

DOI: 10.5846/stxb202109122560

姚礼堂, 张学斌, 周亮, 罗君, 王梓洋, 雷越, 李意霞. “山地-绿洲-荒漠”复合系统土地利用变化的生态系统服务权衡与协同效应——以张掖市为例. 生态学报, 2022, 42(20): 8138-8151.

Yao L T, Zhang X B, Zhou L, Luo J, Wang Z Y, Lei Y, Li Y X. Ecosystem service tradeoffs and synergies effects of land use change in Mountain-Oasis-Desert complex system: A case study of Zhangye City. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(20): 8138-8151.

“山地-绿洲-荒漠”复合系统土地利用变化的生态系统服务权衡与协同效应

——以张掖市为例

姚礼堂¹, 张学斌^{1,2,3,*}, 周 亮⁴, 罗 君⁵, 王梓洋¹, 雷 越¹, 李意霞¹

1 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

2 甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室, 兰州 730070

3 甘肃省土地利用与综合整治工程研究中心, 兰州 730070

4 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 兰州 730070

5 甘肃农业大学资源与环境学院, 兰州 730070

摘要:开展复合生态系统土地利用变化的生态服务效应研究可为优化国土空间格局和强化生态系统管理提供重要的基础依据。以干旱区“山地-绿洲-荒漠”复合系统的典型区域张掖市为例, 基于 1987 年、2000 年和 2018 年 3 期土地利用数据, 以乡级行政区为基本单元, 引入相对优势度指数划分山地、绿洲、荒漠子系统, 研究复合系统的土地利用变化特征及生态系统服务权衡/协同效应。结果表明: (1) 张掖市复合系统呈现地域分异特征, 由南部山地系统, 中部绿洲系统和北部荒漠系统构成; 山地系统以林地和草地为主, 绿洲系统以耕地和建设用地为主, 荒漠系统以未利用地为主。(2) 从时间上看, 2000—2018 年各系统的土地利用变化更强烈, 其中, 绿洲系统的耕地面积增加量最大, 为 363.08 km², 荒漠系统的建设用地面积增加幅度最大, 为 78.23%。各系统土地利用转移模式为: 山地系统以草地转耕地为主, 绿洲系统和荒漠系统以未利用地转耕地为主。(3) 张掖市复合系统的生态服务价值呈增加趋势, 其中, 荒漠系统生态服务价值量的增幅最大, 各子系统的价值量之间的关系表现为山地系统>绿洲系统>荒漠系统, 耕地对各系统生态服务价值贡献量最大。(4) 张掖市土地利用变化的协同效应大于权衡效应, 其中荒漠系统的生态服务之间均为协同关系, 山地系统中供给服务与其他服务呈现权衡关系, 占比 32.73%, 绿洲系统中调节服务与其他服务呈现权衡关系, 占比 18.18%。

关键词:复合系统; 绿洲; 未利用地; 生态系统; 干旱区

Ecosystem service tradeoffs and synergies effects of land use change in Mountain-Oasis-Desert complex system: A case study of Zhangye City

YAO Litang¹, ZHANG Xuebin^{1,2,3,*}, ZHOU Liang⁴, LUO Jun⁵, WANG Ziyang¹, LEI Yue¹, LI Yixia¹

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

2 Key Laboratory of Resource Environment and Sustainable Development of Oasis, Gansu Province, Lanzhou 730070, China

3 Gansu Engineering Research Center of Land Utilization and Comprehension Consolidation, Lanzhou 730070, China

4 Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

5 College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

基金项目:国家自然科学基金项目(42101276); 甘肃省科技计划项目(20JR5RA529); 国家自然科学基金项目(41661035); 国家自然科学基金地区基金(41961027)

收稿日期:2021-09-12; **网络出版日期:**2022-06-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangxb428@163.com

