

# 天山北坡经济带生态系统服务评估及权衡协同关系研究<sup>①</sup>

戴金峰<sup>1,2,3</sup>, 乔江波<sup>1,2,4\*</sup>, 朱绪超<sup>3</sup>, 朱元骏<sup>1,2,4</sup>, 贾小旭<sup>3</sup>, 邵明安<sup>3,4</sup>

(1 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西杨凌 712100; 2 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 3 中国科学院大学, 北京 100049; 4 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 为探究近年来新疆天山北坡经济带生态系统服务功能变化及其变化原因, 分析权衡协同关系的动态规律, 助力新疆天山北坡经济带在新时期实现新发展, 基于土地利用数据, 综合运用 InVEST 模型, 研究了 2010—2020 年天山北坡经济带土地利用变化与 4 种典型生态系统服务功能之间的关系, 并对生态系统服务功能进行了权衡协同关系分析。结果表明: ①研究区生态系统服务中的水源涵养与土壤保持功能先增加后减少, 分别下降了  $31.93 \times 10^8 \text{ m}^3$  与  $6.43 \times 10^8 \text{ t}$ , 碳储量无明显变化, 生境质量评分保持在 0.3 左右, 优秀面积减少  $1833 \text{ km}^2$ ; ②研究区整体空间分布为西北高、东南低, 各项生态系统服务功能高值区分布于山脉附近, 以林地为主要土地利用类型; ③多年来权衡关系为主导关系, 协同关系存在于水源涵养与土壤保持以及碳储量与生境质量之间。综上, 天山北坡经济带生态系统服务功能整体呈下降趋势, 下降的原因主要是林地面积的减少和气候条件的改变, 未来应适当增加林地面积, 建立林地面积预警红线, 并建立气象动态监测机制, 以应对极端气象条件, 促进天山北坡经济带生态系统服务功能的可持续发展。

**关键词:** 生态系统服务评估; 权衡协同; InVEST 模型; 天山北坡经济带

中图分类号: X171.1 文献标志码: A

## Study on Evaluation of Ecosystem Services and Trade-off Relationship in Economic Belt on Northern Slope of Tianshan Mountains, Xinjiang

DAI Jinfeng<sup>1,2,3</sup>, QIAO Jiangbo<sup>1,2,4\*</sup>, ZHU Xuchao<sup>3</sup>, ZHU Yuanjun<sup>1,2,4</sup>, JIA Xiaoxu<sup>3</sup>, SHAO Ming'an<sup>3,4</sup>

(1 *The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China*; 2 *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China*; 3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 4 *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

**Abstract:** In this study, the change trend of land use types was explored in the economic belt on the northern slope of the Tianshan Mountains (EB-NSTM) from 2010 to 2020, the InVEST model was employed to assess spatial and temporal changes in water conservation, soil conservation, carbon storage, and habitat quality, and the trade-offs and synergies among ecosystem service functions were analyzed. The results showed that the provision of ecosystem services related to water conservation and soil retention increased first and then decreased, with a reduction of  $31.93 \times 10^8 \text{ m}^3$  and  $6.43 \times 10^8 \text{ t}$ , respectively. Carbon storage showed no significant change. Habitat quality changed little and the score remained about 0.3, but the area of excellent quality habitats decreased by  $1833 \text{ km}^2$ . The spatial distribution of ecosystem services generally was high in the northwest and low in the southeast, the high values were distributed near the mountains, with the forest land was the main land use type. For many years, trade-off dynamics predominantly featured trade-offs, with synergistic relationships were observed between water conservation and soil preservation, as well as between carbon storage and habitat quality. In conclusion, the ecosystem services of NS-NSTM are declining, primarily because of shrinking forest areas and changing climatic conditions. In the future, in order to foster the sustainable ecosystem service in this region, it is essential to expand the forest area with a warning size boundary, and establish a

①基金项目: 科技部第三次新疆综合科学考察项目(2022xjkk0904)资助。

\* 通信作者(jiangboqiao815@163.com)

作者简介: 戴金峰(1999—), 男, 河北廊坊人, 硕士研究生, 主要从事土壤物理与土壤生态方面研究。E-mail: 15529642135@163.com

dynamic meteorological monitoring system to address extreme weather events.

**Key words:** Ecosystem service assessment; Trade-off and synergies; InVEST model; Economic belt on northern slope of the Tianshan Mountains (EB-NSTM)

生态系统所提供的服务是在生态系统持续发展过程中逐渐形成的<sup>[1-2]</sup>,一般包括4类:供给、调节、支持和文化<sup>[3]</sup>。在生态系统持续发展过程中,这些服务并非独立存在,它们彼此相互影响,形成权衡协同关系。正确理解生态系统服务,并朝着有利于人类的方向改变其权衡协同关系,在达成人与自然和谐发展、提高全人类幸福感、促进新时期新型城镇化和乡村振兴等方面具有重要的意义<sup>[4]</sup>。

目前,关于生态系统服务评估在不同地区已有大量研究,并取得重要进展。如,夏敏等<sup>[5]</sup>以宜兴市官林镇为研究区,发现生态系统服务价值持续减少,与水体和耕地变化密切相关;周飞等<sup>[6]</sup>以湛江市为研究对象,发现1996—2004年无论是整体生态系统服务功能,还是单项生态系统服务功能,湛江市各县区都在减弱;潘明欣等<sup>[7]</sup>以杭州市西溪湿地为研究区,发现权衡关系存在于水源涵养与固碳、娱乐功能与文化服务之间,并且西溪湿地生态系统服务在1984—2018年整体呈现退化趋势。但不同地区不同生态系统服务之间的关系仍有很大差异。梳理各个生态系统服务之间的权衡协同关系,探究其空间异质性,分析其相互作用机制,实现共赢仍面临很大挑战。生态系统服务权衡与协同研究方法主要包括空间自相关法、统计分析法、模型模拟分析法(InVEST、ARIES模型等)以及多情景模拟法等<sup>[8]</sup>,其中InVEST模型被广泛运用,其评估结果的可视化表达,解决了以往生态系统服务功能评估用文字抽象表述而不够直观的问题<sup>[9]</sup>。

