

汾河中下游土地生态系统固碳释氧动态测评

张 静^{1,2}, 任志远², 张嘉琪²

(1. 陕西理工大学历史文化与旅游学院, 陕西 汉中 723001;
2. 陕西师范大学旅游与环境学院, 陕西 西安 710119)

摘 要: 本文基于光能利用率模型测算净第一性生产(NPP)物质量,通过光合作用方程式换算固定 CO₂ 和释放 O₂ 的物质量,并采用造林成本法和工业制氧法对汾河中下游流域的固碳释氧价值量进行估算,旨在定量评价其固碳释氧价值的时空动态,为改善区域生态环境提供一定的参考。结果表明:(1) 2000—2010 年汾河中下游流域 NPP 物质总量共增加了 18.3%,耕地的 NPP 物质总量占研究区 NPP 物质总量的 50% 以上,主要在于汾河下游为山西省主要的粮棉产区;(2) 从固碳释氧来看,释氧 O₂ 物质量随着固定 CO₂ 物质量的增加而增加。固碳释氧价值总量由 2000 年的 467.38 × 10⁷ 元增加到 552.24 × 10⁷ 元,净增 84.86 × 10⁷ 元,增长率为 18.16%。从大到小排序为:耕地 > 草地 > 林地 > 其他地。(3) 从县域行政空间来看,万荣县的单位面积 NPP 价值量和单位面积固碳释氧价值量均最高,而介休市均最低。表明汾河下游固碳释氧价值量较高,中游由于城市化进程的加快固碳释氧价值量较低,近年来退耕还林政策的落实使研究区生态环境趋势出现好转。但由于水热条件限制,区域林地增加不明显,以草地增加较为显著。

关键词: 汾河中下游流域;NPP;固碳释氧价值量;动态测评
中图分类号: S314 **文献标志码:** A

Dynamic assessment of the values of CO₂ fixation and O₂ release in the middle and lower reaches of Fenhe river Basin

ZHANG Jing^{1,2}, REN Zhi-yuan², ZHANG Jia-qi²

(1. School of History and Tourism, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001, China;
2. College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

Abstract: Based on light energy utilization model, This article calculated Net Primary Productivity. The photosynthesis equation was used to convert NPP to amount of CO₂ fixation and O₂ releasing and quantitatively computed the values of fixing CO₂ and O₂ releasing by using afforestation cost method and industrial oxygen generation method, in order to evaluate spatio-temporal dynamic changes of fixing CO₂ and O₂ releasing and provide some references for improving the regional ecological environment. The results showed: (1) the total amount of NPP increased by 18.3% during 2000—2010 in the middle and lower reaches of Fenhe river Basin. The amount of cropland NPP accounted for more than 50% of NPP in the study area and mainly distributed in the lower reaches of Fenhe River Basin, which is the main grain and cotton production area in Shanxi province. (2) From the point of fixing CO₂ and O₂ releasing, the quality of O₂ releasing increased with the increasing of fixed CO₂. The total value of fixing CO₂ and O₂ releasing increased to 552.24 × 10⁷ yuan in 2010 from 467.38 × 10⁷ yuan in 2000. There were a net increase of 84.86 × 10⁷ yuan and an increasing rate of 18.16%. The total value of fixing CO₂ and O₂ releasing was “cropland > grassland > forestland > other land” in orders from high to low. (3) From the perspective of the county administrative space, the value of NPP per unit area and the value of fixing CO₂ and O₂ release per unit area was the highest in Wanrong County, while the lowest was in Jiexiu City. Overall, the value of fixing CO₂ and O₂ release was higher in the lower reaches of Fenhe River Basin and the value of fixing CO₂ and O₂ releasing was lower in the middle reaches of Fenhe River Basin due to the rapid urbanization. In recent years, the implementation of the policy of returning cropland to forestland has improved the ecological environment in the

study area. However, due to the limitation of water and heat conditions, forestland increase was not obvious i, and grass-land increase was more significant.

Keywords: the middle and lower reaches of Fenhe river Basin; Net Primary Productivity (NPP); the values of CO₂ fixation and O₂ release; dynamic assessment