Abstract: Research on the ecosystem service effects of land use change in complex ecosystem can provide an important basis for optimizing land spatial pattern and strengthening ecosystem management. Taking Zhangye City, a typical area of Mountain-Oasis-Desert complex system in arid area as an example, based on three phases of land use data in 1987, 2000 and 2018, taking the township administrative region as the basic unit, the comparative advantage index is introduced to divide the mountain, oasis and desert sub-system, and the land use change characteristics of the complex system and the trade-off/synergy effects of ecosystem services are studied. The results show that: (1) The complex system of Zhangye City presents the characteristics of regional differentiation, which is composed of southern mountain system, central oasis system and northern desert system. The mountain system is mainly consisted of forest land and grassland, the oasis system is mainly consisted of cultivated land and construction land, and the desert system is mainly consisted of unused land. (2) In terms of time change, the land use change of each system was more intense from 2000 to 2018. Among them, the increase of the cultivated land area of oasis system was the largest with 363.08 km², and the increase rang of the construction land area of desert system was the largest with 78.23%. The land use transfer mode of each system is as follows: the mountain system is mainly from grassland turn into cultivated land, and the oasis system and desert system are mainly from unused land turn into cultivated land. (3) The ecosystem service value of the complex system in Zhangye City shows an increasing trend. Among them, the increase rang of the ecosystem service value of the desert system is the largest. The relationship between the value of each sub-system is mountain system > oasis system > desert system, and compared with other land use types, the contribution of the cultivated land to the ecological service value of each system is the largest. (4) The synergy effect of land use change in Zhangye is greater than the trade-off effect. Among them, the ecosystem services of the desert ecosystem are all synergistic relationships. The supply service of the mountain system has a trade-off relationship with other services, accounting for 32.73% of the trade-off relationship, and the regulation service of the oasis system has a trade-off relationship with other services, accounting for 18.18% of the trade-off relationship.

Key Words: complex system; oasis; unused land; ecosystem; arid area

生态系统服务是指人类可从生态系统中直接或间接获得的所有利益,是人类生存和发展的重要基础^[1-2]。土地利用变化指由土地自身特性变化及人类外力作用方式变化引发的土地利用方式、覆被类型和使用强度的变化,是人类活动与自然环境相互作用最集中的表现,受到自然环境与社会经济活动的综合作用,极大影响着生态系统的结构变化和生态系统服务功能的大小^[3-4]。复合系统具有多系统耦合特性,在构成该系统的子系统的特征制约下^[5],开展复合系统土地利用变化的生态系统服务效应研究,是加强生态系统管理的关键问题,也是国土空间格局优化的重要依据。

生态系统的复杂性和空间异质性构成了生态系统服务的多样性^[6-8]。当前国内外学者关注生态系统服务的同时^[9-10],一方面侧重研究生态系统服务之间复杂的、非线性关联机制^[10-12],将这种关联抽象概括为此消彼长的权衡关系和相互促进的协同关系^[13-14]。孙艺杰等^[15]对汉中盆地和关中盆地进行了对比研究,发现位于半湿润半干旱区的关中盆地权衡关系呈增强趋势,且变化速度高于湿润区的汉中盆地;王晓萌等^[16]关注到河北省土地利用变化对农作物生产、碳储量、生境质量和土壤保持等生态服务的影响,并从省域尺度和区域空间分异视角分析了生态系统服务间权衡/协同关系;方露露等^[17]定量化研究了长江和黄河流域的 NPP、产水服务、土壤保持等服务之间的权衡/协同关系。在土地利用变化的生态效应方面,相关研究多集中研究土地利用变化引发的生态环境效应^[18-19]、土地利用变化对生态系统服务价值的影响^[20-22]。黄美等^[23]基于定量分析探究了黄河三角洲“三生”用地转型的生态环境效应;欧阳晓等^[24]基于 FLUS 模型分析了不同情境的土地利用变化模拟下生态系统服务价值的变化机制;谢余初等^[25]研究了干旱区绿洲土地利用变化的生态系统服务价值响应。上述研究为了解生态系统服务相互之间的复杂联系和约束效应做出了一定贡献,但对复合系统土地利用变化的生态系统服务效应研究较少,尤其是土地利用变化的生态系统服务权衡/协同效应。

干旱区“山地-绿洲-荒漠”复合系统具有多系统的耦合特征,该特征受到构成复合系统的山地系统、绿洲系统和荒漠系统的特征约束,研究各子系统的特征对于揭示复合系统的耦合特征、客观了解复合系统的异质性具有十分重要的意义^[26-27]。张掖市是干旱区“山地-绿洲-荒漠”复合系统的典型区域,近年来随着社会经济发展和城镇化进程不断加快,系统内部土地利用变化剧烈,对生态系统的结构和功能产生了较大影响,同时人类活动对生态系统的消极影响持续增加,生态环境问题日益增多,生态保护和生态系统管理等面临诸多挑战。本文以张掖市为例,探究复合系统土地利用变化的生态系统服务权衡/协同效应,以期为干旱区国土空间格局优化和生态系统管理提供基础依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