新疆天山北坡经济带是新疆经济最发达的地区,是我国西北干旱半干旱区经济社会发展引擎之一,也是“八五”与“九五”期间我国国土综合开发的19个重点片区之一<sup>[10]</sup>。随着国家大战略的不断推进,天山北坡经济带的快速建设、当地工业的快速发展以及不断推进的城镇化建设必然会使土地利用类型发生改变,进而影响整体生态系统服务的质量。目前针对天山北坡经济带生态系统服务功能的研究主要集中在单一生态系统服务功能的评价上<sup>[11-12]</sup>,而关于该地区生态系统服务的整体评价及不同生态系统服务功能之间的权衡协同关系等的研究尚未报道。

因此,本文通过收集土地利用类型,气象变化

等数据,以天山北坡经济带为研究对象,选取水源涵养、土壤保持、碳储量、生境质量4种典型生态系统服务功能,运用InVEST模型综合评估研究区重点区域生态系统服务的分布情况,并研究不同生态系统服务在时间、空间上的变化规律以及权衡协同关系的发展演变,以期科学支持新疆天山北坡经济带建设。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区新疆天山北坡经济带处于新疆维吾尔自治区的北部,位于79°88'N—96°38'N,40°87'E—47°23'E(图1),总面积为41.20万km<sup>2</sup>,南至天山山区,北至阿勒泰地区。该区整体气温年较差大,年均气温-4~9℃,年均降水量150~200mm,属于温带大陆性气候区,区内植被类型主要为林地与草地<sup>[13]</sup>。

### 1.2 数据来源及处理

本研究于2022年11月开始收集天山北坡经济带的各项地理及气象数据,包括2010年、2015年、2020年3个时期的土地利用类型、降水量、蒸散量等栅格数据,涉及土壤基本物理性质等的基础信息,以及预处理InVEST模型所需的相关数据(表1)。栅格数据分辨率大小均为1 000×1 000。

**1.2.1 水源涵养模块数据** 1)气象数据。本研究通过国家青藏高原数据中心与资源环境与数据中心收集了2010年、2015年、2020年降水量、蒸散量等数据,在ArcGIS中对气象数据进行裁剪,预处理得到水源涵养模块需要的栅格数据(图2)。

2)植物可利用含水量。植物可利用含水量(PAWC)是指土壤中植物可利用的水分最大含量,利用土壤数据中的颗粒组成数据以及有机质数据计算可得。该方法为非线性拟合土壤PAWC估算模型<sup>[16]</sup>,其计算公式为:

$$\begin{aligned} PAWC = & 54.509 - 0.132S_n - 0.003S_n^2 - \\ & 0.055F_n - 0.006F_n^2 - 0.738N_n + \\ & 0.007N_n^2 - 2.688C_n + 0.501C_n^2 \end{aligned} \quad (1)$$

式中:PAWC为植物可利用含水量(%); $S_n$ 、 $F_n$ 、 $N_n$ 分别为砂粒、粉粒及黏粒的含量(%); $n$ 为单位栅格; $C_n$ 为有机质的含量(%)。

