

DOI: 10.5846/stxb202010012532

贾毅, 张松林. 南水北调中线工程途经区生态服务价值的时空变化. 生态学报, 2021, 41(18): 7226-7237.

Jia Y, Zhang S L. Spatio-temporal changes of static and dynamic ecosystem service values in the passing area of the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Diversion Project. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 7226-7237.

## 南水北调中线工程途经区生态服务价值的时空变化

贾 毅, 张松林\*

西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

**摘要:**南水北调中线工程是我国迄今为止最重要的跨流域调水工程,为沿线二十四个大中城市提供了紧缺的生产和生活用水。但是,迄今为止人们对调水影响下南水北调中线工程途径区生态服务价值的动态变化过程所知甚少,阻碍了人们对该工程生态效益的科学评估与沿线土地资源的合理利用。南水北调中线工程建成前后的生态服务价值变化研究有助于沿线土地的合理规划和科学利用。为此,首先基于改进的当量因子法分析了 2000、2005、2010、2015、2018 年研究区生态服务的静态价值时空变化,然后利用优先指数重构了研究区生态服务的动态价值并探讨了其时空演变的特征。结果表明:① 2000—2018 年,研究区生态服务的总价值先减后增,2018 年达到峰值。研究区生态服务价值的增长在一定程度上归因于南水北调中线工程的影响。② 研究区水文调节功能价值占总价值的比例最高,约占 30%,养分循环功能的价值占比最低,约为 1%;各年份林地、草地、耕地和水体均为研究区生态服务总价值的主要构成部分。③ 2000—2018 年,研究区生态服务价值空间分布存在明显差异,自西部向东部递减,调水后北京市和天津市的高值区增加。④ 研究区生态服务的动态总价值( $1.38 \times 10^{12}$  元)只有静态总价值( $2.58 \times 10^{12}$  元)的一半,主要是由于动态与静态生态服务的价值系数差别较大。因此,应重视土地利用类型变化和薄弱生态服务功能对生态服务总价值的影响,优化土地利用结构,对南水北调中线工程沿线周边开展针对性保护,以稳步提升整个区域生态服务的总价值。

**关键词:**生态服务价值;动态重构;时空格局;南水北调中线工程途径区

## Spatio-temporal changes of static and dynamic ecosystem service values in the passing area of the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Diversion Project

JIA Yi, ZHANG Songlin\*

College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

**Abstract:** The Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project (MRSNWDP) is the most important inter-basin water diversion project in China so far, and provides the scarce production and domestic water for 24 large and medium-sized cities along the route. However, the dynamic change process of the ecosystem service value of the project was studied so inadequate that hindered the scientific evaluation of the project ecological benefits and the rational use of land resources. The study on changes in the value of ecological services before and after the completion of the MRSNWDP is helpful to the rational planning and scientific use of land along the route. This paper analyzed the temporal and spatial changes of the static value of ecological services of the project in 2000, 2005, 2010, 2015 and 2018 based on the improved equivalent factor method, and then reconstructed the dynamic value of its ecological services with the priority index, and discussed its temporal and spatial evolution characteristics. The results showed that: ① from 2000 to 2018, the total value of ecological

基金项目:国家自然科学基金项目(51068025)

收稿日期:2020-10-01; 网络出版日期:2021-06-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangsonling65@163.com

services in the study area first decreased and then increased, and reaching its peak in 2018. The increase in the value of ecological services in the study area can be attributed to the impact of the MRSNWDP to a certain extent. ② The value of the hydrological regulation function was the highest, accounting for 30% of the total value, and that of the nutrient cycle function was the lowest, accounting for only 1%. The forest land, grassland, cultivated land and water body were the main components of the total value of ecological services in the study area in each year. ③ The spatial distribution of ecological service values in the study area was significantly different from 2000 to 2018, which decreased from the west to the east. The high-value areas in Beijing and Tianjin increased after water diversion. ④ The total dynamic value of ecological services in the study area was  $1.38 \times 10^{12}$  Yuan, which was lower than the static total value of  $2.58 \times 10^{12}$  Yuan, due to the value coefficient of dynamic and static ecological services is quite different. Therefore, we should pay attention to the impact of changes in land use types and weak ecological service functions on the total value of ecological services, optimize the structure of land use, and carry out targeted protections along the MRSNWDP to steadily improve the total value of ecological services in the entire region.

**Key Words:** ecosystem services value; dynamic reconstruction; spatio-temporal changes; passing area of MRSNWDP

生态系统服务(以下简称生态服务)是人类赖以生存和发展的物质基础<sup>[1]</sup>。生态系统服务价值(以下简称生态服务价值)是生态服务功能的货币化形式<sup>[2]</sup>。土地利用/覆被变化(Land Use/Land Cover, LULC)导致生态系统改变、进而导致生态服务价值变动<sup>[3]</sup>。因而,研究 LULC 引起的各类生态服务价值变化有助于区域的生态服务质量分析、问题辨识和可持续发展。

20 世纪 70 年代初, Daily 系统介绍了生态服务功能的概念与作用<sup>[4]</sup>, Constanza 等细分了生态服务的类型,提出了定量评估方法,推动了生态服务量化研究<sup>[5]</sup>。目前的生态服务研究侧重于功能分类<sup>[6-9]</sup>、驱动力研究<sup>[10]</sup>和价值预测<sup>[11-12]</sup>,特别是土地利用类型变化对生态服务价值影响的研究更受关注<sup>[13-15]</sup>;研究范围包括国家<sup>[1]</sup>、区域<sup>[16-19]</sup>、省<sup>[10,14,20-21]</sup>和市<sup>[2,11-12,22,24-25]</sup>,乃至村镇<sup>[23]</sup>。然而,针对大型水利工程对途经区生态服务功能价值影响的研究较少。

大多数学者选用谢高地等修改的当量因子法<sup>[7]</sup>。该方法虽然简单易算,但是没有考虑自然环境异质性导致的生态服务价值核算复杂性。若将各生态服务功能等量齐观,就会忽视损失量较多的服务功能、进而显著影响区域生态服务功能的整体发挥<sup>[26]</sup>。

南水北调中线工程建成前后的生态服务价值变化研究有助于沿线土地的合理规划和科学利用。本文基于 2000—2018 年南水北调中线工程途径区的土地利用类型变化情况,运用改进后的当量因子法和构建的优先指数,探讨生态服务静态价值的时空特征和动态价值的变化趋势,为研究区土地资源可持续利用和针对性生态环境保护提供科学依据。