张掖市位于甘肃省西北部,处于河西走廊中段,东与金昌市和武威市相接,西至嘉峪关市和酒泉市,南与青海省接壤,北邻内蒙古自治区,东西长 210—465 km,南北宽 30—148 km,地理位置介于 37°28′—39°57′N, 97°20′—102°12′E(图 1),地形狭长,形似“奔马”,海拔高度 1235—5573 m。境内大体分为三大地形区,南部为祁连山地,北部为合黎山—龙首山,中部为走廊平原,全国第二大内陆河——黑河贯穿全境。张掖市辖甘州区、高台县、临泽县、民乐县、山丹县和肃南裕固族自治县 1 区 5 县,共 62 个乡镇(镇、街道),总面积 $3.85 \times 10^4 \text{ km}^2$,占河西走廊面积的 14.82%,占甘肃省总面积的 9.05%。

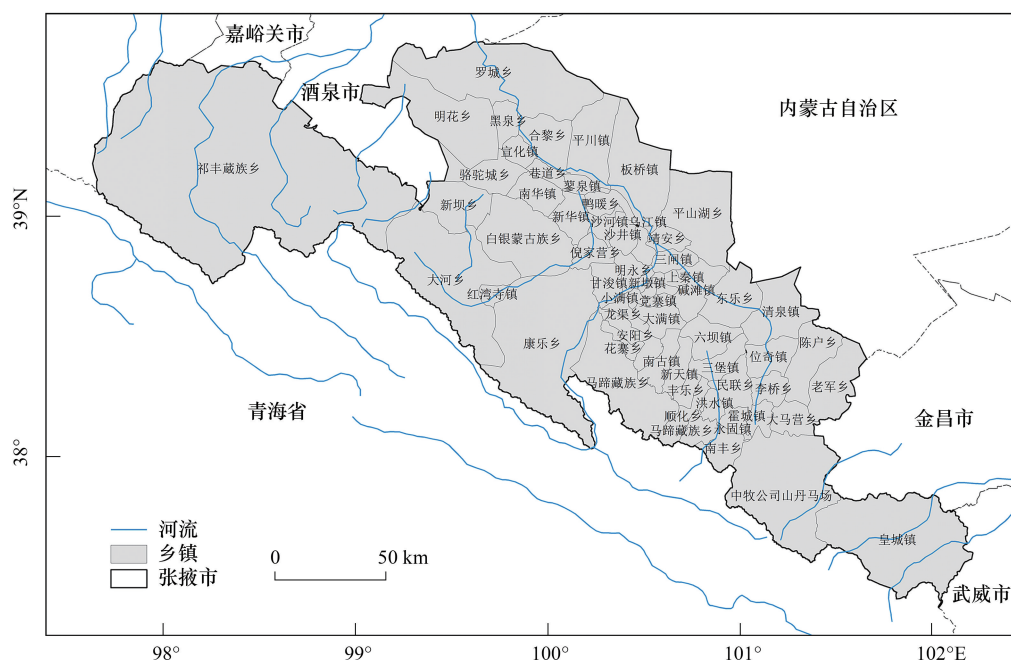


图 1 研究区概况

Fig.1 Survey of the Study area

1.2 数据来源及处理

本研究采用的土地利用数据来源于地理空间数据云 Landsat TM 和 ETM 遥感影像,分辨率 30 m,数据采集于 6 月至 8 月影像质量较好时段。研究选取 1987 年、2000 年、2018 年数据,借助 ENVI、ArcGIS 10.4 等软件进行人工目视解译,解译精度为 85.72%。土地利用分类主要参考甘肃省《生态十年环境监测土地覆盖分类体系(2013 年版)》,并结合张掖市实际,将土地利用类型分为耕地、林地、草地、湿地、水域、未利用地和建设用地。粮食价格、产量和粮食播种面积来源于《中国粮食年鉴 2018》和《张掖市统计年鉴》。

