

# 额尔齐斯河流域土地利用变化对生态系统服务价值损益时空演变的影响

罗万云<sup>1,3</sup>, 孙慧<sup>1,3</sup>, 钟方雷<sup>2</sup>, 戎铭倩<sup>1,3</sup>, 王福博<sup>1</sup>, 周杨<sup>1,3</sup>, 戴俐珍<sup>1,3</sup>

(1.新疆大学 经济与管理学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2.中央民族大学 经济学院, 北京 100091; 3.新疆大学 新疆创新管理研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830046)

**摘要:** [目的] 评估土地利用变化与生态系统服务价值损益之间的关联效应, 为制定适宜的土地干预政策提供科学依据。[方法] 基于5期额尔齐斯河流域土地利用数据以及CLUE-S模型, 量化土地利用变化下流域生态系统服务价值损益时空演变规律。[结果] ①2000—2018年额尔齐斯河流域草地和林地持续地转化为其他土地, 耕地面积大幅度增长; 到2030年, 流域耕地面积的比例将上升4.92% (1 502.48 km<sup>2</sup> 上升到4 070 km<sup>2</sup>), 而林地呈现快速下降趋势, 所占比例将下降7.18% (由7 547.26 km<sup>2</sup> 减少到5 424.36 km<sup>2</sup>)。②额尔齐斯河流域生态系统服务价值由2000年的518.16亿元增长到2018年的1 832.44亿元, 到2030年, 生态系统服务价值处于波动下降趋势(2030年为1 777.86亿元); ③林地和草地被耕地所占用, 导致额尔齐斯河流域生态系统服务价值损失预计达到108.80亿元, 依次为: 草地转换损失(34.39亿元) > 林地转换损失(28.49亿元) > 水域转换损失(18.31亿元)。④额尔齐斯河流域生态系统服务价值损益空间分布呈现“北高南低”的发展格局, 价值损益在全局和局部上均呈现显著的正向空间自相关。[结论] 人为因素导致大量生态用地被占用, 生态系统服务价值下降且损益空间异质性显著, 需要进一步采取有效的生态保护与补偿政策推动农牧户生计转型, 减小对自然环境的依赖性。

**关键词:** 土地利用; 生态系统服务价值; 损益时空演变; 额尔齐斯河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)04-0301-11

中图分类号: TP79, F062.2

**文献参数:** 罗万云, 孙慧, 钟方雷, 等. 额尔齐斯河流域土地利用变化对生态系统服务价值损益时空演变的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 301-311. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.038; Luo Wanyun, Sun Hui, Zhong Fanglei, et al. Effects of land use change on spatio-temporal evolution of ecosystem service value profit and loss in Irtysh River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 301-311.

## Effects of Land Use Change on Spatio-temporal Evolution of Ecosystem Service Value Profit and Loss in Irtysh River Basin

Luo Wanyun<sup>1,3</sup>, Sun Hui<sup>1,3</sup>, Zhong Fanglei<sup>2</sup>, Rong Mingqian<sup>1,3</sup>, Wang Fubo<sup>1</sup>, Zhou Yang<sup>1,3</sup>, Dai Lizheng<sup>1,3</sup>

(1.School of Economics and Management, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang

830046, China; 2.School of Economics, Minzu University of China, Beijing 100091, China;

3.Center for Innovation Management Research of Xinjiang, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China)

**Abstract:** [Objective] The correlation between land use changes and ecosystem service values were assessed to provide references for formulating appropriate land intervention policies. [Methods] The five-period land use data of the Irtysh River basin and the CLUE-S model were used to quantify the temporal and spatial variation of ecosystem service value profit and loss under land use change. [Results] ① The conversion of grassland and forest land to other land continued from 2000 to 2018 in the Irtysh River basin, and the cultivated land area increased significantly. By 2030, the proportion of arable land in this basin would increase by 4.92% (from 1 502.48 km<sup>2</sup> to 4 070 km<sup>2</sup>), while the forest land area decreased rapidly by 7.18% (from

收稿日期: 2021-12-09

修回日期: 2022-02-28

资助项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金青年项目“新疆阿尔泰山地森林草原生态补偿的区域选择研究”(2021D01C107); 新疆维吾尔自治区高校科研计划人文社科青年项目(XJEDU2021SY001); 国家社会科学基金青年项目(21CJY038); 新疆天池博士人才计划项目(TCBS202027); 新疆大学高层次人才引进博士启动资助项目(BS200102)

第一作者: 罗万云(1990—), 男(汉族), 甘肃省永靖县人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土地利用与生态补偿方面的研究。Email: luowanyun0824@126.com。

通讯作者: 孙慧(1963—), 女(汉族), 江苏省泗阳县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事资源经济学方面的研究。Email: shuixju@sina.com。

7 547.26 km<sup>2</sup> to 5 424.36 km<sup>2</sup>). ② The value of ecosystem services in the Irtysh River basin increased from 51.816 billion yuan in 2000 to 183.244 billion yuan in 2018. By 2030, the value of ecosystem services would be in a fluctuating downward trend (177.786 billion yuan in 2030). ③ Forest land and grassland were converted to cultivated land, and the resulting loss in ecosystem service value in the Irtysh River basin was expected to reach 10.880 billion yuan, followed by grassland conversion loss (3.439 billion yuan) > forest land conversion loss (2.849 billion yuan) > water area conversion loss (1.831 billion yuan). ④ The spatial distribution of ecosystem service value gains and losses in the Irtysh River basin showed a pattern of “high in the north and low in the south”, and the value gains and losses showed positive spatial autocorrelation, both globally and locally. [Conclusion] Human factors led to the occupation of a large amount of ecological land, a decline of ecosystem service value, and significant spatial heterogeneity of profit and loss. It is necessary to undertake further effective ecological protection and compensation policies to promote the livelihood transformation of farmers and herdsmen, and to reduce their dependence on the natural environment.

**Keywords:** land use; ecosystem service value; spatial pattern of loss and gain; Irtysh River basin

生态系统服务是人类在自然生态过程中直接或间接获得的各种生态产品和生态服务总和<sup>[1]</sup>。自生态系统服务提出以来,土地变化被认为是生态系统服务价值损益变动的主要驱动因素<sup>[2]</sup>。近十几年,人类经济活动正在把大量的适宜开垦的草地和林地转变为可供生产的耕地<sup>[3]</sup>。在人类活动不断加剧背景下,生态系统出现了一定程度的退化问题<sup>[4]</sup>,如何实现生态系统持续地向外界提供生态系统产品,已经成为世界各国面临的共性挑战<sup>[5]</sup>。系统性地评估土地利用变化与生态系统服务价值损益之间的关系,设计和制定适当的流域土地干预政策,对于保证流域生态安全的土地利用方案具有重要意义。20 世纪 70 年代,LULCC 变化对生态系统服务的广泛影响得到诸多学者的印证,尤其是在生物多样性<sup>[6]</sup>、支持人类需求的能力方面<sup>[7]</sup>。Constanza<sup>[8]</sup>提出全球 ESV 量化方法和模式后,土地利用数量与结构对生态系统服务价值产生的影响得到学术界的重视。土地变化的驱动因素开始用于评价土地利用强度与生态系统服务之间的权衡关系<sup>[9]</sup>,这一研究逐渐由全国尺度<sup>[10]</sup>向较小的空间尺度进行应用<sup>[11]</sup>。现有成果集中在两个方面:①基于土地利用变化趋势对生态系统服务价值的影响进行定量评估<sup>[12]</sup>。②根据经济社会驱动因子,选择对区域生态系统服务价值变化具有较大的影响因子,模拟未来土地利用变化趋势,据此分析生态系统服务价值损益变化<sup>[13]</sup>。从现有研究方法来看,受到广泛关注的方法分别是经验统计模型<sup>[14]</sup>、元细胞自动机、系统动力模型及 CLUE-S 模型等<sup>[15]</sup>,其中 CLUE-S 模型受到学者广泛应用,在一些中小尺度的地类转换关系和空间分配中取得较好的模拟效果。