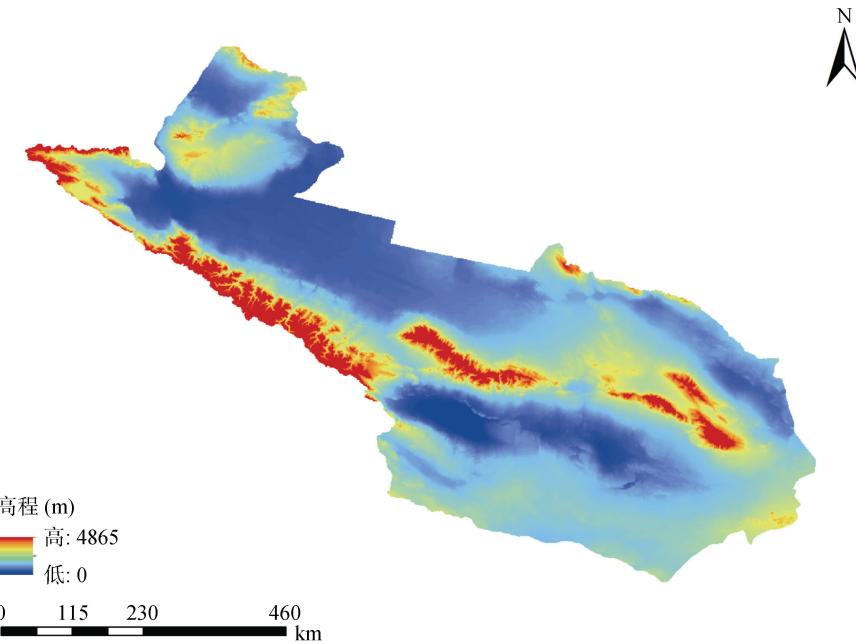


图 1 新疆天山北坡经济带高程图

表 1 研究区数据来源

数据类型	数据名称	数据来源
基础数据	DEM 数据	中国科学院空天信息创新研究院 ( <a href="http://www.aircas.cas.cn/">http://www.aircas.cas.cn/</a> )
	土地利用数据	地理空间数据云 ( <a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a> )
水源涵养服务数据	研究区降水量数据, 蒸散发量数据	中国气象数据网( <a href="https://data.cma.cn/">https://data.cma.cn/</a> )
	植物可利用含水量(PAWC), 植物根系限制层深度数据(Soil Depth), 砂粒、粉粒、黏粒、有机质等土壤数据, 根系深度(Root Depth)	国家冰川冻土沙漠科学中心 ( <a href="https://www.ncdc.ac.cn/portal/metadata/a948627d-4b71-4f68-b1b6-fe02e302af09">https://www.ncdc.ac.cn/portal/metadata/a948627d-4b71-4f68-b1b6-fe02e302af09</a> )
土壤保持服务数据	降雨侵蚀力因子( $R$ ), 土壤可侵蚀因子( $K$ ), 植被覆盖与管理因子及土壤保持措施因子	国家冰川冻土沙漠科学中心 ( <a href="https://www.ncdc.ac.cn/portal/metadata/a948627d-4b71-4f68-b1b6-fe02e302af09">https://www.ncdc.ac.cn/portal/metadata/a948627d-4b71-4f68-b1b6-fe02e302af09</a> )
碳储量数据	研究区 4 种碳库的碳密度数据	参考文献[14]
生境质量数据	生境威胁因子的影响范围、权重及生境敏感性	参考文献[15]

**1.2.2 土壤保持模块数据** 1)降雨侵蚀力因子。降雨侵蚀力因子( $R$ )是通过降水数据, 根据降雨侵蚀力因子公式(分为年、月、日、年均 4 种尺度), 计算得出可以反映降水强度的特征因子。本文利用年尺度公式<sup>[17]</sup>来计算, 具体方法为:

$$R_j^2 = \alpha_3 P_j^{\beta_3} \quad (2)$$

式中:  $P_j$  为第  $j$  年的降水量(mm);  $R_j$  为第  $j$  年的降雨侵蚀力( $(\text{MJ}\cdot\text{mm})/(\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{a})$ );  $\alpha_3$ 、 $\beta_3$  为模型参数, 取 0.053 4 和 1.654 8。

2)土壤可蚀性因子。土壤可蚀性因子是通过土壤本身的各项物理特征(颗粒组成与有机碳含量), 通过

EPIC 模型, 计算得出的土壤对降水流水冲刷的强弱反应。具体算法为<sup>[18]</sup>:

$$K = 0.1317 \times \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.0256 \text{SAN} \left( 1 - \frac{\text{SIL}}{100} \right) \right] \right\} \times \left( \frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right)^{0.3} \times \left[ 1 - \frac{0.25c}{c + \exp(3.72 - 2.95c)} \right] \times \left[ 1 - \frac{0.7\text{SN}}{\text{SN} + \exp(22.9\text{SN} - 5.51)} \right] \quad (3)$$

$$\text{SN} = 1 - \frac{\text{SAN}}{100} \quad (4)$$

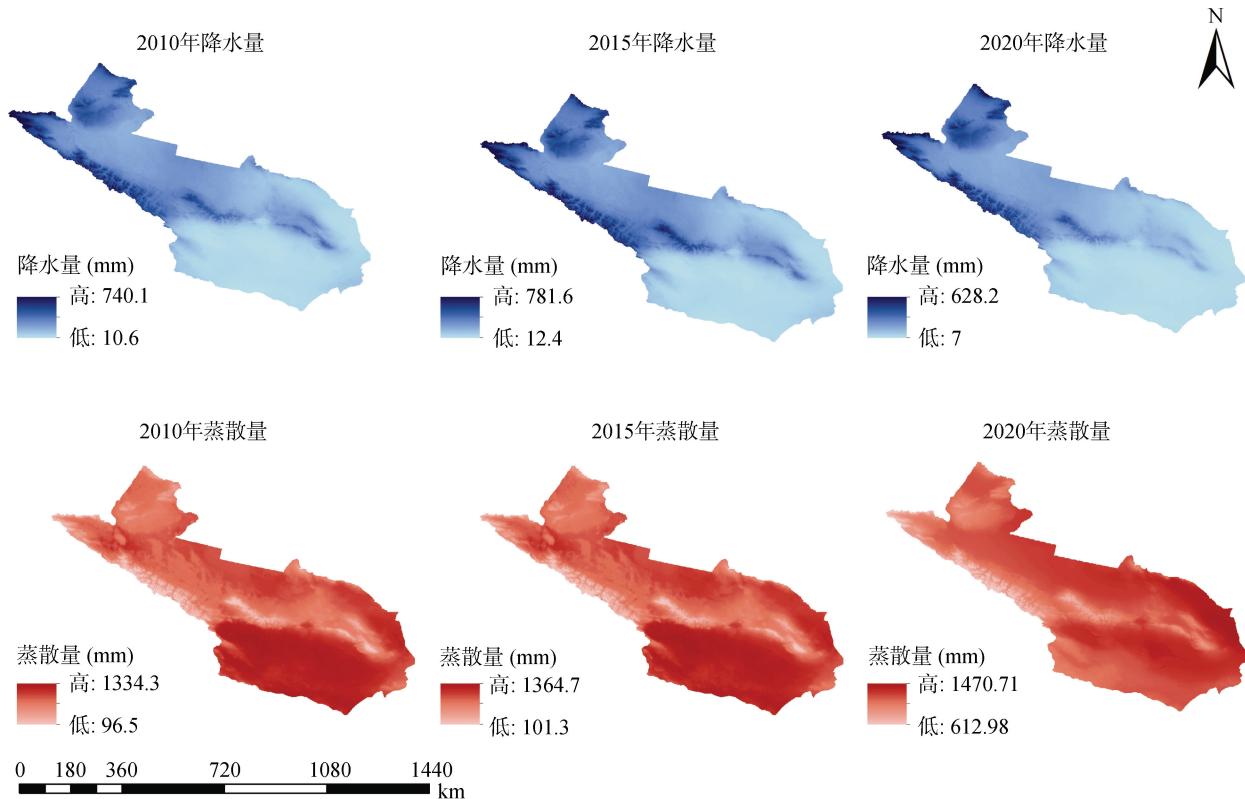


图2 新疆天山北坡经济带气象数据图

$$K = (-0.01383 + 0.51575 K_{EPIC}) \times 0.1318 \quad (5)$$

式中:  $K$  为土壤可蚀性因子( $(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$ ); SAN、CLA、SIL 表示颗粒组成中各部分所占的比重(%);  $c$  表示有机碳的含量(%); 0.1318 为转换系数。