陆地生态系统是人类赖以生存和发展的物质基础,具有十分重要的生态调节功能^[1-4]。在生态系统形成和演变的过程中,人类从中获得各种惠益,既有有形的物质产品供给,又有无形的服务提供^[5]。其中,生态系统对气候的调节功能是生态系统主要服务功能之一。大气的调节功能主要体现在 CO₂ 和 O₂ 平衡、O₃ 防紫外线及 SO₂ 水平等方面的服务功能^[6-8]。随着工业化的发展,CO₂ 成为引起全球气候变暖的主要因素。然而陆地植被生态系统通过植物光合作用,不仅生产有机物质,还吸收空气中的二氧化碳(CO₂),生成葡萄糖等碳水化合物并释放出氧气(O₂),这种功能被称作固碳释氧。该功能对调节气候、平衡 CO₂ 和 O₂ 浓度具有重要意义。近年来国内外学者在这方面做了大量的研究,欧阳志云分别运用两种方法造林成本法和碳税法、造林成本法和工业制氧影子价格法,各自计算了中国陆地生态系统每年固定 CO₂ 的总经济价值和释放 O₂ 的间接经济价值,并对两种不同方法计算的固碳价值量和释氧价值量进行了对比^[7]。鲁春霞分别运用两种方法瑞典碳税法和造林成本法、医用制氧影子价格法和造林成本法测算了青藏高原不同生态系统的固碳价值量和释氧价值量^[9]。任志远、赵同谦等分别运用造林成本法和工业制氧法计算了不同区域森林生态系统的固碳价值量和释氧价值量^[10-11]。总的来看,测算生态系统服务功能价值是当前生态学与生态经济学研究的热点问题。碳税法、造林成本法和影子价格法是固碳释氧价值量测算常用方法。其中,固碳价值量计算法中碳税法结果大于造林成本法,释氧价值量计算中制氧影子价格法结果大于造林成本法。汾河中下游流域为黄土高原生态脆弱区的流域单元,不仅是山西省重要的水源涵养地,也是其重要的人口密集区、粮棉主产区、经济发达区、生态功能区。近年来随着城市规模的快速扩张,人口的持续增长,以及社会对能源需求量的急增,流域内煤炭资源大量开采,经济开发力度不断增强,导致了水资源减少、气候干旱,生态环境恶化。目前,关于汾河中下游流域生态系统服务功能价值的研究还相对较少。本文通过定量方法对汾河中下游流域生态系统的固碳释氧价值进行测评,研究和揭示不同土地利用格局对生态系统服务功能造成的影响及演变

规律性,对科学准确地评价流域内乃至黄土高原区的生态服务价值的作用机制具有重要意义,对实现区域可持续发展,为促进人类社会经济和生态环境协调发展提供重要的理论依据和实践指导。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

汾河中下游流域位于山西省的中南部,地貌上属于汾河谷地的一部分,河流主要流经地堑纵谷与盆地,地势平坦,水资源相对丰富,土壤肥沃,水热条件好,被誉为“山西粮仓”。地处中纬度内陆,为东部季风气候区与蒙新高原气候区的过渡地带,是半干旱大陆性季风气候区,南北差异及季节差异较大,平均气温在 7℃~15℃之间,冬春季节常受到蒙古高原南下寒潮的影响,寒冷干燥;夏季高温多雨,降水集中。1 月平均气温为 -9.7℃~-2.6℃,7 月平均气温 20.0℃~26.8℃,春温高于秋温。年平均降水量在 390~480 mm 之间,且全年 70% 的降水量集中在 6—9 月。日照时数最多月份出现在 5、6 月份,最少出现在 2 月份。共辖榆次市、平遥县等 20 个县 6 个市辖区,见图 1。土地面积约 258.6 万 hm²,占山西省土地面积的 16.49%,人口密集,经济文化发达,煤炭资源丰富。

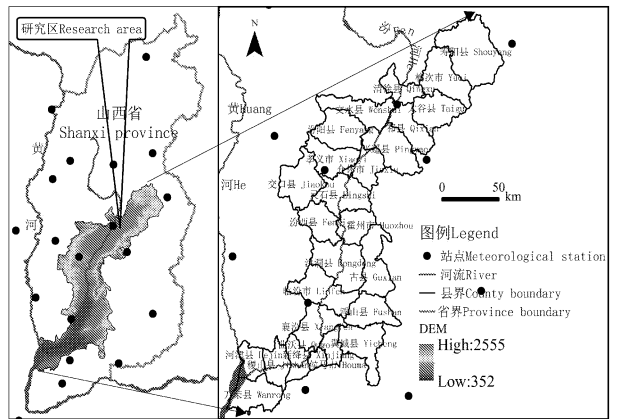


图 1 研究区位置、DEM 和气象站点

Fig.1 Location, DEM and meteorological stations of the study area

1.2 数据来源

Landsat TM 遥感影像来自国际科学数据服务平台,时间选取 2000 年和 2010 年,解译得到土地利用数据;DEM 数据来源于美国太空总署(NASA)和国防

部国家测绘局联合测量的 SRTM3 数据,空间分辨率为 90 m;SPOT-NDVI 数据集来自比利时弗莱芒技术研究所,空间分辨率为 1 km 的旬数据,时间为 2000—2010 年。气象数据来自中国气象科学数据共享网,选取 2000—2010 年研究区及其周边完整且均匀分布的 26 个气象站点的旬值、月值的气温、降水、日照时数及日照辐射数据资料,其它空间数据来自 1:400 万基础数据库。

1.3 测评模型

1.3.1 净第一性生产力计算模型 植被净第一性生产力(net primary productivity, NPP)是指在单位面积和单位时间上,绿色植物积累的有机物质量。它是生态系统功能状况的重要指标,反映了气候变化及人类活动对陆地植被覆盖综合作用的结果^[4,6,12-13]。国内相关学者对比研究了植被净第一性生产力几种模型的评估效果^[14],常用模型有建立的植物生理生态学特点与水热平衡关系的模型^[15],目前在估算植被净第一性生产力的模型中,光能利用率模型在大尺度植被净第一性生产力的估算研究中被广泛应用^[16-17]。具体模型如下:

$$\begin{aligned} NPP(x,t) &= APAR(x,t) \times \varepsilon(x,t) \\ APAR(x,t) &= SOL(x,t) \times FPAR(x,t) \times 0.5 \\ FPAR(x,t) &= (FPAR(x,t)_{NDVI} + FPAR(x,t)_{SR})/2 \\ FPAR(x,t)_{NDVI} &= \frac{(NDVI(x,t) - NDVI_{i,min}) \times (FPAR_{max} - FPAR_{min})}{(NDVI_{i,max} - NDVI_{i,min})} \\ &+ FPAR_{min} \\ FPAR(x,t)_{SR} &= \frac{(SR(x,t) - SR_{i,min}) \times (FPAR_{max} - FPAR_{min})}{(SR_{i,max} - SR_{i,min})} + FPAR_{min} \\ SR(x,t) &= (1 + NDVI(x,t))/(1 - NDVI(x,t)) \\ \varepsilon(x,t) &= f_1(x,t) \times f_2(x,t) \times w(x,t) \times \varepsilon_{max} \\ f_1(x,t) &= 0.8 + 0.02 \times T_{opt}(x) - 0.0005 \times [T_{opt}(x)]^2 \\ f_2(x,t) &= \frac{1.184}{1 + \exp[0.2 \times (T_{opt}(x) - 10 - T(x,t))]} \times \frac{1}{1 + \exp[0.3 \times (-T_{opt}(x) - 10 + T(x,t))]} \\ W_{\varepsilon}(x,t) &= 0.5 + 0.5 \times E(x,t)/E_p(x,t) \end{aligned}$$

上述公式中, $APAR(x,t)$ 表示 t 月份像元 x 处的光合有效辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$), $\varepsilon(x,t)$ 表示 t 月份像元 x 处的实际光能利用率($\text{g C} \cdot \text{MJ}^{-1}$)。

表 1 主要指标和参数的含义^[4,17]
Table 1 The meanings of main indicators and parameters

指标 Index	代表含义 The meanings of parameters
$SOL(x,t)$ 、 $FPAR(x,t)$	t 月份像元 x 的太阳总辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)和光合有效辐射的吸收比例 Absorption ratio of total solar radiation ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$) and photosynthetically effective radiation of Pixel x in a certain month
常数 0.5 Constant 0.5	植被利用的太阳有效辐射占总辐射的比例 The proportion of solar effective radiation from vegetation to total radiation
$FPAR(x,t)_{NDVI}$ 、 $FPAR(x,t)_{SR}$	归一化植被指数和比值植被指数计算得到的光合有效辐射吸收比例 The ratio of photosynthetic effective radiation absorption calculated by the normalized vegetation index and the ratio vegetation index
$FPAR_{max}$ 、 $FPAR_{min}$	$FPAR_{max} = 0.95$ 、 $FPAR_{min} = 0.001$
$NDVI_{i,max}$ 、 $NDVI_{i,min}$	NDVI 在第 i 种植被类型中的最大值和最小值 The maximum and minimum value of NDVI in a certain vegetation
$SR_{i,max}$ 、 $SR_{i,min}$	SR 在第 i 种植被类型中的最大值和最小值 The maximum and minimum value of SR in a certain vegetation
$NDVI(x,t)$ 、 $SR(x,t)$	分别为像元 x 在 t 月份的归一化植被指数和比值植被指数 Normalized vegetation index and ratio vegetation index of pixel x in a certain month
ε_{max}	最大光能利用率($\text{g C}/\text{MJ}$) Utility rate of luminous energy
$f_1(x,t)$ 、 $f_2(x,t)$ 和 $w(x,t)$	分别为最大光能利用率在低温、高温和水分时的胁迫系数,采用朱文泉等研究的不同植被类型最大光能利用率的模拟值。 The stress coefficients of maximum light energy utilization at low temperature, high temperature and water, using the simulation value of the maximum light energy utilization of different vegetation types studied by Zhu Wenquan
$T_{opt}(x)$	植物生长的最适温度,即区域一年内 NDVI 最大时对应的当月均温($^{\circ}\text{C}$) The optimum temperature for the growth of plants, that is corresponding monthly mean temperature of NDVI maximum within a year
$E(x,t)$ 、 $E_p(x,t)$	分别为实际蒸散量(mm)、潜在蒸散量(mm) Actual evapotranspiration(mm)、potential evapotranspiration(mm)

注:当月均温 $T(x,t) \leq -10^{\circ}\text{C}$ 时, $f_1 = 0$; 当 $T(x,t)$ 比 $T_{opt}(x)$ 低 13°C 或高 10°C 时, f_2 等于最适温度 $T_{opt}(x)$ 时 f_2 值的一半。
Note: if the monthly mean temperature of $T(x,t) \leq -10^{\circ}\text{C}$, $f_1 = 0$; when $T(x,t)$ is 13°C less than $T_{opt}(x)$ or 10°C more than $T_{opt}(x)$, f_2 is equal to half of the optimum temperature $T_{opt}(x)$.