额尔齐斯河流域中国段位于“丝绸之路经济带”核心区和北通道,自然生态环境优越,拥有大面积的天然森林和草地,属于我国重要的水源涵养区,对于

中国树立生态文明大国形象以及巩固北冰洋权益,确保丝绸之路经济带核心区水安全,支撑中国向全球提供更多生态产品具有重要意义。近年来,由于全球气候变化和人类不合理活动的影响,额尔齐斯河流域的土地利用呈现出怎么样变化?与之相联系的生态系统服务价值呈现出何种损益分异规律?上述问题直接关系到额尔齐斯河流域可持续发展。本研究基于 2000 年以来的 5 期土地利用数据,运用 CLUE-S 模型预测未来额尔齐斯河流域各土地利用类型变化趋势,评估流域生态系统服务价值损益的时空分异规律,旨在为流域土地资源优化管理,巩固生态系统安全提供参考。

## 1 研究区概况

额尔齐斯河流域位于新疆北部阿勒泰地区,发源于富蕴县阿尔泰山南坡,沿阿尔泰山南麓在哈巴河县西部流入哈萨克斯坦,注入布赫塔尔玛水库(斋桑泊湖),出湖后流经俄罗斯与额毕河汇流,最终注入北冰洋。额尔齐斯河流域全长 4 248 km(中国境内 633 km),流域面积  $1.64 \times 10^6$  km<sup>2</sup>(中国境内  $4.53 \times 10^4$  km<sup>2</sup>)。额尔齐斯河流域属于温带大陆性气候,受大西洋暖湿气流影响,年均降雨量 180 mm,径流主要以融雪和融冰、降水补给。由于人类在流域沿岸开荒耕地、过度放牧以及建坝蓄水,造成河谷森林面积从 1959 年的  $4.99 \times 10^4$  hm<sup>2</sup> 减少到 1980 年的  $1.88 \times 10^4$  hm<sup>2</sup> 年均减少 1 400 hm<sup>2</sup><sup>[16]</sup>,生态景观破碎化加剧,生境质量下降较为严重。额尔齐斯河流域中国境内部分流经富蕴县、福海县、阿勒泰市、布尔津县、哈巴河县以及北屯市。截至 2019 年,所在县市的 GDP 为 291.88 亿元,人口达到 58.84 万人,第一产业生产总值达到 50.18 亿元,粮食产量  $3.34 \times 10^5$  t,牲畜存栏数量达到 311.15,是新疆重要的农牧业生产基

地。受到农牧业生产活动以及水资源开发利用影响,土地利用格局发生了较大程度的变化,造成生态系统结构和功能出现了不同程度的退化,严重影响了流域生态系统服务价值的供给。研究额尔齐斯河流域土地利用与生态系统服务价值对于该区域实现“两山”目标意义重大。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

本文以 2000,2005,2010,2015 和 2018 年连续 5 期土地利用/覆被数据为主要数据源,该数据来源于中国科学院(<http://www.resdc.cn>),空间分辨率为 30 m,土地利用数据格式为栅格类型,一级类型数据精度可达到 95% 以上,将土地划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用土地 6 大类。基于草地和森林资源调查、固定样地等实测数据,所有影像的总体分类精度均高于 95%,能够满足研究需求。

海拔及地形数据来自地理空间数据云的 SRTM-DEM 数据,空间分辨率为 30 m。该区域城镇居民点、道路数据来源于国家基础地理信息中心。阿勒泰地区主要农作物类型、总产量、播种面积及价格等数据来源于《阿勒泰地区统计年鉴》,并结合 2000—2019 年《全国农产品成本收益资料汇编》估算生态系统服务价值当量。城镇居民点和道路数据,来源国家基础地理信息中心数据库。

### 2.2 研究方法

2.2.1 CLUE-S 模型介绍 CLUE-S 模型是由荷兰瓦赫特宁根大学开发,基于不同土地利用类型与多个驱动因子线性关系经验,对区域所有土地利用进行精确空间分配,适宜较小尺度的土地利用变化与预测研

究,主要研究步骤如下:

(1) 土地利用数据整理。基于 2000—2018 年额尔齐斯河流域土地利用历史变化趋势,应用马尔科夫链模型估算了 2025 和 2030 年各类土地利用类型的面积,马尔科夫链模型是基于时间序列的随机过程,广泛用于地理学的数值未来预测,根据额尔齐斯河流域现有土地利用类型集合  $X(t)$  预测未来各地类集合状态  $X(t+n)$ ,基本形式为:

$$X(t+n) = X(t) \times P_{ij}^n \quad (1)$$

式中: $n$  为时间步长; $P_{ij}$  为土地利用转移概率矩阵。

(2) 设置土地利用转化规则及转化弹性。将额尔齐斯河流域历史时段内不同土地类型间发生过转化情况赋值为 1,将不同地类间未发生过转化情况赋值为 0<sup>[14]</sup>。弹性系数描述了不同地类转化的稳定性,参考已有研究成果<sup>[17]</sup>,并经过多次模拟调试,确定水域、建设用地、未利用地、耕地的弹性系数分别为 0.9,0.95,0.95,0.4,0.9。选择地形因子(海拔、坡度、坡向)和区位因子(距离道路距离、距城镇距离)作为驱动力对各地类转换进行考察。表 1 的回归分析显示,得到各地类在空间某点的分布概率( $P_{i,u}$ )。根据分布概率、弹性系数以及迭代系数得到的总概率对各地类进行空间分配,计算公式为:

$$TPTOPA_{i,u} = P_{i,u} + ELSA_u + ITER_u \quad (2)$$

式中: $TPTOPA_{i,u}$  为栅格  $i$  是土地利用类型  $u$  的总概率; $P_{i,u}$  为 Logistics 回归求得的空间分布概率; $ELSA_u$  为土地利用类型  $u$  的弹性系数; $ITER_u$  为迭代系数。