## 1 研究区概况

南水北调中线工程途径区(图 1)位于  $31.7^{\circ}$ — $41.6^{\circ}$ N,  $105.51^{\circ}$ — $118.06^{\circ}$ E, 面积  $286176.22 \text{ km}^2$ , 含四省(湖北、陕西、河南和河北省)22 个地级市和 2 个直辖市(北京和天津),2018 年总人口 16492.04 万人;区内大部属温带季风气候,80%为平原,主要土地利用类型为耕地和林地。其中,陕西省汉中市、安康市、商洛市和湖北省十堰市是南水北调中线工程的核心水源供给区,北京市、天津市、河北省和河南省大部为南水北调中线工程的核心水源接收区。渠首位于湖北省丹江口水库,总干渠 1276.414 km,天津段 155.531 km;截至 2020 年 11 月 1 日,累计输水 340.53 亿  $\text{m}^3$ ;其中,2019 年底北京市地下水平均埋深提升近 3 m,2020 年 8 月底河北省浅层地下水位提升 1.07 m,深层地下水位提升 11.67 m,调水效果显著<sup>[27-30]</sup>。

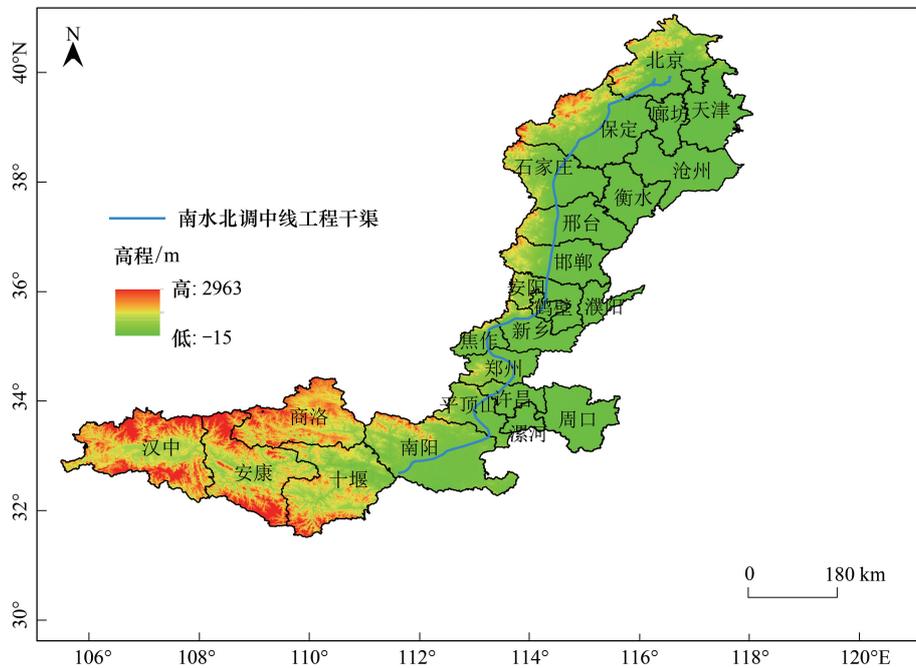


图1 研究区示意图

Fig.1 Sketch map of study area

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

研究区基于2000、2005、2010年的Landsat/ETM, 2015、2018年的Landsat 8的土地利用数据以及行政边界矢量数据源自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。土地利用数据可直接使用,无需转换。由遥感影像生成的土地利用图位置误差平均小于50 m,图斑判读正确率98.7%,土地利用一级类型分类综合评价精度93%以上,二级类型分类综合评价精度90%以上<sup>[31-33]</sup>。

本文将土地利用类型数据在ArcGIS 10.2中重分类为耕地、林地、草地、水体、城乡建设用地和未利用地,将生态服务细分为食物生产、原料生产、水资源供给、气体调节、气候调节、净化环境、水文调节、土壤保持、养分循环、生物多样性和美学景观十一类<sup>[9]</sup>。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 静态生态服务价值核算

基于谢高地等提出的陆地生态服务价值当量因子<sup>[7-9]</sup>,参考朱九龙等<sup>[34]</sup>和林栋等<sup>[22]</sup>的城乡建设用地价值系数,本文对价值当量表进行了适度的修正,提出适合于研究区实际的价值当量表(表1)。

考虑到研究区大部属于我国的粮食主产区,故使用全国粮食单价。2000—2018年我国粮食单产4982.003 kg/hm<sup>2</sup>,按照2018年国家发改委规定的粮食最低收购价,只考虑早籼稻、中晚稻、粳稻和小麦,得出单位面积粮食价格为12230.82元,由此研究区一个生态服务价值的当量因子(即价值系数)为1747.14元/hm<sup>2</sup><sup>[13]</sup>,以此类推得到研究区各项生态服务价值的系数(表1)。

采用以下公式计算研究区的静态生态服务价值<sup>[5]</sup>:

$$ESV = \sum A_k \times VC_k \quad (1)$$

$$ESV_f = \sum A_k \times VC_{fk} \quad (2)$$

式中,ESV为研究区生态服务价值; $A_k$ 为研究区第 $k$ 类土地利用类型的面积, $VC_k$ 为第 $k$ 种土地利用类型生态

服务功能的价值系数,即单位面积生态系统的服务价值( $\text{元 hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ );  $ESV_f$ 为生态系统第  $f$  项服务功能的价值; $VC_{jk}$ 为研究区第  $k$  种土地利用类型第  $f$  项服务功能的价值系数。

表 1 研究区不同利用类型土地和各项生态服务功能的价值系数/(元/hm<sup>2</sup>)

Table 1 Value coefficients of different land use types and ecological service functions in the study area

生态服务功能 Ecological service functions	耕地 Farmland	林地 Forestland	草地 Grassland	水体 Waterbody	城乡建设用地 Urban & rural construction land	未利用地 Unused land
食物生产 Food production	1930.59	441.15	1223.00	2288.76	0.00	8.74
原料生产 Raw materials production	428.05	1013.34	599.27	424.56	0.00	26.21
水资源供给 Water supply	-2280.02	524.14	331.96	7600.07	0.00	17.47
气体调节 Gas regulation	1554.96	3332.68	2114.04	1659.79	0.00	113.56
气候调节 Climate regulation	812.42	9971.82	5573.39	3738.89	0.00	87.36
净化环境 Environment cleaning	235.86	2922.10	1834.50	5416.14	0.00	358.16
水文调节 Hydrological regulation	2611.98	6525.58	4088.31	79547.41	0.00	209.66
土壤保持 Soil conservation	1004.61	4057.74	2568.30	1886.91	0.00	131.04
养分循环 Nutrient cycle	270.81	310.12	197.43	145.01	0.00	8.74
生物多样性 Biodiversity	297.01	3695.21	2341.17	6080.06	0.00	122.30
美学景观 Aesthetic landscape	131.04	1620.48	1030.81	3913.60	524.14	52.41