1.3.2 固碳释氧测评模型 植物进行光合作用的同时,吸收 CO₂,释放 O₂ 和生成有机物质。其化学反应方程式为:6CO₂ + 6H₂O→C₆H₁₂O₆ + 6O₂。该测算以植被 NPP 物质质量为依据,运用光合作用方程,生产 1 kg 有机物能固定 1.63 kg 的 CO₂ 和释放 1.2 kg 的 O₂,从而得出固碳释氧物质量。再运用造林成本法、工业制氧影子价格法分别估算固定碳和释放氧气的价值量。本研究按照固定每吨 CO₂ 和释放每吨 O₂ 的成本价格标准分别为 260.9 元·t⁻¹和352.93 元·t⁻¹[4,6]。

2 结果与分析

2.1 净第一性生产力物质质量测评

绿色植被通过光合作用,对调节区域气候,改善生态环境具有重要意义。本研究基于遥感数据的光能利用率模型,计算了汾河中下游流域 2000 和 2010 年不同土地利用类型的 NPP 物质质量。首先根据植被类型的特点,将土地利用类型合并为四大类:耕地、林地、草地和其他用地;然后采用不同土地类型 NPP 计算方法,得到相应土地利用类型的 NPP 物质质量;最后分别求得 2000 年和 2010 年的 NPP 总物质

量,见表 2 和图 2。

土地利用结构和相关气象要素的变化使研究区 2000 年和 2010 年的 NPP 总物质量发生变化,分别为 549.76 万 t 和 650.26 万 t。10 年间 NPP 物质总量共增加了 18.3%,见表 2。其中耕地的 NPP 总物质量占研究区总物质量的 50%以上。10 年间耕地的 NPP 总物质量是增加的,但其占研究区 NPP 总物质量的比例由 2000 年的 54.46%下降为 2010 年的 50.73%;林地的 NPP 总物质量净增加 10.22 万 t,但当年林地 NPP 总物质量占研究区 NPP 总物质量的比例由 2000 年的 22.58%下降到 20.66%;草地的 NPP 总物质量 10 年间净增加 44.78 万 t;其他用地净增加 15.01 万 t,当年其他用地 NPP 总物质量占研究区 NPP 总物质量的比例由 2000 年的 0.83%上升到 3.01%,见图 2。从绝对数量上,各类用地 NPP 总物质量是增加的,但从分布比例来看,林地和耕地总物质量比例在下降,草地和其他用地总物质量比例在增加。从单位面积来看,各类用地单位面积 NPP 物质质量均有所增加,但 2010 年耕地的单位面积 NPP 物质质量最大,2000 年林地的单位面积 NPP 物质质量最大。即2000年各土地利用类型单位面积物质量的

表 2 汾河中下游流域各土地类型的 NPP 物质质量

Table 2 The amount of NPP on different land types in Middle and Lower Reaches of Fenhe River Basin

土地利用类型 Land use type	2000			2010		
	土地面积 Land area (× 10 ⁴ hm ²)	单位面积物质量 Quality of per unit /(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	总物质量 Total quality (× 10 ⁴ t·a ⁻¹)	土地面积 Land area (× 10 ⁴ hm ²)	单位面积物质量 Quality of per unit /(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	总物质量 Total quality (× 10 ⁴ t·a ⁻¹)
耕地 Farmland	137.33	2.18	299.39	127.37	2.59	329.89
林地 Forest land	52.15	2.38	124.12	52.88	2.54	134.33
草地 Grassland	64.38	1.89	121.68	66.85	2.49	166.46
其他 Otherland	3.94	1.16	4.57	10.70	1.83	19.58
总计 Total			549.76			650.26

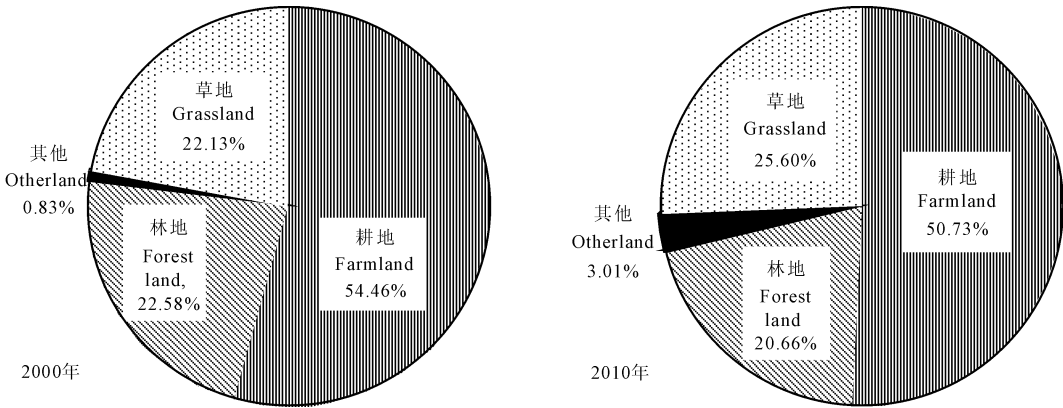


图 2 汾河中下游流域不同土地利用类型 NPP 物质质量分布比例

Fig.2 Distributing ratio of NPP on different land types in Middle and Lower Reaches of Fenhe River Basin

排序是:林地>耕地>草地>其他用地。2010 年的排序是:耕地>林地>草地>其他用地。总体来看,不同年份不同土地利用类型的单位面积 NPP 物质质量会产生差异。由于单位面积 NPP 物质质量和土地利用结构的变化,不同土地利用类型的总物质质量也会随着时间推移发生变化。