3) 其他数据。植被覆盖与管理参数及土壤保持措施参数是根据以往文献中对新疆地区研究得到的经验参数, 通过模拟对照取得, 植被覆盖与管理参数与土壤保持因子是土壤保持模块的重要参数, 二者体现了人类活动及自然条件对土壤侵蚀的影响, 取值在 0~1。

**1.2.3 其他模块数据** 4 种碳库的碳密度数据通过参考卢雅焱等<sup>[14]</sup>的研究成果确定, 在生境质量模块中生境威胁因子范围、权重及生境敏感性数据通过如克亚·热合曼等<sup>[15]</sup>的研究取得。

### 1.3 基于 InVEST 模型的生态系统服务评估

**1.3.1 水源涵养** 水源涵养是指河流对降水的积蓄能力, 通过 InVEST 模型中的水源涵养模块计算。计算公式为:

$$Y_{xj} = \left[ 1 - \frac{AET_{xj}}{P_x} \right] P_x \quad (6)$$

式中:  $Y_{xj}$  为某单元栅格的总产水量(mm);  $P_x$  为某单元栅格平均降水量(mm);  $AET_{xj}$  为单元栅格的实际蒸

散量(mm);  $xj$  为土地利用类型  $j$  中单元栅格  $x$ 。该模块还需要的参数有: 土地利用类型、降水量、蒸散量等栅格数据、研究区面状矢量数据、以及用于校正的季节参数  $Z$ 。

**1.3.2 土壤保持** 土壤保持是指土壤在面对降水水流时, 对土壤侵蚀的抵抗能力以及对泥沙的积蓄累积能力, 通过土壤保持模块进行计算。计算公式为:

$$RKLS_n = R_n \times K_n \times L_n \times S_n \quad (7)$$

$$USLE_n = R_n \times K_n \times L_n \times S_n \times C_n \times P_n \quad (8)$$

$$SK_n = RKLS_n - USLE_n \quad (9)$$

式中:  $RKLS_n$  为土壤潜在侵蚀量(t);  $USLE_n$  为土壤实际侵蚀量(t);  $SK_n$  为土壤保持量(t);  $R_n$  为降雨侵蚀力;  $K_n$  为土壤可蚀性;  $L_n$  为坡长因子;  $S_n$  为坡度因子;  $C_n$  为植被覆盖和管理因子;  $P_n$  为水土保持因子;  $n$  是指单元栅格。其他相关参数使用手册中的推荐值。

**1.3.3 碳储量** 碳储量由 4 部分组成, 包括地上生物碳、地下生物碳、土壤碳、死亡有机碳, 碳储量模块通过碳库数据及土地利用类型数据计算得到。计算公式为:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad (10)$$

式中:  $C_{\text{total}}$  表示研究区总碳储量( $t/hm^2$ );  $C_{\text{above}}$  为地

上生物碳数据( $t/hm^2$ )； $C_{below}$  为地下生物碳数据( $t/hm^2$ )； $C_{soil}$  为土壤碳数据( $t/hm^2$ )； $C_{dead}$  为死亡有机碳数据( $t/hm^2$ )。

**1.3.4 生境质量** 通过 InVEST 模型中的生境质量模块反映研究区生态系统对人类活动的敏感性，侧面反映这一区域生态系统物种多样性。其计算公式为：

$$Q_{xj} = H_j \left( 1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \quad (11)$$

式中： $Q_{xj}$  为某单元栅格的生境质量； $D_{xj}$  为某单元栅格胁迫水平； $xj$  为土地利用类型  $j$  中单元栅格  $x$ ； $k$  为半饱和常数； $H_j$  为生境适宜性； $z$  为归一化常量。

#### 1.4 生态系统服务的功能区识别

通过借鉴相关研究成果<sup>[19-20]</sup>，对生态系统的服务功能进行综合评价，需要用归一化来消除水源涵养、碳储量与土壤保持的量纲。在 ArcGIS 中将 3 种服务功能进行标准化处理，将其处理为数值范围为 [0, 1] 的栅格数据，后将 4 种生态系统服务功能各项赋予 0.25 的权重，进行叠加，再利用重分类将叠加后的数值等分为 4 个区域，最后，将 4 个区域由低到高分为 4 个等级区。

#### 1.5 权衡协同关系分析

通过生态系统服务权衡协同度(ESTD)分析权衡协同关系，其公式如下：

$$ESTD_{mn} = \frac{ESC_{mb} - ESC_{ma}}{ESC_{nb} - ESC_{na}} \quad (12)$$

式中： $ESTD_{mn}$  表示第  $m$  与  $n$  种生态系统服务之间的权衡协同关系，正值为协同关系，负值为权衡关系，绝对值数值大小为权衡协同关系的程度； $ESC_{mb}$ 、 $ESC_{ma}$  为第  $m$  种生态系统服务在  $b$ 、 $a$  时刻的物质量； $ESC_{nb}$ 、 $ESC_{na}$  为第  $n$  种生态系统服务在  $b$ 、 $a$  时刻的物质量<sup>[21]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 土地利用变化