### 2.2.2 静态服务价值敏感性

为验证静态服务价值估算结果的合理性及其变化趋势对价值系数的依赖度,本文参考利润敏感系数概念,将各项生态服务的价值系数分别上调 50%,计算敏感指数(coefficient of sensitivity,  $CS$ )<sup>[35-36]</sup>:

$$CS = \left| \frac{\frac{(ESV_j - ESV_i)}{ESV_i}}{\frac{(VC_{jk} - VC_{ik})}{VC_{ik}}} \right| \quad (3)$$

式中, $ESV_i$ 和  $ESV_j$ 分别为调整前后的生态服务价值, $VC_{ik}$ 和  $VC_{jk}$ 分别为第  $k$  类土地利用类型调整前后的生态服务价值系数。若  $CS > 1$ ,则生态服务价值对其价值系数的敏感度高,可信度低;若  $CS = 1$ ,则不敏感,一般不采纳;若  $CS < 1$ ,则敏感度低,结果可信。

### 2.2.3 静态服务总价值时空分布特征

使用 ArcGIS 10.2 平台,根据研究区实际情况建立 5 km×5 km 网格,基于土地利用数据计算每个格网的生态服务静态价值;依据自然间断点分级法(Jenks)对其分级,一级最低,五级最高,制作空间分布图<sup>[15,37-40]</sup>。

### 2.2.4 动态价值重构

生态服务价值具有动态变动性且各类生态服务功能的供给能力差异性较大<sup>[41]</sup>,需要对快速退化的生态服务功能优先保护。为此,本文以每种生态服务价值的多年平均变化率和分层聚类权重<sup>[26,41-43]</sup>构建优先指数,对生态服务静态价值进行动态重构,以克服原有生态服务价值核算的局限性。优先指数的计算公式为:

$$\beta_i = \frac{v_i}{\bar{v}_i} C_i \quad (4)$$

式中, $\beta_i$ 为第  $i$  项生态服务功能的优先指数, $v_i$ 为第  $i$  项生态服务功能静态价值的多年平均变化率, $\bar{v}_i$ 为  $v_i$  的平均值。 $C_i$ 为第  $i$  种生态功能价值的聚类分析权重,使用 Origin 2018 软件计算。

研究区生态服务动态价值  $ESV_D$  的计算公式为:

$$ESV_D = \sum_1^9 ESV_f \times \beta_i \quad (5)$$

### 3 结果

#### 3.1 不同利用类型土地的时空分布特征

表 2 和图 2 表明,研究区土地总面积随着时间延续虽有增减但是变化不大。图 2 和图 3 表明,2000—2018 年,研究区耕地和草地面积均减少。耕地面积的降幅最大,2015—2018 年降幅 2.91%。林地、水体和城乡建设用地面积均不同程度增加。其中,城乡建设用地面积的增幅最大,2015—2018 年 88.0%的城建用地源于耕地;未利用地占比最小但是波幅较大。土地利用格局变动会对生态服务功能发挥造成影响。

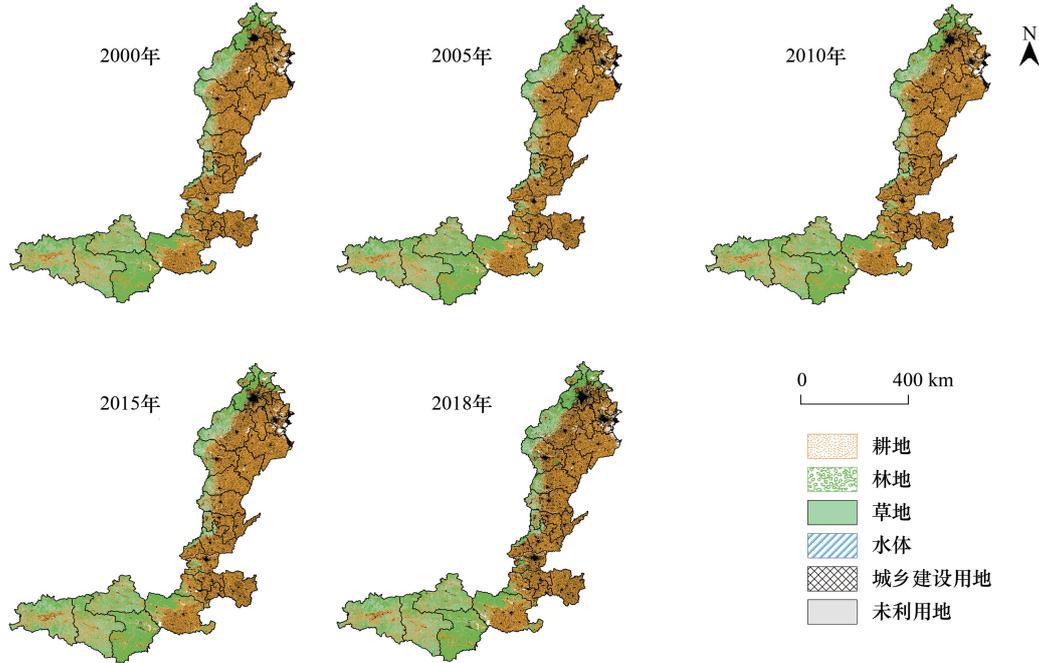


图 2 2000—2018 年研究区不同利用类型土地的面积变化趋势

Fig.2 The area change trend of different land use types in the study area from 2000 to 2018

表 2 2000—2018 年研究区不同利用类型土地的面积及其变化状况/hm<sup>2</sup>

Table 2 The area and change status of different land use types in the study area from 2000 to 2018

	耕地 Farmland	林地 Forestland	草地 Grassland	水体 Water body	城乡建设用地 Urban & rural construction land	未利用地 Unused land	合计 Total
2000 年	15466200	6523400	4795400	678700	2453400	50400	29967500
2005 年	15288400	6524900	4799900	685000	2628100	41200	29967500
2010 年	15227500	6525500	4792700	689200	2693900	38700	29967500
2015 年	15120700	6511900	4784300	690000	2822600	27300	29956800
2018 年	14253900	6683900	4754000	711800	3500200	66600	29970400
起止变化率/% Starting and ending rate of change	-7.84	2.46	-0.86	4.88	42.67	32.14	0.01
年均变化率/% Average annual rate of change	-0.41	0.13	-0.05	0.26	2.25	1.69	0.00