由于土地利用结构在空间分布上的不均匀性,单位面积 NPP 物质质量也会存在空间差异,并呈现一定的规律性。2000—2010 年间单位面积 NPP 物质质量高值区基本都分布在汾河下游地区的临汾盆地和运城盆地,见图 3。汾河下游土地利用类型以耕地为主,由于地势低平、气候温和、热量较为充足、土壤肥沃,使得农业较为发达,是山西省主要的粮棉产区;单位面积 NPP 物质质量次高的地区分布在研究区

北部的晋中盆地,如寿阳县、太谷县、榆次市、平遥县等;研究区的东西部为山区丘陵地区,林地和草地分布较为广泛,单位面积 NPP 物质质量也不是最低;单位面积 NPP 物质质量最低值基本分布在城市建设用地较为密集的地区和煤矿聚集区,如清徐县的西山煤田,霍州市、汾西县的霍山煤田等。整体来看,单位面积 NPP 物质质量在南部临汾盆地和运城盆地变化规律较为稳定,且单位面积 NPP 物质质量最高;中部的汾西县、霍州市、灵石县、交口县、孝义市、介休市、汾阳县在 2000—2010 年间空间变化较为复杂,可能是由于研究期内流域的水热条件、光照条件差异以及人为改造自然环境的强度增加,尤其是城市化进程的加速,使得 NPP 的空间分布有所不同。

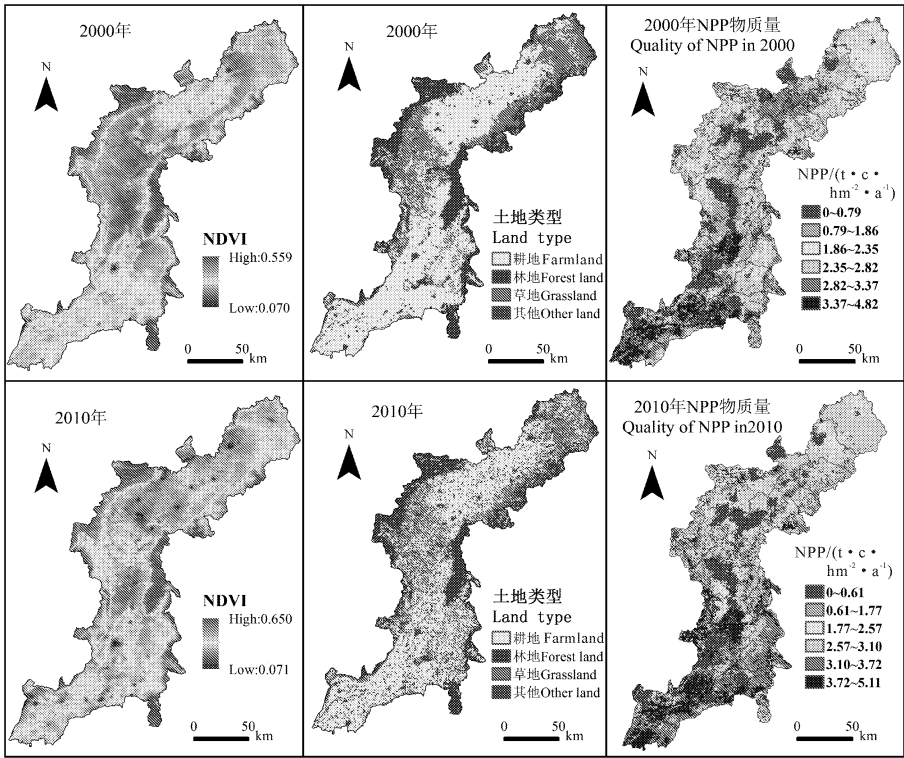


图 3 汾河中下游流域 NDVI、土地利用类型和单位面积 NPP 物质质量空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of NDVI, land type and NPP per unit area in Middle and Lower Reaches of the Fenhe River Basin

2.2 固碳释氧物质质量测评

根据固碳释氧测评模型,得出 2000 年和 2010 年固碳释氧物质质量,见表 3。2000 年和 2010 年汾河中下游流域固定 CO₂ 的总物质质量分别为 897.56 万 t、1061.56 万 t,释放 O₂ 的物质质量分别为 661.15 万 t、780.74 万 t。2000—2010 年间固定 CO₂ 和释放 O₂ 的物质质量均呈增长趋势,分别净增加 164.0 万 t 和 119.59 万 t,增加了 18.27%和 18.09%。其中,对比 2000 年,研究期内耕地固定 CO₂ 的物质质量净增49.87

万 t,增加了为 10.2%,林地固定 CO₂ 的物质质量净增 16.61 万 t,增加了 8.19%,草地固定 CO₂ 净增加 73.13万 t,增加了 36.88%。各类土地释放 O₂ 物质质量也存在差异性。对比 2000 年释放氧 O₂ 物质质量,2010 年耕地、林地、草地分别净增 36.31 万 t、11.63 万 t 和 53.74 万 t,增长率为 10.09%、7.77%和 36.77%。土地利用类型不同单位面积固碳释氧物质质量也存在差异性。2000 年不同土地利用类型单位面积上固定 CO₂ 和释放 O₂ 的物质质量排序为:林地