1.3 研究方法

1.3.1 复合系统类型划分

以乡镇为基本单元,引入相对优势度指数(Dominance Index, D),用于反映某乡镇土地利用类型相对于整个张掖市的重要性^[28],进而识别其所属的生态系统类型。其计算公式如下:

$$D = \frac{A_{ik}/A_{ir}}{A_k/A_r} \quad (1)$$

式中, A_{ik} 为 k 乡镇第 i 类功能用地面积, A_{ir} 为张掖市第 i 类功能用地面积, A_k 为 k 乡镇面积, A_r 为张掖市总面积。相对优势度指数最大,表明乡镇的该类功能用地相对于整个张掖市的该类功能用地具有优势,据此将张掖市乡镇划归为不同生态系统。

1.3.2 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵^[29]能够揭示一定时期内土地利用类型变化的方向和面积大小,反映不同土地利用类型之间的相互转换关系,进一步可以了解不同地类转移前后的结构特征,其计算公式如下:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, S 为面积, n 为地类数量, i, j 分别为研究期始、末的土地利用类型。矩阵中行元素表示 i 种地类转出到其他地类的面积,列元素表示其他地类转入到 j 种地类的面积。

1.3.3 生态系统服务价值

借助谢高地等^[30]修订的中国陆地生态系统服务价值当量表,依据粮食产量及价格进行修正:1987—2018年张掖市平均粮食产量为 6681 kg/hm^2 , 2018年张掖市平均粮食价格为 2.2 元/kg ,自然条件下生态系统提供的经济价值为现有单位面积耕地提供的粮食价值的 $1/7$ ^[31],计算可得张掖市生态系统服务的当量因子为 2100 元/hm^2 (表1)。为深入研究生态系统服务价值的变化特征,以张掖市乡级行政区为基本单元,分别核算每个乡镇的生态系统服务价值,其计算公式如下:

$$ESV_{xz} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_j E_{ij} \quad (i = 1, 2, \cdots, m; j = 1, 2, \cdots, n) \quad (3)$$

式中, ESV_{xz} 表示每个乡镇的生态系统服务价值; A_j 为乡镇中第 j 类生态系统的面积; E_{ij} 为第 j 类生态系统中第 i 类生态系统服务功能的单位当量。

1.3.4 生态系统服务权衡与协同

相关研究^[32]表明,生态系统服务权衡协同度(Ecosystem Services Trade-off Degree, ESTD)能够从方向和程度两方面较好反映各生态系统服务功能之间的相互关系,其计算公式如下:

$$ESTD_{ij} = \frac{ESC_{ib} - ESC_{ia}}{ESC_{jb} - ESC_{ja}} \quad (4)$$

式中, $ESTD_{ij}$ 代表第 i 种生态系统服务和第 j 种生态系统服务的权衡协同度; ESC_{ia} 和 ESC_{ib} 分别表示在 a, b 时刻第 i 种生态系统服务自身的变化量; ESC_{ja} 和 ESC_{jb} 分别表示在 a, b 时刻第 j 种生态系统服务自身的变化量。当 $ESTD_{ij} < 0$ 时,表示 i 和 j 为权衡关系;当 $ESTD_{ij} > 0$ 时,表示 i 和 j 为协同关系;当 $ESTD_{ij} = 0$ 时无关。

1.3.5 生态系统服务价值贡献值

参照相关研究^[33],土地利用转换的生态系统服务价值贡献值能够定量分析复合生态系统中各子系统不同土地利用变化所导致的生态系统服务价值的变化,具体公式如下:

$$ESV_c = \frac{(ESV_{t+1} - ESV_t) \times CA}{TA} \quad (5)$$

表 1 张掖市单位面积生态系统服务价值当量表/($\times 100$ 元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)
Table 1 Ecosystem service value scale per unit area in Zhangye City

