ecosystem and its affecting factors. *Grassland of China*, 2003, 25(6): 51-58.
- [25] Prince S D, Hasket J, Steininger M, Strand H, Wright R. Net primary production of U. S. Midwest croplands from agricultural harvest yield data. *Ecological Applications*, 2001, 11(4): 1194-1205.
- [26] Tao B, Li K R, Shao X M, Cao M K. Temporal and spatial pattern of net primary production of terrestrial ecosystems in China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(3): 372-380.
- [27] Liu M L. Land-Use/Cover Change and Terrestrial Ecosystem Phytomass Carbon Pool and Production in China [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2001.
- [28] Sun R, Zhu Q J. Net primary production model and the distribution of net primary production in China. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science Edition*, 1998, 34(Suppl): 132-137.

参考文献:

- [1] 赵景柱, 肖寒, 吴刚. 生态系统服务的物质量与价值量评价方法的比较分析. *应用生态学报*, 2000, 11(2): 290-29.
- [2] 朱志辉. 自然植被净第一性生产力估计模型. *科学通报*, 1993, 38(15): 1423-1426.
- [3] 王军邦. 中国陆地净生态系统生产力遥感模型研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004: 5-5.
- [4] 陶波. 中国陆地生态系统净初级生产力与净生态系统生产力模拟研究 [D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2003.
- [5] 李晶, 任志远. 基于 GIS 的陕北黄土高原土地生态系统固碳释氧价值评价. *中国农业科学*, 2011, 44(14): 2943-2950.
- [8] 李晶, 任志远. 陕北黄土高原土地利用生态服务价值时空研究. *中国农业科学*, 2006, 39(12): 2538-2544.
- [9] 鲁绍伟, 靳芳, 余新晓, 谢媛媛, 李彦慧, 王树森. 中国森林生态系统保护土壤的价值评价. *中国水土保持科学*, 2005, 3(3): 16-21.
- [10] 阳小琼, 朱文泉, 潘耀忠, 宋国宝. 基于修正的亚像元模型的植被覆盖度估算. *应用生态学报*, 2008, 19(8): 1860-1864.
- [13] 张宪洲. 我国自然植被净第一性生产力的估算与分布. *自然资源*, 1993, (1): 15-21.
- [14] 余新晓, 鲁绍伟, 靳芳, 陈丽华, 饶良懿, 陆贵巧. 中国森林生态系统服务功能价值评估. *生态学报*, 2005, 25(8): 2096-2102.
- [15] 马长欣, 刘建军, 康博文, 孙尚华, 任军辉. 1999—2003 年陕西省森林生态系统固碳释氧服务功能价值评估. *生态学报*, 2010, 30(6): 1412-1422.
- [16] 陈莉, 李佩武, 李贵才, 苏笛, 袁雪竹. 应用 CITYGREEN 模型评估深圳市绿地净化空气与固碳释氧效益. *生态学报*, 2009, 29(1): 272-282.
- [17] 孙睿, 朱启疆. 中国陆地植被净第一性生产力及季节变化研究. *地理学报*, 2000, 55(1): 36-45.
- [18] 周广胜, 张新时. 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究. *植物生态学报*, 1996, 20(1): 11-19.
- [20] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424.
- [21] 任志远, 李晶. 秦巴山区植被固定 CO₂ 释放 O₂ 生态价值测评. *地理研究*, 2004, 23(6): 769-775.
- [23] 罗天祥. 中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型 [D]. 北京: 中国科学院自然资源综合考察委员会, 1996.
- [24] 樊江文, 钟华平, 梁飏, 石培礼, 于贵瑞. 草地生态系统碳储量及其影响因素. *中国草地*, 2003, 25(6): 51-58.
- [26] 陶波, 李克让, 邵雪梅, 曹明奎. 中国陆地净初级生产力时空特征模拟. *地理学报*, 2003, 58(3): 372-380.
- [27] 刘明亮. 中国土地利用/土地覆被变化与陆地生态系统植被碳库和生产力研究 [D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2001.
- [28] 孙睿, 朱启疆. 植被净第一性生产力模型及中国净第一性生产力的分布. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 1998, 34(Suppl): 132-137.