#### 3.2 静态生态服务价值演变

##### 3.2.1 生态服务总价值变化

由图 4 可知,2000—2018 年,研究区生态服务的静态总价值呈增长态势,从 2000 年的  $5.1558 \times 10^{11}$  元下降

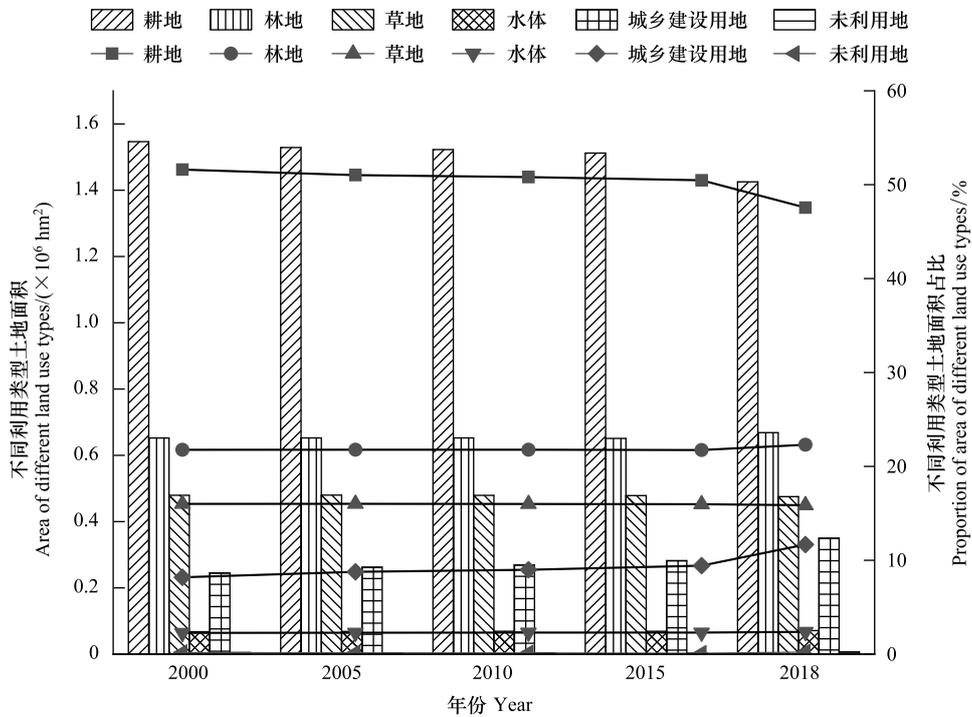


图3 2000—2018年研究区不同利用类型土地的面积及其占比

Fig.3 The area and its proportion of different land use types in the study area from 2000 to 2018

到2015年的 $5.1397 \times 10^{11}$ 元,再上升到2018年的 $5.1601 \times 10^{11}$ 元,19年间的变化率为0.084%;生态服务价值略有起伏,差异不大。

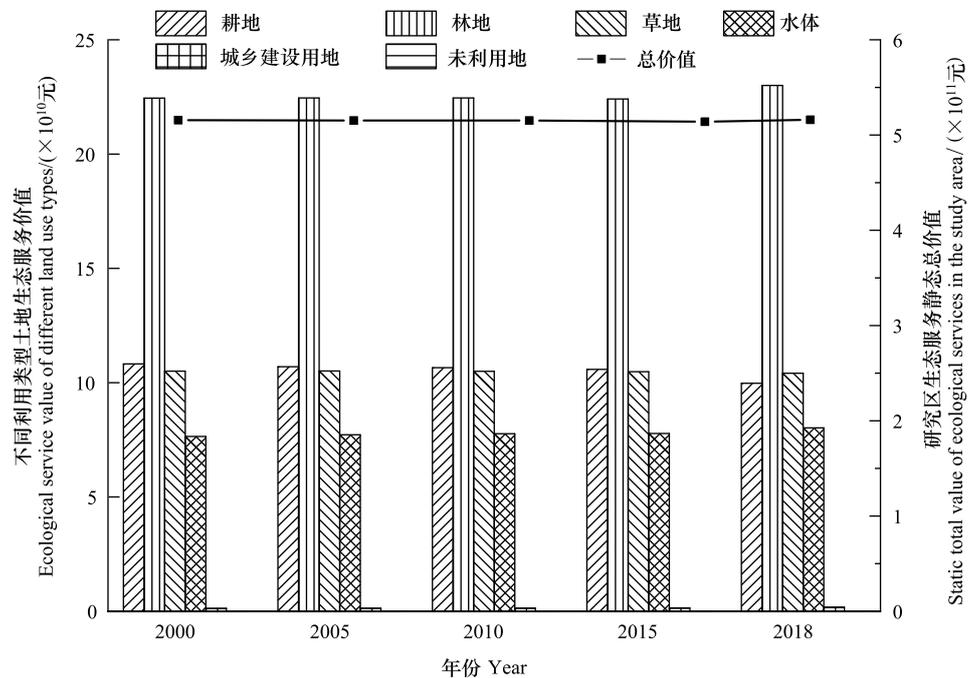


图4 2000—2018年各利用类型土地的生态服务价值与总价值

Fig.4 Changes of ecosystem service value and total value of various land use types from 2000 to 2018

图 5 表明,不同利用类型土地的生态服务价值年际变化呈波动状态:耕地和草地均呈减少趋势,而林地、城乡建设用地、水体和未利用地总体呈现增加趋势。2000—2015 年,耕地和未利用地均为负增长;水体和城乡建设用地均为正增长,增长率由 0.11%—7.12% 不等。而 2015—2018 年,除耕地和草地外的其它四类土地类型的生态服务价值均为正增长,城乡建设用地增长率为 24.01%;2000—2018 年,除城乡建设用地和未利用地之外,水体是变化率最大的土地利用类型,变化率为 4.88%。

研究区生态服务提供主体从大到小依次为:林地>耕地>草地>水体>城乡建设用地>未利用地。林地和草地均为研究区各年份生态服务价值的主要部分,19 年间林地生态服务价值一直占据多数(46.65%—48.25%),增幅最明显( $2.50 \times 10^{11}$  元),而未利用地的增幅最少( $1.99 \times 10^8$  元)。2000—2015 年,研究区生态服务价值呈现负增长,主要是由于耕地、林地与草地面积大幅减少;而 2015—2018 年间,林地与水体面积逐步上升,使研究区生态服务价值增长。2000—2015 年间水体面积小幅增加,增幅为 1.67%,2015—2018 年间增幅明显,为 3.16%,增加值为 2000—2015 年间增加值的 1.89 倍,可能是 2014 年 12 月 12 日南水北调中线工程全线贯通正式运营后输水对途经区水体面积增加的贡献,使得其生态服务价值增加,尤其在南水北调中线工程开工并正式输水(2014 年 12 月)之后增加明显,2015—2018 年增加量为  $2.457 \times 10^9$  元,是 2000—2015 年增加量的 1.93 倍。