生态系统分类 Ecosystem classification	二级分类	供给服务 Supply service			调节服务 Regulating service			支持服务 Support service			文化服务 Cultural service	
		粮食生产	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	维持氧分循环	生物多样性	美学景观
一级分类 Primary classification	耕地 Cropland	21.0	9.9	0.5	16.5	8.9	2.5	6.7	25.4	3.0	3.2	1.5
	林地 Forestland	5.4	12.8	6.7	42.0	125.1	36.8	82.4	50.9	4.0	46.4	20.2
	针阔混交	7.7	17.5	9.1	58.0	173.5	49.1	86.6	70.6	5.4	64.2	28.1
	阔叶	7.2	16.3	8.4	53.6	160.4	47.6	117.0	65.4	4.9	59.5	26.2
	灌木	4.7	10.6	5.4	34.8	104.4	31.6	82.7	42.5	3.2	38.8	17.0
草地 Grassland	草原	2.5	3.5	2.0	12.6	33.1	10.9	24.2	15.3	1.2	13.8	6.2
	草甸	5.4	8.2	4.4	28.1	74.5	24.7	54.6	34.3	2.7	31.4	13.8
	灌草丛	9.4	13.8	7.7	48.6	128.6	42.5	94.3	59.2	4.4	53.8	23.7
湿地 Wetland	湿地	12.6	12.3	63.9	46.9	88.9	88.9	598.1	57.0	4.4	194.3	116.8
未利用地 Unused land	荒漠	0.3	0.7	0.5	2.7	2.5	7.7	5.2	3.2	0.3	3.0	1.2
	裸地	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	2.5	0.7	0.5	0.0	0.5	0.3
水域 Water	水系	19.8	5.7	204.6	19.0	56.5	137.0	2523.5	23.0	1.7	62.9	46.7
	冰川积雪	0.0	0.0	53.3	4.4	13.3	4.0	176.0	0.0	0.0	0.3	2.2

式中, ESV_t 表示各系统中某中土地利用类型转换的生态系统服务价值贡献值; ESC_t 、 ESV_{t+1} 分别表示某种土地利用类型研究初期和末期的生态系统服务价值, CA 为转换面积; TA 为区域总面积。

2 结果分析

2.1 “山地-绿洲-荒漠”复合系统类型划分

以乡级行政区为基本单元,根据公式(1)计算 2018 年张掖市各乡镇土地利用类型的相对优势度指数,依据指数大小,将张掖市“山地-绿洲-荒漠”复合系统划分出山地、绿洲和荒漠 3 个子生态系统。由表 2、图 2 可知,山地系统包含 11 个乡镇,主要分布在张掖市南部,面积占张掖市总面积的 55.46%;绿洲系统包含 45 个乡镇,主要分布在张掖市中部,面积占张掖市总面积的 27.02%;荒漠系统包含 6 个乡镇,分布在张掖市北部,占张掖市总面积的 17.52%。张掖市复合系统呈现地域分异特征,由南部山地系统、中部绿洲系统和北部荒漠系统构成;从面积占比来看,山地系统面积最大,绿洲系统面积次之,荒漠系统面积最小;从包含行政区数量来看,绿洲系统包含乡镇数量最多,山地系统次之,荒漠系统最少。山地系统以林地和草地为主,绿洲系统以耕地和建设用地为主,荒漠系统以未利用地为主。

表 2 “山地-绿洲-荒漠”复合系统类型划分
Table 2 Classification of “Mountain-Oasis-Desert” complex system

生态系统类型 Ecosystem types	乡镇数量 Town quantity/个	面积 Area/ km ²	面积比例 Proportion/%	空间分布 The spatial distribution	相对优势度指数 范围 Relative dominance index range	分类依据 Classification based on	说明 Instructions
山地系统 Mountain system	11	21399.50	55.46	分布在张掖市南部	草地:2.05—2.13 林地:2.60—4.07	草地>林地>其他用地或林地>草地>其他用地	其他用地指除林地和草地之外的其他 5 种用地类型
绿洲系统 Oasis system	45	10424.60	27.02	分布在张掖市中部	耕地:1.45—7.12 建设用地:1.43—70.03	耕地>建设用地>其他用地或建设用地>耕地>其他用地	其他用地指除耕地和建设用地之外的其他 5 种用地类型
荒漠系统 Desert system	6	6758.02	17.52	分布在张掖市北部	未利用地:1.45—1.61	未利用地>其他用地	其他用地指除未利用地之外的其他 6 种用地类型

2.2 “山地-绿洲-荒漠”复合系统土地利用变化

整体来看,“山地-绿洲-荒漠”复合系统中各子系统的土地利用变化特征不同,随着时间推移,部分土地类型的变化速度不断加快(图 2、表 3)。

整个研究期内,耕地、林地、湿地和建设用地面积增加,其中建设用地面积增幅最大,变化率为 80.49%,其次为耕地,变化率为 21.95%,湿地和林地面积小幅增加,变化率仅为 5.84%和 0.50%;草地、水域和未利用地面积小幅减少,变化率分别为-2.02%、-2.07%和-4.06%。1987—2000 年,山地系统中耕地变化最显著,变化率为 19.40%;绿洲系统和荒漠系统中建设用地变化最显著,变化率分别为 12.23%和 26.60%;2000—2018 年,建设用地在 3 个系统中变化均最明显,且在荒漠系统和绿洲系统中变化率高达 78.23%和 63.26%;这一时期山地系统中耕地面积有所减少,变化率为-0.11%,而荒漠系统中耕地面积增长显著,变化率为 70.81%。2000 年以来,张掖市社会经济进入高速发展期,城镇化进程进一步加快,建设用地面积持续大幅增加,同时随着退耕还林还草等一系列生态保护政策实施,部分坡耕地有序退耕。