>耕地>草地>其他类型;而 2010 年则为:耕地>林地>草地>其他类型。而总质量均是耕地大于林地。总之,释氧 O₂ 物质质量随着固定 CO₂ 物质质量的增加而增加,但释氧 O₂ 物质质量增长率始终小于固定

CO₂ 物质质量的增长率。由于气象要素的变化和人类活动强度的增加,耕地单位面积固碳释氧物质质量是增加,而林地是减小的,林地和耕地对区域生态环境的影响和气候的调节作用明显增强。

表 3 汾河中下游流域不同土地利用类型固碳释氧物质质量

土地利用类型 Land use type	固定 CO ₂ 物质质量 Quality of fixing CO ₂				释放 O ₂ 物质质量 Quality of releasing O ₂			
	2000 年		2010 年		2000 年		2010 年	
	单位面积 物质质量 Quality of per unit (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	总物质质量 Total quality (× 10 ⁴ t·a ⁻¹)	单位面积 物质质量 Quality of per unit (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	总物质质量 Total quality (× 10 ⁴ t·a ⁻¹)	单位面积 物质质量 Quality of per unit (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	总物质质量 Total quality (× 10 ⁴ t·a ⁻¹)	单位面积 物质质量 Quality of per unit (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	总物质质量 Total quality (× 10 ⁴ t·a ⁻¹)
耕地 Farmland	3.56	488.91	4.23	538.78	2.62	359.82	3.11	396.13
林地 Forest land	3.89	202.86	4.15	219.47	2.87	149.67	3.05	161.30
草地 Grassland	3.08	198.30	4.06	271.42	2.27	146.15	2.99	199.89
其他 Other land	1.90	7.49	2.98	31.88	1.40	5.52	2.19	23.43
总计 Total		897.56		1061.56		661.15		780.74

2.3 固碳释氧价值量测评

根据汾河中下游流域的固碳释氧物质质量,分别采用造林成本法和工业制氧法估算出不同土地利用类型固碳释氧的价值量,造林成本标注为 260.9 元·t⁻¹和工业制氧法标注为 352.93 元·t⁻¹[4,6],见表 4。汾河中下游流域固碳释氧价值量由 2000 年的 467.38×10⁷ 元增加到 552.24×10⁷ 元,净增 84.86×10⁷ 元,增长率为 18.16%。固碳释氧物质质量与价值量呈正相关,即物质质量高的地区价值量也高。2000

年单位面积上固碳释氧价值量由大到小的排列顺序为:林地>耕地>草地>其他用地,2010 年单位面积上固碳释氧价值量耕地大于林地,耕地单位面积固碳释氧价值量为 2 200.11 元·hm⁻²·a⁻¹,林地为 2 158.55 元·hm⁻²·a⁻¹。可能在于 2000—2010 年间农业科学技术的进步,耕地单位面积上的产量大大提高,导致固碳释氧能力的增强。而林地景观的退化和破碎化,会造成固碳释氧能力的下降。

表 4 汾河中下游流域各土地利用类型固碳释氧价值量

土地利用类型 Land use type	2000 年		2010 年	
	单位面积价值量 Value of per unit /(元·hm ⁻² ·a ⁻¹)	价值总量 Total value (× 10 ⁷ 元·a ⁻¹)	单位面积价值量 Value of per unit /(元·hm ⁻² ·a ⁻¹)	价值总量 Total value (× 10 ⁷ 元·a ⁻¹)
耕地 Farmland	1852.83	254.46	2200.11	280.23
林地 Forestland	2027.48	105.73	2158.55	114.15
草地 Grassland	1604.27	103.29	2112.94	141.26
其他 Otherland	989.79	3.90	1551.04	16.59
总计 Total		467.38		552.24

同时,文中采用 ArcGIS 分区统计法,以县级行政单位为单元,统计了汾河中下游 26 个县 2000 年和 2010 年的单位面积固碳释氧价值量和固碳释氧价值总量,见表 5。2000—2010 年间各县市的单位面积固碳释氧价值量大于单位面积 NPP 的价值量,因此固碳释氧总价值量同步大于 NPP 总价值量。2000 年和 2010 年万荣县的单位面积 NPP 价值

量和单位面积固碳释氧价值量均最高,单位面积 NPP 价值量分别为 745.65 元·hm⁻²·a⁻¹和 846.95 元·hm⁻²·a⁻¹,净增 101.3 元·hm⁻²·a⁻¹;单位面积固碳释氧价值量分别为 2 730.10 元·hm⁻²·a⁻¹和 3 101.02 元·hm⁻²·a⁻¹,净增 370.92 元·hm⁻²·a⁻¹。其次是新绛县和曲沃县,新绛县单位面积 NPP 价值量分别为 708.48 元·hm⁻²·a⁻¹和 832.89 元·hm⁻²·

a^{-1} 净增 $124.41 \text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;单位面积固碳释氧价值量分别为 $2\,594.01$ 和 $3\,049.52$,净增 $455.51 \text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。曲沃县单位面积 NPP 价值量分别为 $677.95 \text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $740.09 \text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,净增 $62.14 \text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;单位面积固碳释氧价值量分别为 $2\,482.23 \text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $2\,709.76 \text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,净增 $227.53 \text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。然而介休市的单位面积 NPP 价值量和单位面积固碳释氧价值量均最低。从