由表 1 可知,土地利用驱动与坡度和海拔关系密切,同时 ROC 值曲线大于 0.5,表明逐步回归方法能够较好地解释研究区各土地利用类型的转换概率。

表 1 额尔齐斯河流域土地利用类型与驱动因子的 Logistic 回归方程及 ROC 值

驱动因子	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
高程	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
坡度	0.008	0.021	—	—	—	-0.012
坡向	0.000	0.000	—	—	—	—
道路距离	3.491	-20.535	-4.087	23.874	-5.119	8.578
距离城镇距离	-1.653	-0.842	0.241	1.430	-1.657	0.373
国内生产总值	-0.005	0.003	-0.002	-0.006	—	0.004
农民人均纯收入	0.000	0.000	—	0.000	0.000	0.000
常数	8.922	-1.613	0.357	-2.835	8.081	-2.203
$R^2$	0.072	0.186	0.235	0.117	0.437	0.236
ROC	0.557	0.576	0.588	0.630	0.534	0.604

(3) 马尔科夫链模拟检验及 CLUE-S 模拟结果检验。应用卡方检验对马尔科夫链预测的未来各种土地利用结果进行验证。使用历史土地利用转移概率矩阵估算 2018 年额尔齐斯河流域不同土地利用面

积,并与其现实结果进行比较(图 1)。卡方检验结果和 kappa 系数计算公式分别为:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{O_i - E_i}{E_i} \quad (3)$$



式中:  $O_i$  为观测值;  $E_i$  为模拟值;  $\bar{E}_i$  为模拟期望

$$\text{kappa} = (P_a - P_c) / (P_p - P_c) \quad (4)$$

式中:  $P_a$  为正确模拟的比例;  $P_c$  为随机情况期望模拟比例;  $P_p$  为理想情况下正确模拟比例。

根据公式(4)得到模型卡方值 0.003 4, 小于  $\chi_{0.94(4)}^2 = 9.57$ , 即预测值与观测值差异并没有得到

不显著验证, 马尔科夫链预测的未来各种土地利用类型面积结果准确且可靠, 计算得到 kappa 系数为 0.814 6, 即模拟精度为 81.46%, 高于 80% 的检验标准。

CLUE-S 能够较准确地预测额尔齐斯河流域未来土地利用变化的空间格局, 结果合理可信。

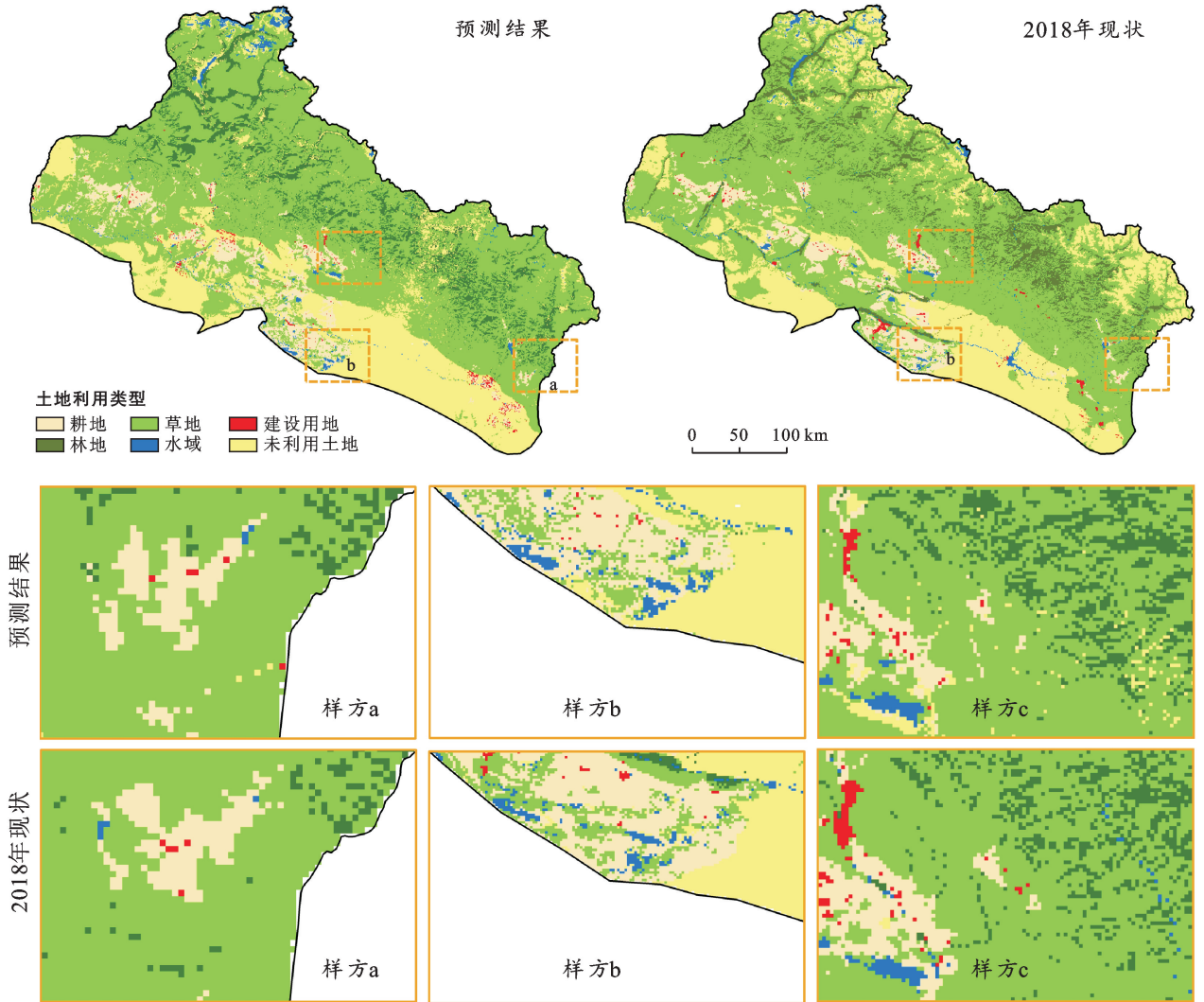


图 1 CLUE-S 模型预测结果及额尔齐斯河流域实际土地利用格局对比

2.2.2 流域生态系统服务价值评估 本研究参考谢高地<sup>[10]</sup>、Constanza 等人<sup>[5]</sup>的研究结果, 构建了额尔齐斯河流域生态系统服务价值当量因子, 由于额尔齐斯河流域属于新疆维吾尔自治区重要的旅游目的地, 一些特色建筑具有较高的美学价值景观, 根据相关成果<sup>[18]</sup>, 将建设用地参照荒漠设定生态系统服务价值当量因子。

借鉴谢高地等人的成果, 将额尔齐斯河流域生态系统服务当量因子的经济价值为流域平均粮食市场价值的 1/7, 相关数据由《阿勒泰地区统计年鉴》《阿勒泰地区统计公报(2000—2019 年)》和《全国农产品成本收益资料汇编 2000—2019 年》得到, 2000—2018