研究期内,“山地-绿洲-荒漠”复合系统中土地类型之间相互转换,各子系统的土地利用类型转移模式有所不同(表 4)。

山地系统土地利用类型转移以草地转耕地为主、耕地转草地为副。从净转出方面来看,草地转出面积最大,共转出 133.58 km²,其中转为耕地面积 126.62 km²,占草地转出总面积的 94.79%;耕地转出面积次之,共转

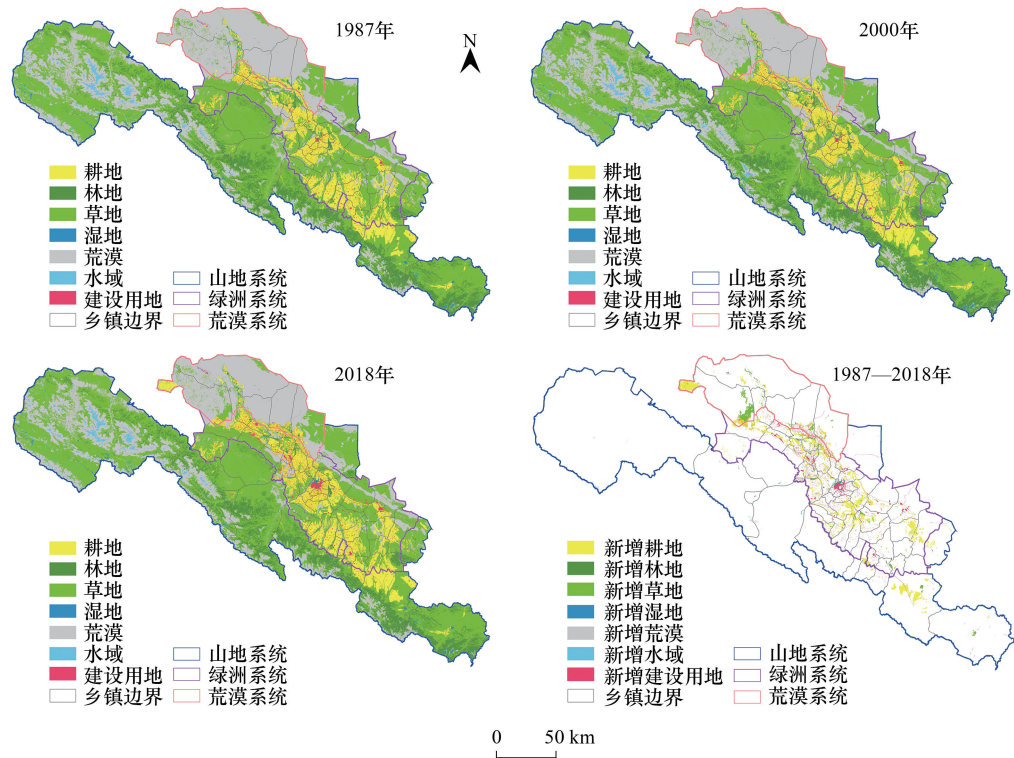


图 2 1987—2018 年张掖市土地利用空间变化及复合系统划分

Fig.2 Spatial change and complex system division of land use in Zhangye City from 1987 to 2018

表 3 1987—2018 年“山地-绿洲-荒漠”复合系统土地利用变化

Table 3 Land use change of "Mountain-Oasis-Desert" complex system from 1987 to 2018