2010—2020 年天山北坡经济带主要土地利用类型为未利用地和草地，面积占比分别约 60% 和 30%，其次是耕地、林地、建设用地和水域，占比均小于 10%(表 2)，其中，耕地、草地和建设用地面积逐渐增加，林地、水域和未利用地面积逐渐减少。2010—2020 年土地利用类型的转移结果(表 3)表明，研究区耕地面积的增加主要是草地( $7\ 306.37\ km^2$ )和未利用地( $3\ 164.77\ km^2$ )的转入；草地面积的增加主要是林地( $6\ 176.46\ km^2$ )和未利用地( $28\ 023.12\ km^2$ )的转入；建设用地面积增加主要是耕地( $1\ 324.83\ km^2$ )和未利用地( $1\ 100.43\ km^2$ )的转入；林地面积的减少主要是转移为草地( $6\ 176.46\ km^2$ )；水域面积的减少主要是向未利用地( $2\ 655.05\ km^2$ )的转移；未利用土地的减少主要是转移为草地( $28\ 023.12\ km^2$ )。综上，天山北坡经

表 2 研究区各期不同地利用类型面积及比例

土地利用类型	2010 年		2015 年		2020 年	
	面积( $km^2$ )	占比(%)	面积 ( $km^2$ )	占比 (%)	面积( $km^2$ )	占比 (%)
耕地	26 832	6.47	28 585	6.90	34 423	8.30
林地	9 625	2.32	9 503	2.29	5 101	1.23
草地	121 203	29.24	119 885	28.92	131 898	31.82
水域	6 243	1.51	6 231	1.50	3 742	0.90
建设用地	2 469	0.60	3 485	0.84	4 754	1.15
未利用地	248 198	59.86	246 881	59.55	234 720	56.60

表 3 研究区土地利用类型转移矩阵表( $km^2$ )

时期	土地利用类型	2020 年					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2010 年	耕地	22 149.43	72.96	2 835.36	135.56	1 324.83	310.37
	林地	833.51	2 045.39	6 176.46	35.02	82.29	443.56
	草地	7 306.37	2 734.65	93 691.44	410.59	990.62	15 890.68
	水域	224.07	7.03	780.63	2 500.12	33.80	2 655.05
	建设用地	741.03	5.68	185.35	13.93	1 222.03	300.98
	未利用地	3 164.77	230.14	28 023.12	624.10	1 100.43	214 588.32

济带土地利用的主要变化为未利用地向草地的转变及草地和未利用地向耕地的转变。

## 2.2 生态系统服务的时空演变

**2.2.1 生态系统服务的时间变化** 2010—2020年研究区水源涵养量与土壤保持量均呈先上升后下降的趋势, 分别减少  $31.93 \times 10^8 \text{ m}^3$  和  $6.34 \times 10^8 \text{ t}$ 。碳储量缓慢增加, 增长  $0.28 \times 10^8 \text{ t}$ 。优秀生境质量面积逐渐减少, 减少  $1833 \text{ km}^2$ (表 4)。

表 4 2010—2020 年新疆天山北坡经济带生态系统服务的物质量

生态系统服务类型	2010 年	2015 年	2020 年
水源涵养( $10^8 \text{ m}^3$ )	94.05	118.69	62.12
土壤保持( $10^8 \text{ t}$ )	39.38	51.78	33.04
碳储量( $10^8 \text{ t}$ )	23.23	23.21	23.51
生境质量(优秀面积( $\text{km}^2$ ))	0.31(40 205)	0.30(40 066)	0.31(38 372)

**2.2.2 生态系统服务的空间变化** 由图 3 可知, 2010—2020 年, 新疆天山北坡经济带水源涵养多年平均产水总量为  $91.62 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 单位栅格平均产水量为  $22.24 \text{ mm}$ , 最低产水量为  $0 \text{ mm}$ , 最高为  $713.3 \text{ mm}$ 。其中, 2010—2015 年, 研究区水源涵养服务空间分布稳定, 高值区在山脉附近, 土地利用类型主要为林地, 中值区在西北部, 低值区分布较广; 2015—2020 年, 研究区水源涵养量空间变化明显, 整体下降, 西北部中值区变为低值区, 低值区范围扩大。2010—2020 年研究区多年平均土壤保持量为  $41.4 \times 10^8 \text{ t}$ , 单位栅格土壤保持量最低为  $0 \text{ t}$ , 最高为  $1.9 \times 10^6 \text{ t}$ 。从空间上看, 土壤保持分布格局稳定, 以林地为主要土地利用类型的山脉地区为土壤保持的高值区域。2010—2020 年研究区多年平均碳储量为  $23.32 \times 10^8 \text{ t}$ , 单位栅格碳储量最低为  $109 \text{ t}$ , 最高为  $15 031 \text{ t}$ 。碳储量分布逐渐向中值区汇聚, 高值区与低值区面积减少, 高值区以林地为主要土地利用类型。研究区生境质量处于较低水平, 3 个时期生境质量评价均在 0.3 左右, 在空间格局上, 生境质量低值区多分布于土地利用类型为未利用地的东北部与东南部一带, 生境质量高值区为山脉附近, 其土地利用类型为林地, 城市群附近地区生境质量较为稳定。

## 2.3 生态系统服务功能分区

本研究运用归一化叠加方法, 实现研究区生态系统服务的功能分区(表 5 和图 4)。结果表明, 2010—2020 年一般重要区与高度重要区面积逐渐减少, 中度重要区面积不断增加, 极度重要区面积先升高后下降。其中, 一般重要区主要集中于东北、东南

部以及西北地区的荒漠戈壁等未利用地区域; 中度重要区位于新疆天山北坡经济带的中部、西北部以及东南部的中间部分, 以城市群、农村居民点与耕地为主; 高度重要区与极度重要区集中在山区附近。