年全国粮食平均出售价格为 1 098.80~2 313 元/t, 同时得到全国和额尔齐斯河流域单位面积粮食产量范围分别为 4.16~7.01 t/hm<sup>2</sup>, 4.58~8.71 t/hm<sup>2</sup>, 获得额尔齐斯河流域生物量修正因子, 借鉴 Zhang 等人<sup>[17]</sup>成果, 额尔齐斯河流域不同土地利用类型生态系统服务价值范围在 802~2 502 元(表 2)。

$$V_{i,k} = \frac{1}{7} \times P \cdot Q \cdot D_{i,k} \cdot B \quad (5)$$

式中:  $V_{i,k}$  为额尔齐斯河流域生态系统服务价值当量(元);  $P$  为粮食平均价格(元/kg);  $Q$  为粮食平均产量(kg/hm<sup>2</sup>);  $D_{i,k}$  为第  $i$  类生态系统服务第  $k$  项服务功能的当量因子;  $B$  为生态系统服务当量因子调



整系数,额尔齐斯河流域为 0.724;

$$ESV = \sum (A_i \cdot V_{i,k}) \quad (6)$$

式中:ESV 为生态系统服务价值;  $A_i$  为土地利用类型  $i$  面积( $\text{hm}^2$ )。

表2 额尔齐斯河流域不同土地利用类型的生态系统服务价值当量

一级分类	二级分类	生态系统服务价值当量					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
供给服务	食物生产	1	0.33	0.43	0.45	0.01	0.00
	原料生产	0.39	2.98	0.36	0.30	0.03	0.00
	水资源供给	0.02	0.37	0.31	8.29	0.02	2.16
调节服务	气体调节	0.72	4.32	1.5	1.46	0.11	0.06
	气候调节	0.97	4.07	1.56	7.81	0.10	0.13
	净化环境	1.39	1.72	1.32	14.63	0.31	0.16
	水文调节	0.77	4.09	3.82	16.11	0.21	7.13
支持服务	土壤保持	1.03	2.86	2.40	0.93	0.13	0.00
	维持养分循环	0.12	0.22	0.18	0.07	0.01	0.00
	生物多样性	0.13	2.60	2.18	2.55	0.12	0.01
文化服务	美学景观	0.17	2.08	0.87	4.57	0.05	0.24
合计		6.71	25.64	14.93	57.17	1.1	9.89

2.2.3 土地利用变化与额尔齐斯河流域生态系统服务损益价值变动 已有研究成果中,使用单一动态度和综合动态度分别描述了不同土地类型及区域整体土地利用变化速率趋势和剧烈程度。

(1)单一土地利用动态度。一般情况下,单一动态度表征一个区域某一时间段内土地利用/覆被类型变化速率和剧烈程度。

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (7)$$

式中: $k$  为某种土地利用的单一动态度;  $U_a, U_b$  为区域研究期初和期末该生态系统的面积;  $T$  为研究时间段长,研究中  $T$  为年时间段;  $K$  表示土地利用/覆被类型的年变化率。

(2)综合动态度。综合土地利用类型动态度侧重研究区域土地利用变化幅度大小,计算公式为:

$$LC = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \Delta L W_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n L W_i} \right] \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (8)$$

式中:LC 表示研究区一定时间段内土地利用的年综合变化率;  $\Delta L W_{i-j}$  为研究时间段内第  $i$  类土地利用类型转为非  $i$  类土地利用类型面积的绝对值;  $T$  为研究时间段(a)。

### 2.3 土地利用变化与生态系统服务价值损益判别

本研究利用土地利用转移矩阵<sup>[19]</sup>和 ESV 损益计算公式,对研究区不同土地利用类型的土地相互间转换而形成的 ESV 价值损益进行定量化评估。在此基础上,运用格网对额尔齐斯河流域生态系统服务价值损益进行空间格局进行分析,刻画未来损益价值的空间规律。现有成果中,常用格网单元有 250 m × 250 m, 500 m × 500 m, 1 km × 1 km, 3 km × 3 km

等。现有成果解释研究尺度精细以及最小单元对研究结果产生较大影响<sup>[20]</sup>,研究发现相比其他大尺度,250 m × 250 m 网格尺度的分析结果能够充分体现额尔齐斯河流域生态系统服务价值损益的空间分异规律。本研究将额尔齐斯河流域按照 250 m × 250 m 大小进行划分,按照自然断点法将生态系统服务价值分为 5 级,使用空间计量软件 Geoda 软件进行生态系统服务价值损益的全局自相关分析,计算全局、局部 Moran's 指数以及局部  $G_i$  指数。

$$LP_i = \sum A_i \times (VC_{i,k} - VC'_{i,k}) \quad (9)$$

式中: $VC_{i,k} - VC'_{i,k}$  分别是第  $i$  种土地利用类型的第  $k$  种生态系统服务在土地利用转变前和转变后的生态系统服务价值当量价值(元/a)。

$$DY_t = \frac{L_{i,t_2} - L_{i,t_1}}{L_{i,t_1}} \times \frac{1}{t_2 - t_1} \times 100\% \quad (10)$$

式中: $DY_t$  为土地利用动态度(%);  $L_{i,t_1}, L_{i,t_2}$  分别为土地利用类型  $i$  在  $t_1$  和  $t_2$  年的面积( $\text{hm}^2$ )。

$$DY_t = \left| \frac{\sum_{i=1}^n \Delta L_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n L_i} \right| \times \frac{1}{t_2 - t_1} \times 100\% \quad (11)$$

$$IM_t = \frac{\sum (LP_{i,j} + LP_{j,i})}{2LP} \quad (12)$$

式中: $IM_t$  为土地利用变化对生态系统服务价值影响程度(元);  $LP_{i,j}$  为第  $i$  类土地利用类型转化为第  $j$  土地利用类型后生态系统服务价值损益(元/ $\text{hm}^2$ );  $LP$  为生态系统服务价值损益(元)。

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} (\chi_i - \bar{\chi})(\chi_j - \bar{\chi})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij}} \quad (13)$$

$$I_i = \frac{(\chi_i - \bar{\chi}) \sum_{j \neq i}^n (\chi_j - \bar{\chi})}{S^2} \quad (14)$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_i (\chi_i - \bar{\chi})^2 \quad (15)$$

$$G_i = \frac{\sum_{j \neq i}^n w_{ij} \chi_j}{\sum_{j \neq i}^n \chi_j} \quad (16)$$

式中： $I$ 、 $I_i$  分别为全局和局部 Moran's  $I$ ； $G_i$  为局部  $G_i$  统计量； $x_i$  为网格  $i$  从 2000—2030 年生态系统服务价值损益（元/hm<sup>2</sup>）； $\bar{\chi}$  为所有网格内生态系统服务价值损益平均值（元/hm<sup>2</sup>）； $w_{ij}$  为网格  $i$  与网格  $j$  之间的空间权重； $n$  为网格个数； $S$  为网格  $i$  的生态系统服务价值损益方差。