系统类型 System types	土地类型 Land types	1987 年		2000 年		2018 年		变化率 Change rate/%		
		面积 Area /km ²	比例 Proportion/%	面积 Area /km ²	比例 Proportion/%	面积 Area /km ²	比例 Proportion/%	1987— 2000 年	2000— 2018 年	1987— 2018 年
山地系统 Mountain system	耕地	610.53	2.85	729.00	3.41	728.23	3.40	19.40	-0.11	19.28
	林地	3365.52	15.73	3365.32	15.73	3364.60	15.72	-0.01	-0.02	-0.03
	草地	5956.11	27.83	5844.31	27.31	5840.83	27.29	-1.88	-0.06	-1.94
	湿地	95.11	0.44	93.91	0.44	95.82	0.45	-1.26	2.03	0.75
	未利用地	10939.62	51.12	10911.77	50.99	10942.58	51.13	-0.25	0.28	0.03
	水域	405.92	1.90	427.53	2.00	394.82	1.84	5.32	-7.65	-2.73
	建设用地	26.69	0.12	27.66	0.13	32.62	0.15	3.63	17.94	22.22
绿洲系统 Oasis system	小计	21399.50	100.00	21399.50	100.00	21399.50	100.00	—	—	—
	耕地	3023.24	29.00	3207.11	30.76	3570.19	34.25	6.08	11.32	18.09
	林地	185.12	1.78	190.11	1.82	196.18	1.88	2.70	3.19	5.97
	草地	640.72	6.15	644.87	6.19	611.89	5.87	0.65	-5.11	-4.50
	湿地	27.33	0.26	26.48	0.25	35.39	0.34	-3.11	33.65	29.49
	未利用地	6259.89	60.05	6036.27	57.90	5517.10	52.92	-3.57	-8.60	-11.87
	水域	43.05	0.41	44.52	0.43	44.49	0.43	3.41	-0.07	3.34
荒漠系统 Desert system	建设用地	245.24	2.35	275.23	2.64	449.35	4.31	12.23	63.26	83.23
	小计	10424.59	100.00	10424.59	100.00	10424.59	100.00	—	—	—
	耕地	191.62	2.84	214.68	3.18	366.71	5.43	12.03	70.81	91.37
	林地	37.71	0.56	41.58	0.62	45.43	0.67	10.26	9.26	20.46

续表

系统类型 System types	土地类型 Land types	1987 年		2000 年		2018 年		变化率 Change rate/%		
		面积 Area /km ²	比例 Proportion/%	面积 Area /km ²	比例 Proportion/%	面积 Area /km ²	比例 Proportion/%	1987— 2000 年	2000— 2018 年	1987— 2018 年
“山地-绿洲-荒漠”复合系统 Mountain-Oasis-Desert complex system	草地	210.08	3.11	209.52	3.10	216.79	3.21	-0.26	3.47	3.20
	湿地	10.97	0.16	10.79	0.16	9.99	0.15	-1.64	-7.35	-8.87
	未利用地	6278.07	92.90	6246.89	92.44	6064.79	89.74	-0.50	-2.92	-3.40
	水域	10.00	0.15	9.78	0.14	10.16	0.15	-2.22	3.84	1.54
	建设用地	19.56	0.29	24.77	0.37	44.14	0.65	26.60	78.23	125.64
	小计	6758.01	100.00	6758.01	100.00	6758.01	100.00	—	—	—
	耕地	3825.39	9.91	4150.79	10.76	4665.13	12.09	8.51	12.39	21.95
	林地	3588.35	9.30	3597.01	9.32	3606.21	9.35	0.24	0.26	0.50
	草地	6806.91	17.64	6698.70	17.36	6669.51	17.29	-1.59	-0.44	-2.02
	湿地	133.41	0.35	131.18	0.34	141.20	0.37	-1.67	7.64	5.84
	未利用地	23477.58	60.85	23194.93	60.12	22524.47	58.38	-1.20	-2.89	-4.06
	水域	458.97	1.19	481.83	1.25	449.47	1.16	4.98	-6.72	-2.07
	建设用地	291.49	0.76	327.66	0.85	526.11	1.36	12.41	60.57	80.49
	合计	38582.10	100.00	38582.10	100.00	38582.10	100.00	—	—	—

表 4 1987—2018 年“山地-绿洲-荒漠”复合系统土地利用转移矩阵/km²

Table 4 Land use transfer matrix of "Mountain-Oasis-Desert" complex system from 1987 to 2018