NPP 价值总量和固碳释氧价值总量来看,寿阳县最高,其次是洪洞县,最低的是侯马市。主要在于研究范围内寿阳县所辖面积最大 $200.7\times 10^3 \text{ hm}^2$,洪洞县是 $141.6\times 10^3 \text{ hm}^2$,侯马市只有 $21.0\times 10^3 \text{ hm}^2$ 。总体来看,汾河下游县区单位面积 NPP 价值量和单位面积固碳释氧价值量高,汾河中游城市化发展速度快的单位面积 NPP 价值量和单位面积固碳释氧价值量低。

表 5 汾河中下游流域各县市 NPP 和固碳释氧价值量

Table 5 The values of NPP and fixing CO₂ and releasing O₂ in each county in Middle and Lower Reaches of Fenhe River Basin

县市名 County name	2000 年				2010 年			
	NPP		固碳释氧 Fixing CO ₂ and releasing O ₂		NPP		固碳释氧 Fixing CO ₂ and releasing O ₂	
	单位面积 价值量 Value of per unit	价值总量 Total value ($\times 10^6$ 元· a^{-1})	单位面积 价值量 Value of per unit	价值总量 Total value ($\times 10^6$ 元· a^{-1})	单位面积 价值量 Value of per unit	价值总量 Total value ($\times 10^6$ 元· a^{-1})	单位面积 价值量 Value of per unit	价值总量 Total value ($\times 10^6$ 元· a^{-1})
	$\text{/(元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}\text{)}$		$\text{/(元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}\text{)}$		$\text{/(元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}\text{)}$		$\text{/(元}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}\text{)}$	
万荣县 Wanrong	745.65	73.30	2730.10	268.37	846.95	83.26	3101.02	304.83
新绛县 Xinjiang	708.48	40.31	2594.01	147.60	832.89	47.39	3049.52	173.52
曲沃县 Quwo	677.95	28.07	2482.23	102.76	740.09	30.64	2709.76	112.18
稷山县 Jishan	633.69	41.19	2320.20	150.81	714.92	46.47	2617.61	170.14
浮山县 Fushan	591.87	53.03	2167.07	194.17	730.19	65.42	2673.51	239.55
文水县 Wenshui	565.27	54.61	2069.68	199.93	550.20	53.15	2014.51	194.60
太谷县 Taigu	541.80	53.64	1983.74	196.39	602.01	59.60	2204.18	218.21
寿阳县 Shouyang	531.12	106.60	1944.65	390.29	621.65	124.76	2276.10	456.81
翼城县 Yicheng	525.48	57.59	1923.98	210.87	610.58	66.92	2235.58	245.02
祁县 Qixian	525.22	42.65	1923.03	156.15	600.28	48.74	2197.88	178.47
襄汾县 Xiangfen	523.36	51.39	1916.24	188.18	606.59	59.57	2220.95	218.10
平遥县 Pingyao	521.00	62.00	1907.59	227.00	589.07	70.10	2156.83	256.66
古县 Gu County	504.85	57.00	1848.45	208.69	622.19	70.25	2278.10	257.20
交口县 Jiaokou	493.14	58.44	1805.57	213.96	591.48	70.09	2165.63	256.63
侯马市 Houma	473.67	9.95	1734.30	36.42	517.83	10.87	1895.98	39.82
洪洞县 Hongdong	468.76	66.38	1716.32	243.03	605.47	85.73	2216.86	313.91
临汾市 Linfen	464.78	58.10	1701.75	212.72	591.12	73.89	2164.32	270.54
榆次市 Yuci	436.78	52.59	1599.20	192.54	521.74	62.82	1910.28	230.00
汾阳县 Fenyang	430.32	47.16	1575.56	172.68	489.07	53.60	1790.68	196.26
清徐县 Qingxu	425.61	23.75	1558.32	86.95	431.92	24.10	1581.43	88.24
河津县 Hejin	424.13	22.99	1552.89	84.17	500.92	27.15	1834.07	99.41
灵石县 Lingshi	373.11	42.42	1366.11	155.33	528.86	60.13	1936.36	220.16
霍州市 Huozhou	358.38	26.05	1312.15	95.39	466.35	33.90	1707.47	124.13
汾西县 Fenxi	342.32	27.90	1253.35	102.15	478.69	39.01	1752.67	142.84
孝义市 Xiaoyi	309.63	27.62	1133.69	101.13	397.29	35.44	1454.63	129.75
介休市 Jiexiu	283.15	19.76	1036.72	72.36	365.62	25.52	1338.67	93.44

3 结论与讨论

本文基于 CASA 模型测算了流域生态系统净初级生产力和其固碳释氧量。2000—2010 年流域生态

系统固碳释氧价值量和 NPP 物质质量呈增加趋势,表明近年来气候变化和人类活动改善了区域生态环境。2000 年以来,汾河中游地区经历了快速城市化进程,城镇面积不断扩大。而汾河下游地区盆地面

积广,农业生产发达。水热条件好、生态型用地面积广的区域固碳释氧量和 NPP 物质质量就高,水热条件差,建设用地面积增加快的区域固碳释氧量和 NPP 物质质量就低,在一定程度上景观的退化和破碎化,也会影响到区域单位面积固碳释氧量的变化,表明流域固碳释氧经济价值的空间分布特征与土地覆被利用类型、水热条件以及人类活动密切相关,未来势必加强中游地区的生态环境治理和保护工作。