### 3 结果与分析

#### 3.1 额尔齐斯河流域土地利用变化趋势

2000—2018 年额尔齐斯河流域耕地面积由 1 719.02 km<sup>2</sup> 增加到 3 174.65 km<sup>2</sup>（图 2），年均增长 3.47%，增加耕地主要由草地、未利用土地转化而来，分别增加了 848.48 和 678.57 km<sup>2</sup>。由于农业生产的利益驱动，到 2030 年耕地面积持续增加到 4 070 km<sup>2</sup>，草地和未利用土地向耕地转化的土地类型，分别为 1 279.01 和 951 km<sup>2</sup>。2000—2018 年，林地面积呈现快速下降趋势，由 2000 年的 7 547.26 km<sup>2</sup> 减少到 2018 年的 5 424.36 km<sup>2</sup>，年均增长率为 -2.14%，到 2030 年林地面积减少到 3 945 km<sup>2</sup>，43% 的林地转化为草地，13.57% 的林地转化为未利用土地，其次是 3.86% 的林地转化为耕地。2000—2018 年，草地呈波动上升趋势，年均增长速度 0.03%，但是草地与耕地、未利用土地之间的转换幅度较为剧烈。经预测，到 2030 年草地面积呈现波动下降趋势，分别有 12%，4.64%，3.78% 的草地转换为未利用土地，耕地和林地，同时到 2030 年 11% 的林地、10% 的未利用土地转化为草地。2000—2018 年，水域面积由 664.08 km<sup>2</sup> 增长到 697.42 km<sup>2</sup>，年均增长速度 0.19%。到 2030 年，水域面积为 697.42 km<sup>2</sup>。水域面积大部分转向了未利用土地和草地，转出面积分别占到水域总面积的 27.14% 和 19.98%。建设用地由 2000 年的 80.04 km<sup>2</sup> 增长到 220.95 km<sup>2</sup>，年均增长速度 5.8%。到 2030 年，建设用地规模预计达到 304.83 km<sup>2</sup>，未利用土地、草地、耕地的贡献最高，其贡献比例分别达到 44%，24% 和 13%。从未利用土地来看，由 2000 年的 10 988.38 km<sup>2</sup> 增加到 2018 年的 11 346.37 km<sup>2</sup>，年均增速为 0.18%。到 2030 年，未利用土地规模预计达到 11 372.42 km<sup>2</sup>，林地和草地是转化为未利用土地的主要类型。

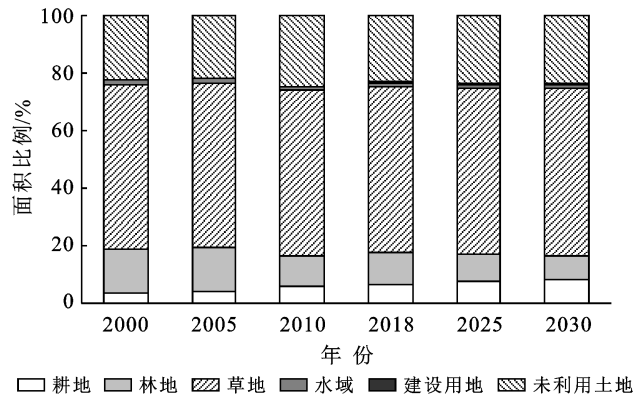


图 2 额尔齐斯河流域 2000—2030 年不同土地利用类型面积变化

2000—2010 年，土地利用综合动态度由 0.13% 上升到 0.40%，这一时期耕地和建设用地的快速变化，其中建设用地单一动态度由 2.28% 上升到 8.66%，耕地由 0.16% 上升到 6.03%。在此之后，土地利用综合动态度呈趋缓态势，综合动态度在 2025 年达到最低（0.19%），到 2030 年，综合动态度呈缓慢上升趋势（0.23%）。2000—2030 年，建设用地、耕地、水域、未利用土地单一动态度呈现正增长，分别为 9.36%，4.56%，0.17% 和 0.12%，林地和草地的单一动态度始终小于 0，说明林地和草地持续地向其他土地利用类型进行转换（图 3）。

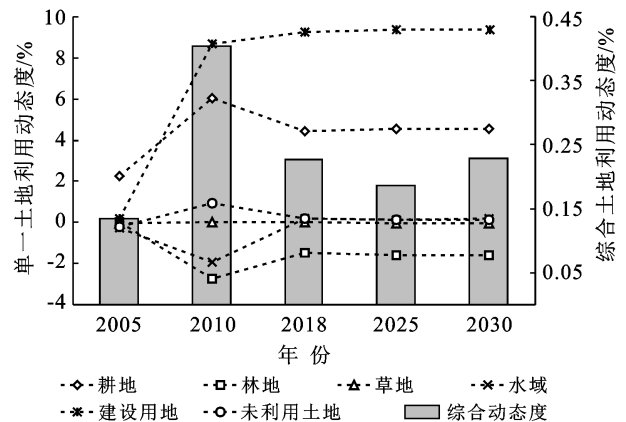


图 3 额尔齐斯河流域 2005—2030 年土地利用动态度变化

#### 3.2 额尔齐斯河流域生态系统服务价值变化

2000—2018 年，额尔齐斯河流域生态系统服务价值 518.16 亿元增长到 1 832.44 亿元，到 2030 年，流域生态系统服务价值波动缓慢下降趋势维持在 1 777.86 亿元。耕地的生态系统服务价值一直处于增加趋势，由 2000 年的 7.74 亿元增加到 2018 年的 52.97 亿元，经预测耕地生态系统服务价值到 2030 年达到 76.13 亿元。林地生态系统服务价值在 2018 年达到最大值 346.38 亿元，此后逐渐降低到 2030 年的 256.24 亿元。草地生态系统服务价值处于持续增长

趋势,到2030年可达1 059.89亿元。水域生态系统服务价值由2000年的25.30亿元增加到2030年的100.57亿元。建设用地生态系统服务价值由2000年

的0.02亿元增加到2030年的0.28亿元。未利用土地由2000年的72.93亿元,增加到2030年的284.76亿元(表4)。

表4 额尔齐斯河流域2000—2030年生态系统服务价值变化

亿元

年份	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地	小计
2000	7.74	129.70	282.48	25.30	0.02	72.93	518.16
2005	17.65	221.04	523.02	46.93	0.05	135.97	944.65
2010	33.18	319.65	827.70	75.06	0.11	216.56	1 472.28
2015	48.58	366.21	1 046.76	95.77	0.17	275.73	1 833.23
2018	52.97	346.38	1 055.91	98.14	0.20	279.19	1 832.79
2025	62.42	293.77	1 058.40	98.79	0.24	282.46	1 796.09
2030	76.13	256.24	1 059.89	100.57	0.28	284.76	1 777.86
2000—2018	45.23	216.68	773.43	72.85	0.18	206.26	1 314.63
2018—2030	23.16	-90.14	3.98	2.42	0.08	5.57	-54.93
2000—2030	68.39	126.54	777.40	75.27	0.26	211.83	1 259.70

2000—2030年的各类生态系统服务价值呈现出正增长趋势(表5),其中水文调节的生态系统服务增长量最高,由153.27亿元增长到553.79亿元,其余依次为:是土壤保持(149.75亿元)>生物多样性(131.11亿元)>气候调节(127.67亿元)>净化环境(112.65亿元)>气体调节(118.81亿元)>水资源供给(75.33亿元)>美学景观(68.32亿元)>原料生产(37.42亿元)>食物生产(33.77亿元)>维持养分循环(11.65亿元)。