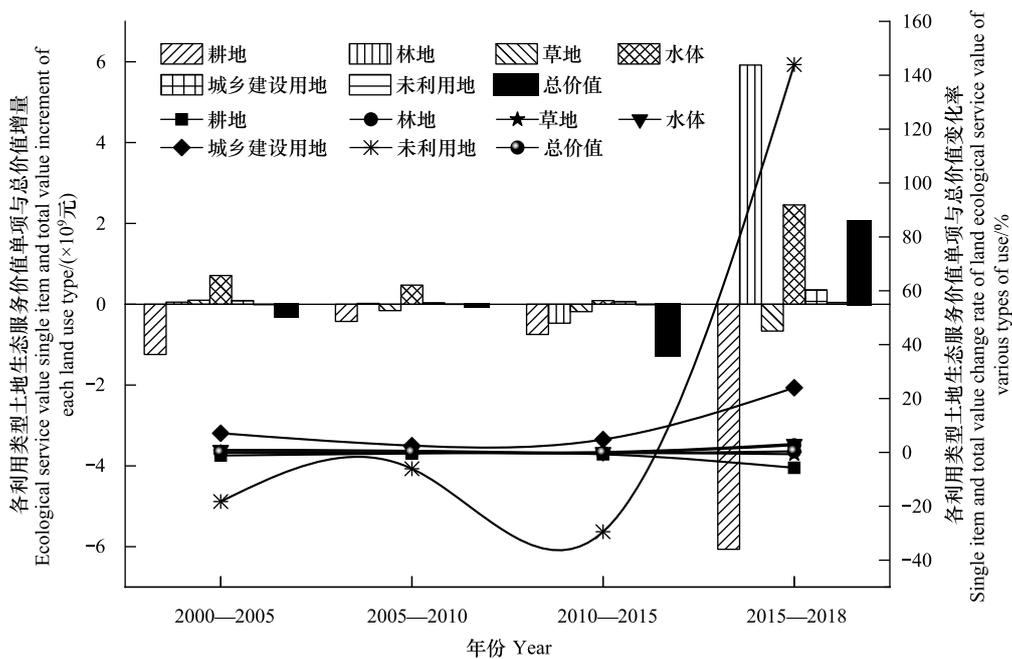


图 5 2000—2018 年研究区各利用类型土地生态服务价值单项与总价值的增量及其变化率

Fig.5 The increment and change rate of individual and total value of eco-service value of different land use types in the study area from 2000 to 2018

### 3.2.2 静态生态服务价值的敏感性分析

研究区历年各利用类型土地静态生态服务价值的敏感性指数均低于 1,表明其对价值系数的敏感性较低、缺乏弹性,因而可信(表 3)。

### 3.2.3 不同利用类型土地单项生态服务功能价值的变化

由图 6 可知,2000—2018 年,研究区生态服务价值中占比最高的是水文调节功能,约为 30.37%—30.44%;养分循环的生态服务价值占比最低,约为 1.35%—1.41%。2000—2015 年,食物生产、原料生产、气体调节、净化环境、气候调节、水文调节、气候调节、生物多样性、土壤保持和养分循环均呈减少趋势;2015—2018 年,水资源供给、气候调节、净化环境、水文调节、养分循环、生物多样性与美学景观均为正增长。而由于耕地

流失导致食物生产价值的下降最显著,为 5.59%。气体调节、气候调节、土壤保持和养分循环等的生态服务价值均小幅减少,导致研究区生态服务的总价值降低。水文调节与水资源供给在 2015—2018 年增加量分别为  $4.7683 \times 10^8$  元和  $2.2228 \times 10^9$  元,增加率分别为 3.04% 和 9.17%,部分归因于南水北调中线工程调水,2015—2018 年水体面积增加值为 2000—2015 年间增加值的 1.89 倍(图 6)。

表 3 研究区不同利用类型土地静态生态服务价值的敏感指数

Table 3 The sensitivity index of static ecological service value of different land use types in the study area

年份 Year	耕地 Farmland	林地 Forestland	草地 Grassland	水体 Water body	城乡建设用地 Urban & rural construction land	未利用地 Unused land
2000	0.1050	0.2177	0.1019	0.0741	0.0012	0.00005
2005	0.1038	0.2179	0.1020	0.0749	0.0013	0.00004
2010	0.1034	0.2179	0.1019	0.0754	0.0014	0.00004
2015	0.1029	0.2180	0.1019	0.0757	0.0014	0.00003
2018	0.0966	0.2229	0.1009	0.0777	0.0018	0.00007

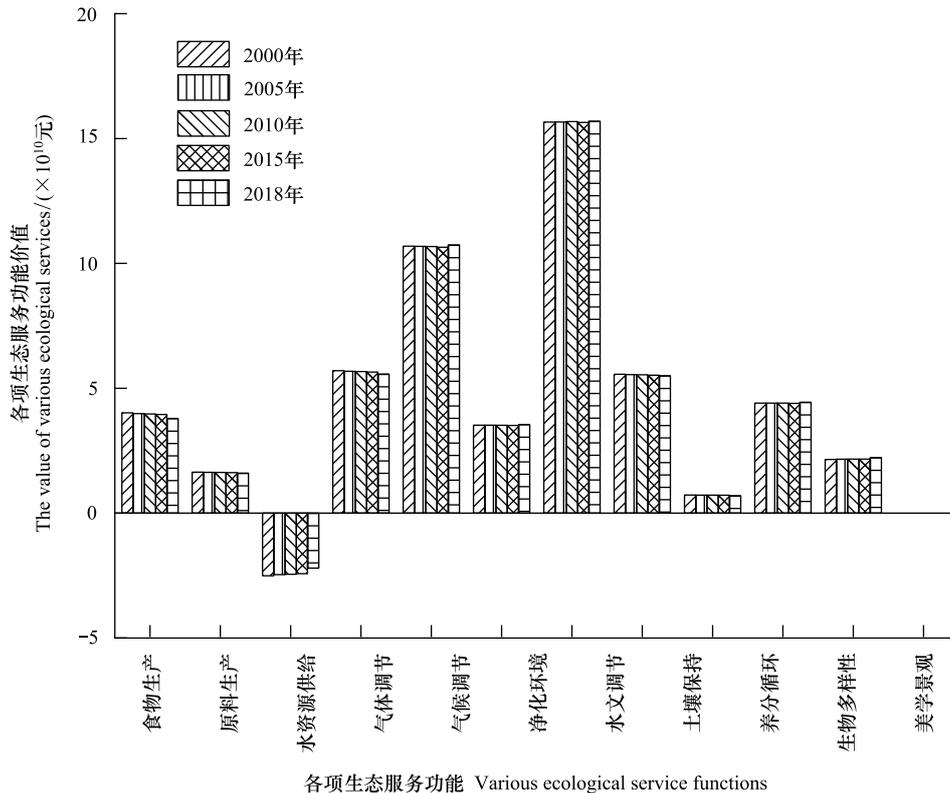


图 6 2000—2018 年研究区各项生态服务功能价值的变化

Fig.6 Change of different ecological service function value in the study area from 2000 to 2018