## 2.4 生态系统服务的权衡协同关系

由表 6 可知, 2010—2015 年新疆天山北坡经济带整体为权衡关系主导, 权衡协同关系为 2 组值为正值, 4 组值为负值。协同关系存在于水源涵养与土壤保持之间、碳储量和生境质量之间, 其他生态系统服务之间的关系为权衡关系。2015—2020 年, 主导关系仍保持权衡关系, 程度上略有变化。水源涵养与土壤保持以及碳储量与生境质量的协同度有所弱化, 碳储量与水源涵养、土壤保持之前的权衡度略有加强, 生境质量与水源涵养、土壤保持之前权衡度略有下降。

## 3 讨论

本研究基于 InVEST 模型计算了 2010—2020 年新疆天山北坡经济带水源涵养、土壤保持、碳储量和生境质量 4 种生态系统服务, 并探究了其变化规律, 总体来看, 2010—2020 年天山北坡经济带生态系统服务总体呈下降趋势, 该结果与陈武迪等<sup>[22]</sup>结论类似。其中, 水源涵养量呈下降趋势, 这主要是由于降水量与蒸散量的变化影响着水源涵养的改变<sup>[23]</sup>, 天山北坡经济带整体蒸散量上升, 降水量下降, 导致水源涵养量下降, 该结果与冉璇等<sup>[24]</sup>得出的结论相符。各时期水源涵养量与对应年份的新疆水资源公报中的结果接近, 结果具有可信度。土壤保持量也出现下降趋势, 虽然耕地和草地面积增加, 但是林地面积减少, 且森林对维持土壤保持功能的能力大于农田与草地, 这与王晓峰等<sup>[25]</sup>得出的结论相符。碳储量总体略有增加, 这与卢雅焱等<sup>[14]</sup>的结果相符, 但是其得出的原因是林地面积增加显著, 这与本文天山北坡经济带林地面积减少的结果不同。森林的植被固碳能力强于灌丛与草丛<sup>[26]</sup>, 但耕地和草地面积的增加也弥补了林地面积减少带来的碳储量的损失。在生境质量方面, 评分结果与如克亚·热合曼等<sup>[15]</sup>与 Zhang 等<sup>[27]</sup>得出的评分结果接近, 但其认为天山北坡经济带整体呈向良好和优等级方向发展趋势, 与本文结果有所不同, 这是因为本文将研究区范围扩大, 把东南部地区纳入评价范围内, 全面评价天山北坡经济带整体情况, 未利用地的生境质量评分较低, 导致了整体评价不高。