通过以上分析,得到如下结论:

- 1) 2000—2010 年汾河中下游流域土地生态系统 NPP 物质质量时空分布差异大。2000—2010 年间 NPP 物质总量共增加了 18.3%,各土地利用类型的 NPP 物质质量均有所增加。流域内耕地面积占优势,NPP 物质总量也高,耕地的单位面积 NPP 物质质量有所上升,基本分布在汾河下游的临汾盆地和运城盆地。主要在于该区域地势低平、气候温和、热量较为充足、土壤肥沃,以耕地为主,农业较为发达,是山西省主要的粮棉产区。
- 2) 从固碳释氧物质质量来看,释放 O₂ 物质质量随着固定 CO₂ 物质质量的增加而增加,但释放 O₂ 物质质量增长率始终小于固定 CO₂ 物质质量的增长率。其中耕地、林地和草地固定 CO₂ 的物质质量在 10 年间分别增加了 10.2%、16.61% 和 36.88%;2010 年林地单位面积固碳释氧物质质量的降低,可能在于林地景观的退化和破碎化,造成固碳释氧能力的下降。
- 3) 从固碳释氧价值量来看,由 2000 年的 467.38 × 10⁷ 元增加到 552.24 × 10⁷ 元,净增 84.86 × 10⁷ 元,增长率为 18.16%。县域统计中,汾河下游县区单位面积 NPP 价值量和单位面积固碳释氧价值量高,而汾河中游城市化发展速度快的县区价值量低。

参 考 文 献:

[1] 任志远,李 晶.秦巴山区植被固定 CO₂ 释放 O₂ 生态价值测评[J].地理研究,2004,23(6):769-775.

[2] Costanza R, d'Arge R, R. S. de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997,387(1):3-15.

[3] Ren Zhiyuan, Zhang Yanfang, Li Jing, et al. The value of vegetation ecosystem service: A case of Qinling-Daba Mountains[J]. Journal of Geographical Sciences, 2003,13(2):238-243.

[4] 刘宪锋,任志远,林志慧.青藏高原生态系统固碳释氧价值动态测评[J].地理研究,2013,32(4):663-670.

[5] 傅伯杰,张立伟.土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展[J].地理科学进展,2014,33(4):441-446.

[6] 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[J].中国农业科学,2011,44(14):2943-2950.

[7] 欧阳志云,王效科,苗 鸿.中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J].生态学报,1999,19(5):607-613.

[8] 万 昊,刘卫国.六盘山 2 种森林植被固碳释氧计量研究[J].水土保持学报,2014,28(6):332-336.

[9] 鲁春霞,谢高地,肖 玉,等.青藏高原生态系统服务功能的价值评估[J].生态学报,2004,24(12):2749-2756.

[10] 任志远,李 晶.陕南秦巴山区植被生态功能的价值测评[J].地理学报,2003,58(4):503-511.

[11] 赵同谦,欧阳志云,郑 华,等.中国森林生态系统服务功能及其价值评价[J].自然资源学报,2004,19(4):480-491.

[12] Daily G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems[J]. Corporate Environmental Strategy, 1997,6(2):220-221.

[13] 张懿铨,祁 威,周才平,等.青藏高原高寒草地净初级生产力(NPP)时空分异[J].地理学报,2013,68(9):1197-1211.

[14] 朱志辉.自然植被净第一性生产力估计模式[J].科学通报,1993,38(15):1422-1426.

[15] 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[J].植物生态学报,1996,20(1):11-19.

[16] 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[J].地理学报,2000,55(1):36-45.

[17] 朱文泉,潘耀忠,张锦水.中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J].植物生态学报,2007,31(3):413-424.

(上接第 22 页)

[22] 张 雯,耿增超,陈心想,等.生物炭对盐土改良效应研究[J].干旱地区农业研究,2013,31(3):73-77.

[23] 岳 燕,郭维娜,林启美,等.加入不同量生物质炭盐渍化土壤盐分淋洗的差异与特征[J].土壤学报,2014,51(4):914-919.

[24] 唐光木,姚红宇,蒲胜海,等.棉杆炭对灰漠土性质的影响[J].新疆农业科学,2015,52(9):1680-1686.

[25] Kishimoto S, Sugiura G. Chareoal as a soil conditioner[J]. Int Achieve Future, 1985,5:12-23.

[26] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review[J]. Biologiy Fertility of Soils, 2002,35:219-230.

[27] 舒卫国,陈受宜.植物在渗透胁迫下基因表达及信号传递[J].生物工程进展,2000,20(3):3-6.

[28] 马焕成,王沙生.胡杨膜系统的盐稳定性及盐胁迫下的代谢调节[J].西南林学院学报,1998,18(1):15-23.

[29] 陈贻竹,帕特森.低温对植物叶片中超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和过氧化物酶水平的影响[J].植物生理学报,1988,14(4):323-328.

[30] 顾红雅.植物基因与分子操作[M].北京:北京大学出版社,1995.

[31] 罗广华,王爱国,邵从本,等.超氧化物歧化酶在植物细胞内的分布[J].植物生理学报,1985,(2):53-60.