### 3.2.4 生态服务静态总价值的时空分布特征

图 7 表明,2000—2018 年,研究区生态服务静态总价值的空间分布差异明显,总体来看西高东低。对照研究区高程状况(图 1)可知,高值区主要集中在海拔较高的西南部水源核心供给区,即十堰市、汉中市、安康市、商洛市和南阳市西部,是因为主要土地类型为林地和水体,森林覆盖率高,水体面积广;低值区主要位于地形较为平坦的平原区和城市群,即河南省和河北省大部,是因为主要土地类型为耕地和城乡建设用地,人类活动强度较大。

从 2000—2018 年,研究区低价值区的面积略有减少,但是分布区域相对固定;高值区的面积逐步增加,尤

其是大规模调水后河南省和河北省大部分地区都出现了零星分布于调水线路周边的高值区;核心调入区北京市和天津市的高值区增加度更明显,北京市北部高值区数量增加,天津市低值洼地周边出现了 3 个明显的高值区。

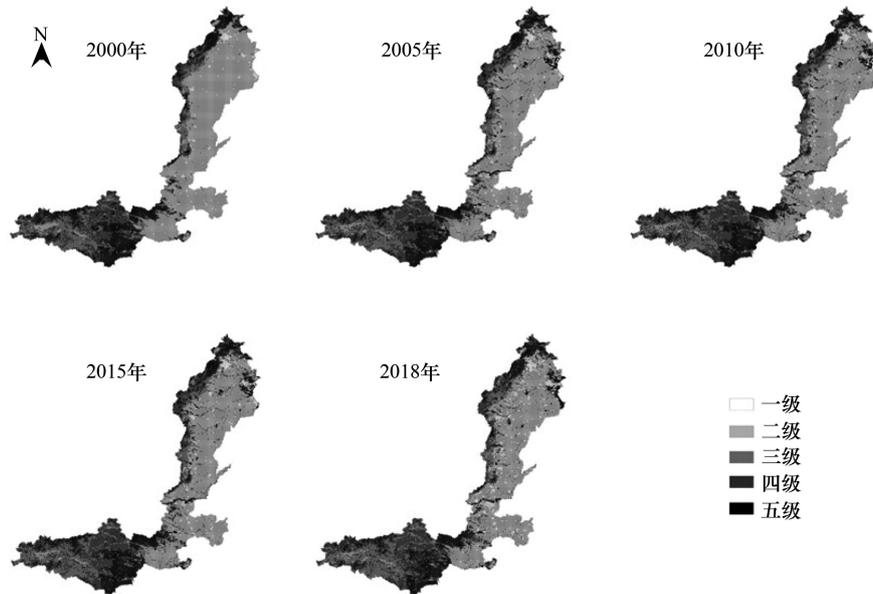


图 7 2000—2018 年研究区静态服务总价值的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of total static service value in the study area from 2000 to 2018

### 3.3 生态服务动态价值

研究区各生态服务功能的优先指数见表 4。从 2000—2018 年,研究区水资源供给、气候调节和水文调节的优先指数较低,食物生产、美学景观和原料生产的优先指数较高,表明后三种生态服务功能的供给能力有所下降,需要针对性保护以提高其服务能力;而前三者的供给能力有所增强,需要持续维护。研究区 2000—2018 年生态服务功能的动态总价值为  $1.38 \times 10^{12}$  元,显著低于静态总价值 ( $2.58 \times 10^{12}$  元),主要是由于动态与静态生态服务的价值系数差别较大。

表 4 研究区各生态服务功能的优先指数

Table 4 Priority index of each ecological service function in the study area

生态服务功能 Ecological service functions	优先指数 Priority index	生态服务功能 Ecological service functions	优先指数 Priority index
食物生产 Food production	2.36	水文调节 Hydrological regulation	0.03
原料生产 Raw materials production	1.12	土壤保持 Soil conservation	0.65
水资源供给 Water supply	-5.18	养分循环 Nutrient cycle	-0.52
气体调节 Gas regulation	0.10	生物多样性 Biodiversity	-0.35
气候调节 Climate regulation	-0.23	美学景观 Aesthetic landscape	1.35
净化环境 Environment cleaning	0.22		

与图 6 相比,研究区气候调节、土壤保持、养分循环和生物多样性的动态价值减少,而食物生产、原料生产、水资源供给、气体调节、水文调节、净化环境和美学景观的动态价值增加。不同服务功能价值对研究区动态总价值的贡献大小不一。研究区耕地面积近半且降幅明显,因此其食物生产和土壤保持功能对研究区生态服务的动态价值与总价值均影响较大,今后要注意维持耕地的数量相对稳定,提高粮食单产,提升食物生产与土壤形成与保护的生态服务功能价值,以维护研究区生态服务供给的平衡<sup>[38]</sup>。可见,生态服务静态价值重构

可充分体现其单项生态服务功能贡献的相对重要性和动态变化性;静态价值与动态价值相结合的分析方法更能全面反映研究区生态服务功能的变化趋势,为生态环境针对性保护与合理利用提供科学依据(表 5)。

表 5 重构后的研究区各生态服务功能的动态价值/元

Table 5 Dynamic value of each ecological service function in the study area after reconstruction