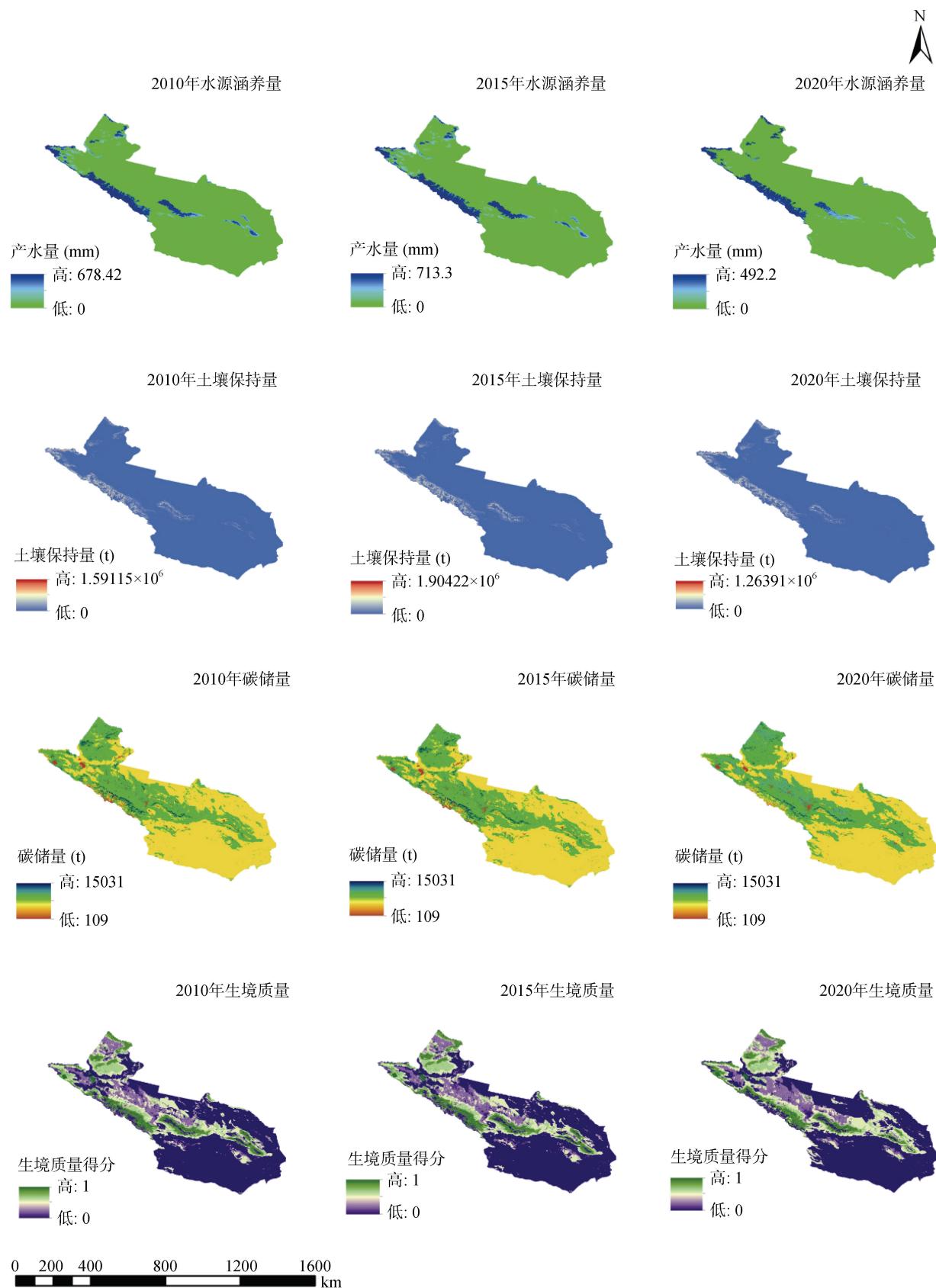


图 3 2010—2020 年新疆天山北坡经济带生态系统服务物质量空间分布格局

表5 2010—2020年新疆天山北坡经济带生态系统服务功能区面积及比例

功能分区	2010年		2015年		2020年	
	面积(km <sup>2</sup> )	比例(%)	面积(km <sup>2</sup> )	比例(%)	面积(km <sup>2</sup> )	比例(%)
一般重要区	251 679	61.09	250 084	60.70	239 389	58.11
中度重要区	137 337	33.34	137 859	33.46	153 558	37.27
高度重要区	22 353	5.43	23 136	5.62	18 543	4.50
极度重要区	592	0.14	882	0.22	471	0.12

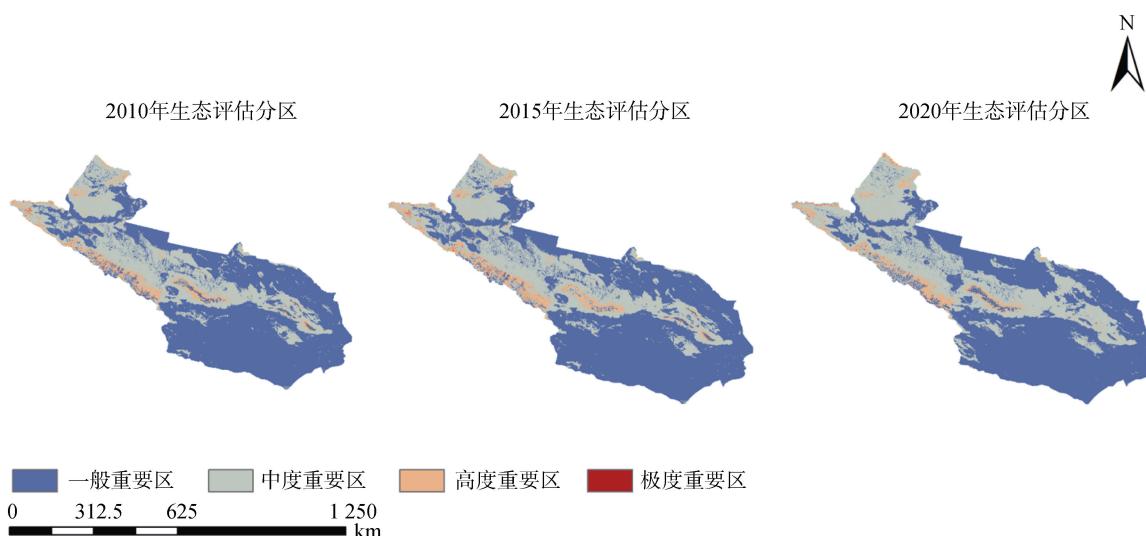


图4 2010—2020年新疆天山北坡经济带生态系统服务功能区分布图

表6 2010—2020年新疆天山北坡经济带生态系统服务权衡协同关系

时期	功能	水源涵养	土壤保持	碳储量	生境质量
2010—2015年	水源涵养	—	—	—	—
	土壤保持	0.50	—	—	—
	碳储量	$-0.81 \times 10^{-3}$	$-0.16 \times 10^{-2}$	—	—
	生境质量	$-0.04 \times 10^{-10}$	$-0.08 \times 10^{-10}$	$0.05 \times 10^{-7}$	—
2015—2020年	水源涵养	—	—	—	—
	土壤保持	0.33	—	—	—
	碳储量	$-0.53 \times 10^{-2}$	-0.02	—	—
	生境质量	$-0.02 \times 10^{-10}$	$-0.05 \times 10^{-10}$	$0.33 \times 10^{-9}$	—

本研究得出, 2010—2020年研究区生态系统服务一直以权衡关系为主导, 而刘浩等<sup>[28]</sup>认为阿勒泰地区各生态系统服务间协同权衡关系主要为协同关系。此外, 本研究还得出生境质量与土壤保持之间呈权衡关系, 这与 Zhang 等<sup>[27]</sup>认为生境质量与土壤保持之间呈协同关系的结论不同。造成以上结果的原因, 一是研究尺度, 研究范围的差异影响生态系统服务之间的关系, 刘浩等<sup>[28]</sup>与 Zhang 等<sup>[27]</sup>以天山北坡经济带局部地区为研究对象, 而本研究针对天山北坡经济带整体情况; 二是天山北坡经济带整体跨度大, 气候、地形和土壤特征各地区都有所不同, 最终导致权衡协同关系的差异。协同关系多年来存

在于水源涵养与土壤保持之间以及碳储量与生境质量之间, 但程度略有下降, 这与王晓峰等<sup>[25]</sup>在评估新疆生态系统服务时空变化及权衡协同关系得出的结论基本一致。

虽然本文运用 InVEST 模型模拟出了天山北坡经济带 4 种生态系统服务功能, 并进行了综合评价, 但是在结果处理上会有一些不足, 如模型的运行涉及众多参数的设定, 本研究参考了使用手册中的默认参数, 因此可能会导致结果的不准确。本研究只重点研究了 10 年的生态系统服务, 未来可对参数进行验证, 模拟未来土地利用类型的变化, 进而对未来生态系统服务做进一步研究。