然而,自2000年以来,除了食物生产、水资源供给之外,其余各类生态系统服务正增长趋势并没有一直持续,尤其自2015年以后,气体调节(12.24亿元)、原料生产(减少11.24亿元)、生物多样性维持(减少8.61亿元)、土壤保持(减少6.91亿元)、气候调节(减少7.97亿元)出现了较大浮动的减少,造成这一现象的主要原因可能是由于耕地面积的持续的增长,引起的食物生产价值持续上升,而林地面积持续萎缩则带来了的是森林生态系统提供的服务价值下降。

表5 额尔齐斯河流域各类生态系统服务价值

亿元

服务类型	2000年	2005年	2010年	2015年	2018年	2025年	2030年	2000—2030年	2015—2030年	
供给服务	食物	11.16	20.91	33.49	42.85	43.54	44.34	44.93	33.77	2.08
	原料	22.47	39.57	59.43	71.13	69.31	63.81	59.89	37.42	-11.24
	水资源	27.36	50.60	80.08	101.27	102.29	102.42	102.69	75.33	1.41
调节服务	气体	52.15	93.71	143.81	176.20	174.33	166.77	163.96	111.81	-12.24
	气候	55.64	100.50	155.15	191.28	190.10	183.52	183.32	127.67	-7.97
	净化	42.93	78.94	124.21	156.15	157.20	156.07	155.58	112.65	-0.57
	水文	153.57	282.38	443.92	557.69	560.54	556.44	553.79	400.22	-3.90
支持服务	土壤	61.48	112.20	175.02	218.13	218.10	214.10	211.22	149.75	-6.91
	维持	4.69	8.58	13.41	16.75	16.77	16.52	16.34	11.65	-0.41
	生物	55.75	101.35	157.48	195.47	194.99	190.23	186.86	131.11	-8.61
文化服务	美学	30.97	55.91	86.27	106.31	105.62	101.87	99.29	68.32	-7.02
合计	518.17	944.65	1 472.27	1 833.23	1 832.79	1 796.09	1 777.87	1 259.7	-55.38	

### 3.3 额尔齐斯河流域生态系统服务价值损益时空变化

2000—2030年,流域生态系统服务损益价值为263.97亿元,耕地转换为林地(13.74亿元),耕地转换为草地(26.61亿元),草地转换为林地(85.66亿元),草地转换为水域(13.87亿元),未利用土地转换为林地、草地和水域(40.16亿元、41.82亿元、21.87亿元)水域转换为草地(16.89亿元),水域转换为未利用土地18.31亿元。2000—2030年,流域生态系统服务价

值损失为108.80亿元,其中草地转换为未利用土地损失最大(34.39亿元),所占比例达到31.61%,其次是林地转换为草地(28.49亿元),所占比例26.18%,再次是水域转换为未利用土地(18.31亿元),所占比例16.83%。额尔齐斯河流域生态系统服务价值的增值主要是源于其他土地类型向林地和草地转换,而损失主要是源于林地、草地以及水域向其他土地类型进行转换而造成(图4)。



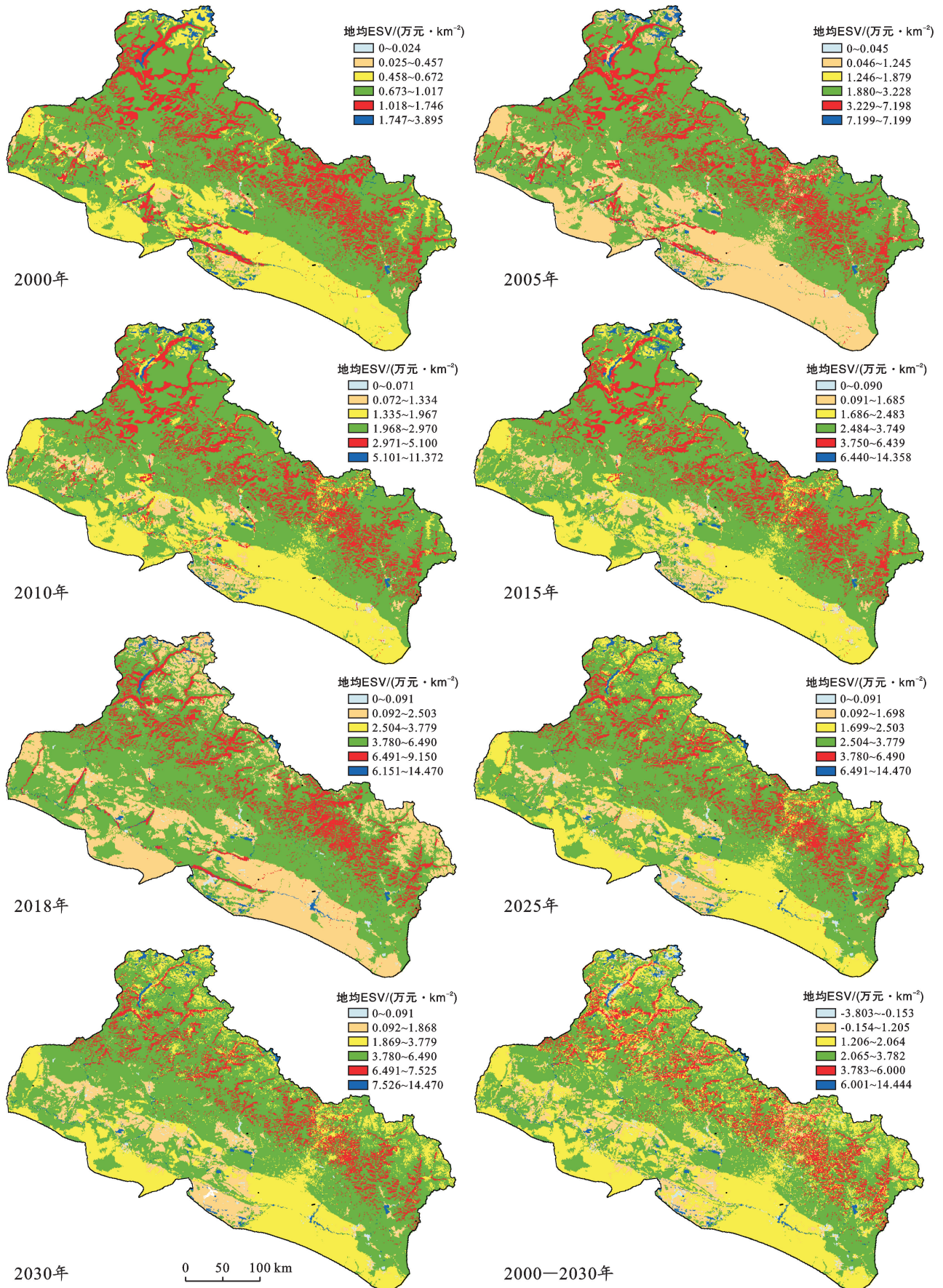


图 4 额尔齐斯河流域生态系统服务价值(ESV)空间分布格局及损益

2000 年额尔齐斯河流域生态系统服务价值呈现出较为均匀的空间分布,北部海拔较高的阿尔泰山系的生态系统服务价值较高。到 2018 年,耕地面积呈现快速上升,林地面积持续萎缩,农业生产使得南部河谷地区林地和草地转换为耕地,使流域生态系统服