生态服务功能 Ecological service functions	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2018 年
食物生产 Food production	$9.466 \times 10^{10}$	$9.39 \times 10^{10}$	$9.363 \times 10^{10}$	$9.311 \times 10^{10}$	$8.94 \times 10^{10}$
原料生产 Raw materials production	$1.841 \times 10^{10}$	$1.83 \times 10^{10}$	$1.83 \times 10^{10}$	$1.823 \times 10^{10}$	$1.8 \times 10^{10}$
水资源供给 Water supply	$1.3 \times 10^{11}$	$1.277 \times 10^{11}$	$1.268 \times 10^{11}$	$1.256 \times 10^{11}$	$1.14 \times 10^{11}$
气体调节 Gas regulation	$5.719 \times 10^9$	$5.694 \times 10^9$	$5.684 \times 10^9$	$5.661 \times 10^9$	$5.58 \times 10^9$
气候调节 Climate regulation	$-2.507 \times 10^{10}$	$-2.505 \times 10^{10}$	$-2.504 \times 10^{10}$	$-2.498 \times 10^{10}$	$-2.52 \times 10^{10}$
净化环境 Purify the environment	$7.851 \times 10^9$	$7.851 \times 10^9$	$7.85 \times 10^9$	$7.832 \times 10^9$	$7.92 \times 10^9$
水文调节 Hydrological regulation	$5.078 \times 10^9$	$5.08 \times 10^9$	$5.084 \times 10^9$	$5.073 \times 10^9$	$5.09 \times 10^9$
土壤保持 Soil conservation	$3.605 \times 10^{10}$	$3.595 \times 10^{10}$	$3.591 \times 10^{10}$	$3.579 \times 10^{10}$	$3.57 \times 10^{10}$
养分循环 Nutrient cycle	$-3.802 \times 10^9$	$-3.778 \times 10^9$	$-3.769 \times 10^9$	$-3.751 \times 10^9$	$-3.65 \times 10^9$
生物多样性 Biodiversity	$-1.54 \times 10^{10}$	$-1.54 \times 10^{10}$	$-1.54 \times 10^{10}$	$-1.536 \times 10^{10}$	$-1.55 \times 10^{10}$
美学景观 Aesthetic landscape	$2.892 \times 10^{10}$	$2.906 \times 10^{10}$	$2.911 \times 10^{10}$	$2.914 \times 10^{10}$	$2.99 \times 10^{10}$

#### 4 讨论

综合比较可操作性、对比性和经济性,谢高地等基于 Costanza 等研究结果修正的当量因子法更适合于中国生态服务价值评估的实际<sup>[5,9]</sup>。但是,由于当量因子法未细分单项生态服务功能,未区分各单项生态服务功能的贡献权重<sup>[41]</sup>。本文基于优先指数对生态服务静态价值进行重构,根据动态价值判断其保护的优先级别,以对薄弱的单项生态服务功能进行针对性保护,弥补了现有当量因子法的不足。

孙东琪等<sup>[44]</sup>研究发现,2000—2005 年中国的生态环境质量趋于恶化但恶化趋势减缓;2005—2010 年中国的生态环境质量仍较差但恶化态势明显趋缓且局部有所改善;本文的研究结果与之吻合。

然而,受数据获取限制,本文未对南水北调中线工程导致的各省市生态服务价值变化进行详细分析;受数据源分辨率和分类精度影响,也未对同一土地利用类型进行二级细分,而是将水田和旱地等整合为耕地,导致这类土地生态服务的价值系数存在偏差;同时,生态服务功能的价值系数赋值也有一定的主观性,导致生态服务价值核算误差<sup>[45]</sup>。

社会因素和自然因素同时影响着生态服务功能的维持和供给,社会因素中的人口数量与质量、经济发展水平、城镇化率和政策等因素都会导致研究区生态服务价值产生变动,其中政策因素直接影响、甚至决定着土地利用结构的变化方向,导致土地利用类型变化,使研究区单项与总的生态服务价值变化<sup>[2]</sup>。不同的土地利用强度也会影响生态系统服务的价值<sup>[46]</sup>。本文仅从土地利用变化角度探讨区域生态服务价值时空分布特征及其影响因素,未能充分识别社会经济因素的作用。

#### 5 结论

生态服务价值的合理估算可以判断区域生态系统和生态服务功能的强弱。本文基于改进后的当量因子法评估了南水北调中线工程途经区 2000—2018 年生态服务价值的时空变化,应用优先指数对生态服务静态价值进行重构得到了生态服务的动态价值。结果表明:

(1)2000—2018 年研究区生态服务静态价值略有增加,2018 年达到峰值。19 年间各利用类型土地的生态服务价值差距较大,森林的最高,未利用地的最低;耕地和草地的连续减少,水体和城乡建设用地的连续增加;水文调节服务价值的贡献率最高。(2)2000—2018 年研究区生态服务静态价值的空间分布差异明显,自

西部向东部递减,北京市和天津市调水后高值区增加。(3)2000—2018年研究区生态服务功能的动态总价值仅有低于静态总价值的一半,主要是由于动态与静态生态服务的价值系数差别较大。