## 4 结论

1)天山北坡经济带的生态系统服务功能整体呈下降趋势。其中,水源涵养与土壤保持呈先上升后下降的趋势,碳储量无明显变化,生境质量总体评分无明显变化,但优秀面积减少。

2)天山北坡经济带空间分布上呈西北高、东南低的特点。其中,水源涵养服务呈现高值集中在山脉附近特征;土壤保持服务分布较为稳定;碳储量服务主要集中在中西部地区;生境质量服务评分以城市群与林地为中心向四周降低。

3)天山北坡经济带生态系统服务主导关系为权衡关系。水源涵养与土壤保持以及碳储量与生境质量的协同度有所弱化,碳储量与水源涵养、土壤保持之间的权衡度略有加强,生境质量与水源涵养、土壤保持之间权衡度略有下降。

4)土地利用类型改变和气象因素如降水量、蒸散量等的变化是影响天山北坡经济带生态系统服务时空变化和权衡协同关系的重要因素。未来应针对性地适当增加林地面积,建立林地面积预警红线,并建立气象动态监测机制,以应对极端气象条件,促进天山北坡经济带生态系统服务的可持续发展。

## 参考文献:

- [1] Daily G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [2] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387: 253–260.
- [3] Toth F L. Ecosystems and human well-being: A framework for assessment[M]. Washington DC: Island Press, 2005.
- [4] 荔童, 梁小英, 张杰, 等. 基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系及其驱动因子分析——以陕北黄土高原为例[J]. 生态学报, 2023, 43(16): 6758–6771.
- [5] 夏敏, 张子红, 赵炳梓, 等. 快速城镇化地区镇域生态用地变化模拟及其生态系统服务价值响应[J]. 土壤, 2018, 50(5): 1022–1031.
- [6] 周飞, 陈士银, 钟来元, 等. 区域土地利用与生态系统服务价值变化研究——以广东省湛江市为例[J]. 土壤, 2008, 40(5): 847–851.
- [7] 潘明欣, 张力小, 胡潭高, 等. 城市湿地生态系统服务动态演化及其权衡关系——以杭州西溪湿地为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2022, 58(6): 893–900.
- [8] 吴绍华, 虞燕娜, 朱江, 等. 土壤生态系统服务的概念、量化及其对城市化的响应[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 970–978.
- [9] Posner S, Verutes G, Koh I, et al. Global use of ecosystem service models[J]. Ecosystem Services, 2016, 17: 131–141.
- [10] 邓铭江. 天山北坡经济带“三生空间”发展格局与智能水网体系建设[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1155–1168.
- [11] 张顺鑫, 吴子豪, 闫庆武, 等. 基于 PLUS-InVEST 模型的天山北坡生态系统碳储量时空变化与预测[J]. 干旱区研究, 2024, 41(7): 1228–1237.
- [12] 陈武迪, 刘晓煌, 李洪宇, 等. 基于 InVEST 模型的新疆 1990—2018 年产水服务时空变化及驱动因素分析[J]. 现代地质, 2024, 38(3): 636–647.
- [13] 王宗侠, 刘苏峡. 1990—2020 年天山北坡地下水储量估算及其时空演变规律[J]. 地理学报, 2023, 78(7): 1744–1763.
- [14] 卢雅焱, 徐晓亮, 李基才, 等. 基于 InVEST 模型的新疆天山碳储量时空演变研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1896–1906.
- [15] 如克亚·热合曼, 阿里木江·卡斯木, 哈力木拉提·阿布来提, 等. 基于 InVEST 模型的天山北坡城市群生境质量时空演化研究[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(9): 1112–1121.
- [16] 周文佐, 刘高焕, 潘剑君. 土壤有效含水量的经验估算研究——以东北黑土为例[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(4): 88–95.
- [17] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学, 2003, 25(1): 35–41.
- [18] Williams J R, Jones C A, Dyke P T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity[J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(1): 129–144.
- [19] He J, Shi X Y, Fu Y J, et al. Spatiotemporal pattern of the trade-offs and synergies of ecosystem services after Grain for Green Program: A case study of the Loess Plateau, China[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2020, 27(24): 30020–30033.
- [20] 王旭辉. 基于 InVEST 模型的山东省生态系统服务时空演变[J]. 四川林业科技, 2023, 44(2): 137–142.
- [21] Jopke C, Kreyling J, Maes J, et al. Interactions among ecosystem services across Europe: Bagplots and cumulative correlation coefficients reveal synergies, trade-offs, and regional patterns[J]. Ecological Indicators, 2015, 49: 46–52.
- [22] 陈武迪, 刘晓煌, 李洪宇, 等. 新疆天山 1990—2050 年生态系统服务功能及安全格局[J]. 中国地质, 2024, 51(5): 1644–1663.
- [23] 郑华, 李屹峰, 欧阳志云, 等. 生态系统服务功能管理研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 702–710.
- [24] 冉璇, 李渊, 郭宇龙, 等. 基于 InVEST 模型的钱江源国家公园生态系统服务评估及权衡协同关系研究[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(9): 1932–1948.
- [25] 王晓峰, 程昌武, 尹礼唱, 等. 新疆生态系统服务时空变化及权衡协同关系[J]. 生态学杂志, 2020, 39(3): 990–1000.
- [26] 彭文宏, 牟长城, 常怡慧, 等. 东北寒温带永久冻土区森林沼泽湿地生态系统碳储量[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1526–1538.
- [27] Zhang L F, Fang C L, Zhu C, et al. Ecosystem service trade-offs and identification of eco-optimal regions in urban agglomerations in arid regions of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 373: 133823.
- [28] 刘浩, 舒昶, 周婷婷, 等. 阿勒泰地区基于土地覆被变化的生态系统服务协同与权衡关系及驱动力分析[J]. 2021, 12(6): 777–790.