务价值的分布格局差异逐渐显现(图 5)。探索性空间分析结果显示,流域生态系统服务价值损益全局 Moran's  $I$  指数及  $p$  值分别为 0.123 002 和 0.000 0 (表 6),说明生态系统服务价值损益表现为显著的正相关关系。

表 6 额尔齐斯河流域生态系统服务价值损益全局自相关

全局自相关	Moran's $I$	Z 值	$p$ 值
2000—2030 年额尔齐斯河流域生态系统服务价值损益	0.123 002	28.611 289	0.000 00

由图 5 可以看出,流域生态系统服务价值损益的热点主要集中在哈巴河县加依勒玛乡、布尔津县禾木哈纳斯蒙古民族乡、齐巴尔乡、布尔津镇、阿勒泰市阿克吐木斯克牧场、富蕴县可可托海镇、克孜勒希力克乡,青河县阿热勒托别镇等区域,表现为高一高、高一低集聚特征和热点。而生态系统服务价值损益

冷点主要分布在布尔津县喀拉希力克乡、哈巴河县加依勒玛乡、萨尔塔木乡、萨尔布拉克乡,阿勒泰市切木尔切克镇、兵团 181 团、福海解特阿热勒乡、阿尔边乡、阔克阿尕什乡、汗德尕特蒙古族乡,富蕴县克孜勒希力克乡、库额尔齐斯镇呈现低—低、低—高的集聚特点。

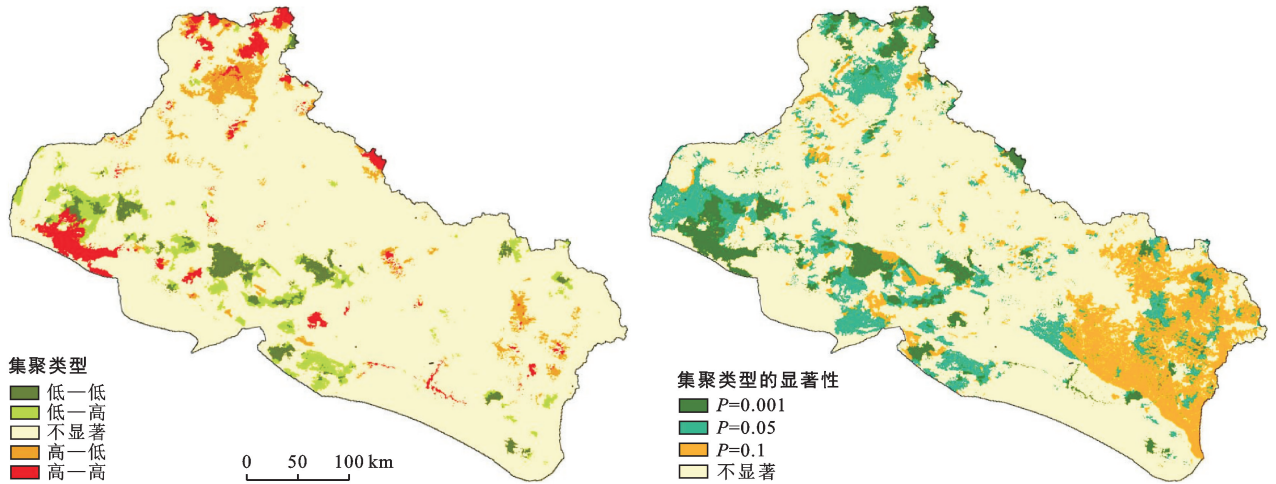


图 5 2000—2030 年额尔齐斯河流域生态系统服务价值损益的局域空间自相关分析

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

(1) 2000—2030 年,额尔齐斯河流域土地利用变化导致的生态系统服务损失价值为 263.97 亿元,耕地向林地、草地、草地向林地转换是主要贡献的类型。随着耕地向林草的转换,原因是农业生产扩张,林地和草地向耕地转换以及缺少有效灌溉而造成弃荒行为,价值损益在全局和局部尺度上呈现出较为显著的正向空间自相关特点。额尔齐斯河流域生态系统服务损益变化与其他区域存在较大差别<sup>[9,21]</sup>,额尔齐斯河流域土地变化主要驱动力是源于农业生产无序扩张,大量林地和草地转化耕地和用来放牧。一直以来,人类活动在额尔齐斯河流域 LUCC 之间的联系中扮演了非常重要的角色:一方面,阿勒泰地区人口

从 1990 年的 51.28 万人(自然增长率 15‰,新疆地区平均水平为 11.17‰)到 2018 年的 65.95 万人(自然增长率 4.63‰,新疆地区平均水平为 3.69‰),人口增长直接加大了对土地的生计需求;另一方面,市场对农牧民的土地行为决策影响:面对食物,肉类的巨大市场需求,刺激农牧民将越来越多的林地和草地用作种植经济作物和放牧,然而由于农产品周期性因素造成的供过于求,又造成农牧民土地弃耕和牲畜无法及时出售,引发了土地荒漠化问题。

(2) 2000—2018 年额尔齐斯河流域耕地面积的持续扩大,林地持续地转化为其他土地利用类型,到 2030 年耕地占到流域总面积的 8.41%。林地面积呈现不断萎缩的趋势,年均增长率为 -2.14%(2000—2018 年),这也直接印证刘汉初等人<sup>[22]</sup>的结论,即森林种群死亡、人为砍伐以及矿产资源开发,造成森林



生态系统受到极大的生存威胁。本研究还进一步弥补孙庆祥等<sup>[23]</sup>人并没有对森林生态系统服务价值时空变动趋势进行分析的不足之处,即得到额尔齐斯河流域林地生态系统服务价值呈倒 U 形变化趋势,由 2000 年的 129.70 亿元增加到 2018 年的 346.38 亿元,预测 2030 年处于 256.24 亿元左右。2018 年林地生态系统服务价值大约相当于 2018 年阿勒泰地区 GDP (284.09 亿元)的 1.22 倍左右。

(3) 土地利用变化驱动的预测不仅要基于地表农田、森林、草地以及湿地的自然地理现状,还需要结合生态修复工程;相比其他流域<sup>[24]</sup>,2019 年以来额尔齐斯河流域山水林田湖草生态保护修复工程试点项目在该地区进行试点实施,该项工程极大地推进流域生态系统整体保护,更加重视山水林田湖草生命共同体建设。那么,生态系统服务价值损益预测还需要建立一个生态保护情景,即更多的土地被用来提供更多的生态系统服务产品。在未来研究中,需要考察生态保护工程对土地利用驱动的影响,将宏观遥感数据与家庭调查、人口数据、土地经济调查等其他微观数据结合起来,以便更好地考察土地利用转型与生态系统服务价值变动,以此来制定长期的土地管理政策。