因此,应重视土地利用类型变化和薄弱生态服务功能对生态服务总价值的影响,优化土地利用结构,开展针对性保护,以稳步提升整个区域生态服务的总价值。

#### 参考文献(References):

- [1] 谢高地,张彩霞,张昌顺,肖玉,鲁春霞.中国生态系统服务的价值.资源科学,2015,37(9):1740-1746.
- [2] 周文霞,石培基,王永男,梁变变,唐笑.河谷型城市生态系统服务价值效应——以兰州为例.干旱区研究,2017,34(1):232-241.
- [3] 刘钢.川西南山地土地利用变化的生态环境效应研究[D].雅安:四川农业大学,2012.
- [4] Daily G C. 1997. Nature's Services; Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington, DC: Island Press.
- [5] 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.
- [6] Wang J L, Zhou W Q, Pickett S T A, Yu W J, Li W F. A multiscale analysis of urbanization effects on ecosystem services supply in an urban megaregion. Science of The Total Environment, 2019, 662:824-833.
- [7] 谢高地,鲁春霞,冷允法,郑度,李双成.青藏高原生态资产的价值评估.自然资源学报,2003,18(2):189-196.
- [8] 谢高地,甄霖,鲁春霞,肖玉,陈操.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法.自然资源学报,2008,23(5):911-919.
- [9] 谢高地,张彩霞,张雷明,陈文辉,李士美.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进.自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
- [10] 程静,黄越.宁夏回族自治区生态系统服务价值时空演变及其驱动力.水土保持研究,2021,28(2):382-389.
- [11] 李龙,吴大放,王芳,刘艳艳,刘毅华,钱乐祥.中国快速城市化区域生态系统服务价值预测及权衡研究——以佛山市为例.生态学报,2020,40(24):9023-9036.
- [12] 程媛媛,周汉磊,潘胜强,刘琦,周海江,周天鹏,陈德超,伍燕南.苏州市2000—2014年生态系统服务价值及灰色模型预测研究.苏州科技大学学报:自然科学版,2020,37(1):58-65.
- [13] 卢龙辉,陈福军,许月卿,黄安,黄玲.京津冀"生态系统服务转型"及其空间格局.自然资源学报,2020,35(3):532-545.
- [14] 王宁,杨光,韩雪莹,贾光普,刘峰,李涛,贾宁.内蒙古1990-2018年土地利用变化及生态系统服务价值.水土保持学报,2020,34(5):244-250.
- [15] 李涛,甘德欣,杨知建,王宽,齐增湘,李晖,陈希.土地利用变化影响下洞庭湖地区生态系统服务价值的时空演变.应用生态学报,2016,27(12):3787-3796.
- [16] 田义超,白晓永,黄远林,张强,陶进,张亚丽.基于生态系统服务价值的赤水河流域生态补偿标准核算.农业机械学报,2019,50(11):312-322.
- [17] Wang Z Y, Cao J S, Zhu C Y, Yang H. The impact of land use change on ecosystem service value in the upstream of Xiong'an new area. Sustainability, 2020, 12(14):5707.
- [18] Song F, Su F L, Mi C X, Sun D. Analysis of driving forces on wetland ecosystem services value change: a case in Northeast China. Science of The Total Environment, 2021, 751:141778.
- [19] Jiang W, Lü Y H, Liu Y X, Gao W W. Ecosystem service value of the Qinghai-Tibet Plateau significantly increased during 25 years. Ecosystem Services, 2020, 44:101146.
- [20] 王彦芳,刘敏,郭英,董鸿振.河北省生态环境支撑区生态系统服务价值评估.水土保持通报,2019,39(2):309-316.
- [21] Xing L, Hu M S, Wang Y. Integrating ecosystem services value and uncertainty into regional ecological risk assessment: a case study of Hubei Province, Central China. Science of the Total Environment, 2020, 740:140126.
- [22] 林栋,马晖玲,任正超,李元恒.基于LUCC的兰州城市生态系统服务价值动态分析.生态科学,2016,35(2):134-142.
- [23] 姜栋栋,马伟波,邹凤丽,李海东,张龙江,刘桂建.乡镇尺度大娄山区生态系统服务价值时空变化研究.环境科学研究,2020,33(12):2713-2723.
- [24] 陈永春,邓国志.资源型城市土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以安徽省淮南市为例.水土保持通报,2018,38(4):247-252.
- [25] 张学斌,罗君,石培基,周亮.格网尺度下张掖生态系统服务价值时空演变及地形梯度分异特征.应用生态学报,2020,31(2):543-553.
- [26] 王云,潘竟虎.基于生态系统服务价值重构的干旱内陆河流域生态安全格局优化——以张掖市甘州区为例.生态学报,2019,39(10):3455-3467.
- [27] 北京市水务局.北京市水资源公报2014.北京:北京市水务局,2014.

- [28] 北京市水务局. 北京市水资源公报 2019. 北京:北京市水务局, 2019.
- [29] 河北省水利厅. 河北省水资源公报 2014. 河北:河北省水利厅, 2014.
- [30] 赵红梅. 河北浅层地下水水位同比上升 0.45 米. (2020-09-25)[2020-09-26]. [http://hebei.hebnews.cn/2020-09/25/content\\_8124805.htm](http://hebei.hebnews.cn/2020-09/25/content_8124805.htm).
- [31] 徐新良, 刘纪远, 张增祥, 周万村, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新, 史学正. 中国 5 年间隔陆地生态系统空间分布数据集(1990-2010)内容与研发. 全球变化数据学报, 2017, 1(1):52-59.
- [32] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 徐新良, 秦元伟, 宁佳, 周万村, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新, 史学正, 江南, 于东升, 潘贤章, 迟文峰. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. 地理学报, 2014, 69(1):3-14.
- [33] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 徐新良, 张树文, 颜长珍, 李仁东, 吴世新, 胡云锋, 杜国明, 迟文峰, 潘涛, 宁静. 2010-2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征. 地理学报, 2018, 73(5):789-802.
- [34] 朱九龙, 王俊, 陶晓燕, 王世军. 基于生态服务价值的南水北调中线水源区生态补偿资金分配研究. 生态经济, 2017, 33(6):127-132, 139-139.
- [35] 潘小春. 利润敏感性分析——利用函数的弹性求利润的敏感系数. 经济师, 2005, (9):121-122.
- [36] 孟昭礼. 需求弹性系数公式新证. 学习与探索, 1987, (4):99-101.
- [37] Bian Z F, Lu Q Q. Ecological effects analysis of land use change in coal mining area based on ecosystem service valuing;a case study in Jiawang. Environmental Earth Sciences, 2013, 68(6):1619-1630.
- [38] Wu M, Ren X Y, Che Y, Yang K. A coupled SD and CLUE-S model for exploring the impact of land use change on ecosystem service value;a case study in Baoshan District, Shanghai, China. Environmental Management, 2015, 56(2):402-419.
- [39] Crouzat E, Mouchet M, Turkelboom F, Byczek C, Meersmans J, Berger F, Verkerk P J, Lavorel S. Assessing bundles of ecosystem services from regional to landscape scale;insights from the French Alps. Journal of Applied Ecology, 2015, 52(5):1145-1155.
- [40] Turner K G, Odgaard M V, Bocher P K, Dalgaard T, Svenning J C. Bundling ecosystem services in Denmark;trade-offs and synergies in a cultural landscape. Landscape and Urban Planning, 2014, 125:89-104.
- [41] 吴健生, 岳新欣, 秦维. 基于生态系统服务价值重构的生态安全格局构建——以重庆两江新区为例. 地理研究, 2017, 36(3):429-440.
- [42] 刘阳, 张威, 章高森, 张昺林, 姜右锦, 张松林. 基于聚类分析的甘肃省静态与动态农业生态服务价值时空分布和变化趋势. 湖北农业科学, 2020, 59(7):99-108.
- [43] Govender P, Sivakumar V. Application of *k*-means and hierarchical clustering techniques for analysis of air pollution;a review (1980-2019). Atmospheric Pollution Research, 2020, 11(1):40-56.
- [44] 孙东琪, 张京祥, 朱传耿, 胡毅, 周亮. 中国生态环境质量变化态势及其空间分异分析. 地理学报, 2012, 67(12):1599-1610.
- [45] Spangenberg J, Settele J. Precisely incorrect? Monetising the value of ecosystem services. Ecological Complexity, 2010, 7(3):327-337.
- [46] Gaglio M, Aschonitis V, Castaldelli G, Fano EA. Land use intensification rather than land cover change affects regulating services in the mountainous Adige river basin (Italy). Ecosystem Services, 2020, 45:101158.