(4) 从不同土地类型来看,额尔齐斯河流域的水域、森林、草地提供了大量的生态系统服务产品和服务。由于全球气候变暖大背景下,流域北部山区地表覆被发生显著变化,尤其体现在冰川融雪加快,使得额尔齐斯河流域水源涵养服务功能得到一定程度提升。但这一提升有可能会在未来带来较多的自然灾害与极端水文事件,在后期研究中还需要借助更为充实的气温、降雨数据来模拟气候变化情景下冰川积雪变化与生态系统服务增减规律。此外,气候变化与植被覆盖存在紧密联系,尤其是气温与降雨变动带来的森林、草地覆盖变化,在后续跟踪研究中还需要纳入草地、林地类型的 NDVI 指数等驱动因子对生态系统服务价值进行更加精准模拟和预测。

## 4.2 结论与建议

(1) 2000—2018 年新疆额尔齐斯河流域林地持续地转化为其他土地,耕地面积的大幅度增长,这一趋势一直持续到 2030 年。额尔齐斯河流域生态系统服务价值在 2000—2018 年由 518.16 亿元增长到 1 832.44 亿元,在此后生态系统服务价值处于波动下降趋势,到 2030 年,额尔齐斯河流域生态系统服务价值维持在 1 777.86 亿元。

(2) 2000—2030 年,额尔齐斯河流域生态系统服务价值损失为 108.80 亿元,其中草地转换为未利用土地的损失最大(34.39 亿元),所占比例为 31.61%,

其次是林地转换为草地(28.49 亿元),所占比例 26.18%,再次是水域转换为未利用土地(18.31 亿元),所占比例为 16.83%。

(3) 额尔齐斯河流域生态系统服务价值损益与南北地形存在紧密联系,呈现“北高南低”的发展格局,价值损益在全局和局部上均呈现显著的正向空间自相关。

(4) 应严格控制北部山区土地利用强度,严格执行国家设定的生态红线政策,进一步优化土地利用结构,进一步扩大退耕还林还草实施范围,调整农业产业结构,严格控制食葵等高耗水农作物的种植面积和范围。

(5) 在南部河谷地区,应加大耕地生态保护工程,禁止土地开荒行为,扩大草原生态保护奖励补助的范围,纳入流域两岸不适宜放牧的沙化草地进行人工封禁保护,精准实施草地生态修复和保护工程。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] Daily G C, Soederqvist T, Aniyar S, et al. The value of nature and the nature of value [J]. *Science*, 2000, 289 (5478):395-396.
- [2] Foley J A. Global consequences of land use [J]. *Science*, 2005, 309(5734):570-574.
- [3] 王帅,傅伯杰,田汉勤,等.全球变化对生态系统服务的影响研究进展[J].*中国基础科学*, 2020, 22(3):29-34.
- [4] Arowolo A O, Deng Xiangzheng, Olatunji O A, et al. Assessing changes in the value of ecosystem services in response to land-use/land-cover dynamics in Nigeria [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 636:597-609.
- [5] 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(15):253-260.
- [6] Sala N, Graciela B. Targeted bioluminescent indicators in living cells[J]. *Methods in Enzymology*, 2000, 305: 479-498.
- [7] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, et al. Human domination of earth's ecosystems [J]. *Science*, 1997, 277(5325):494-499.
- [8] 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, 1(4):480-491.
- [9] 刘亚茹,王聪,严力蛟.华北平原农区土地利用变化对生态系统服务的影响:以河南省商丘市为例[J].*应用生态学报*, 2018, 29(5):1597-1606.
- [10] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.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[J].*自然资源学报*, 2015, 30(8):1243-1254.
- [11] 郭椿阳,高尚,周伯燕,等.基于格网的伏牛山区土地利用变化对生态服务价值影响研究[J].*生态学报*, 2019,



- 39(10):86-97.
- [12] 雷军成,王莎,汪金梅,等.土地利用变化对寻乌县生态系统服务价值的影响[J].生态学报,2019,39(9):74-84.
- [13] 冯源,肖文发,朱建华,等.造林对区域森林生态系统碳储量和固碳速率的影响[J].生态与农村环境学报,2020,36(3):281-290.
- [14] 赵旭,汤峰,张蓬涛,等.基于 CLUE-S 模型的县域生产—生活—生态空间冲突动态模拟及特征分析[J].生态学报,2019,39(16):5897-5908.
- [15] 熊鹰,张方明,龚长安,等. LUCC 影响下湖南省生态系统服务价值时空演变[J].长江流域资源与环境,2018,027(6):1397-1408.
- [16] 李生宇,雷加强.额尔齐斯河流域生态系统格局及变化[J].干旱区研究,2002,19(2):56-61.
- [17] Zhang Zhiping, Xia Fuqiang, Yang Degang, et al. Spatiotemporal characteristics in ecosystem service value and its interaction with human activities in Xinjiang, China [J]. Ecological Indicators, 2020,110:105826.
- [18] 刘时栋,刘琳,张建军,等.基于生态系统服务能力提升的干旱区生态保护与修复研究:以额尔齐斯河流域生态保护与修复试点工程区为例[J].生态学报,2019,39(23):8998-9007.
- [19] 彭文甫,周介铭,罗怀良,等.城市土地利用变化对生态系统服务价值损益估算:以成都市为例[J].水土保持研究,2011,18(4):43-51.
- [20] Wu Meng, Ren Xiangyu, Che Yue, et al. 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 [J]. Environmental Management, 2015,56(2):402-419.
- [21] 荣益,李超,许策,等.城镇化过程中生态系统服务价值变化及人类活动影响的空间分异:以黄骅市为例[J].生态学杂志,2017,36(5):1374-1381.
- [22] Liu Hanchu, Feng Jie, Liu Baoyin, et al. Practical exploration of ecological restoration and management of the mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands system in the Irtysh River basin in Altay, Xinjiang [J]. Journal of Resources and Ecology, 2021, 12 ( 6 ): 766-776.
- [23] 孙庆祥,周华荣.阿尔泰山森林生态系统服务功能及其价值评估[J].干旱区地理,2020,43(5):176-185.
- [24] 苏维词,杨吉.山水林(草)田湖人生命共同体健康评价及治理对策:以长江三峡水库重庆库区为例[J].水土保持通报,2020,40(5):209-217.

## 《水土保持通报》被EBSCO学术数据库收录

EBSCO Industries, Inc. 是一家从事多元化产业经营的跨国公司,由 E. B. Stephens 于 1944 年创立。EBSCO 总部位于美国阿拉巴马州伯明翰市,在 23 个国家设有办公室,服务于全球 200 个国家和地区的客户。EBSCO Publishing 是该公司的一个分公司,全面负责文献信息相关产品和服务。EBSCO Publishing 的 Academic Search Premier 是为学术机构而设计的多学科全文



数据库,提供众多极具价值的学术性期刊资料,以及大量期刊的文摘和索引。《水土保持通报》从 2022 年(第 42 卷)第 3 期开始被 EBSCO 学术数据库(Research Database)收录。