系统类型 System types	土地类型 Land types	耕地 Cropland	林地 Forestland	草地 Grassland	湿地 Wetland	未利用地 Unused land	水域 Water	建设用地 Construction land	合计 Total	转出面积 Transfer out area
山地系统 Mountain system	耕地	590.14	0.64	16.11	0.00	0.64	—	3.00	610.53	20.39
	林地	0.03	3361.78	0.54	—	2.96	0.21	—	3365.52	3.74
	草地	126.62	1.58	5822.53	0.14	2.65	0.05	2.54	5956.11	133.58
	湿地	0.29	—	0.27	93.33	1.22	—	—	95.11	1.78
	未利用地	10.76	0.60	1.32	2.34	10922.53	1.22	0.85	10939.62	17.09
	水域	—	—	0.02	—	12.56	393.34	—	405.92	12.58
	建设用地	0.39	—	0.04	0.01	0.02	—	26.23	26.69	0.46
	小计	728.23	3364.60	5840.83	95.82	10942.58	394.82	32.62	21399.50	189.62
绿洲系统 Oasis system	转入面积	138.09	2.82	18.30	2.49	20.05	1.48	6.39	189.62	—
	耕地	2888.19	6.28	10.19	3.29	14.16	0.62	100.51	3023.24	135.05
	林地	2.66	178.80	0.58	0.07	0.16	0.43	2.42	185.12	6.32
	草地	28.84	0.13	571.10	0.40	36.73	0.02	3.50	640.72	69.62
	湿地	3.55	0.50	1.46	19.65	1.44	0.10	0.63	27.33	7.68
	未利用地	642.48	9.76	28.43	11.66	5460.24	5.99	101.33	6259.89	799.65
	水域	0.92	0.65	—	0.27	3.67	37.33	0.21	43.05	5.72
	建设用地	3.55	0.06	0.13	0.05	0.70	—	240.75	245.24	4.49
荒漠系统 Desert system	小计	3570.19	196.18	611.89	35.39	5517.10	44.49	449.35	10424.59	1028.53
	转入面积	682.00	17.38	40.79	15.74	56.86	7.16	208.60	1028.53	—
	耕地	171.45	2.87	1.75	0.24	3.65	0.73	10.93	191.62	20.17
	林地	0.25	37.23	0.00	0.10	0.08	0.02	0.03	37.71	0.48
	草地	2.64	0.11	199.48	0.67	7.01	—	0.17	210.08	10.60
	湿地	0.49	0.19	0.93	8.09	1.18	0.00	0.09	10.97	2.88
	未利用地	190.78	4.50	14.61	0.89	6051.61	2.21	13.47	6278.07	226.46
	水域	1.01	0.53	0.02	0.00	1.20	7.20	0.04	10.00	2.80
	建设用地	0.09	0.00	—	—	0.06	—	19.41	19.56	0.15
	小计	366.71	45.43	216.79	9.99	6064.79	10.16	44.14	6758.01	263.54
	转入面积	195.26	8.20	17.31	1.90	13.18	2.96	24.73	263.54	—

出 20.39 km², 其中耕地转为草地面积 16.11 km², 占耕地转出总面积的 79.01%。从净转入方面来看, 耕地转入面积最多, 共转入 138.09 km², 主要来源为草地。山地系统主要包含山丹马场在内的张掖市南部祁连山及其山前绿洲, 张掖市实施退耕还林工程, 工程区主要集中在祁连山地陡坡耕地和干枯河谷沙化耕地, 但退耕还林面积相对较小, 而山丹马场经历体制改革后, 农业机械化和生产技术不断发展, 大面积草地开垦为耕地, 耕地面积不断扩大, 农业生产逐渐走向现代化。

绿洲系统土地利用类型转移以未利用地转耕地为主、未利用地和耕地转建设用地为副。从净转出方面来看, 未利用地转出面积最大, 其次为耕地, 转出面积分别为 799.59 km² 和 135.05 km², 其中耕地转为建设用地面积 100.51 km²; 从净转入方面来看, 耕地转入总面积最多, 为 682.00 km², 主要来源为未利用地, 其次建设用地转入面积为 206.60 km²。绿洲系统是人口集聚、人地关系矛盾最集中的地方, 随着生产技术改进和现代农业不断发展, 绿洲边缘荒漠通过整治开垦为耕地, 便利的灌溉条件更有利于提高农业生产效率; 受到耕地保护政策的约束, 部分未利用地边缘的沙化耕地以及现有建设用地周边荒漠地势平坦, 通过固沙平整成为新增建设用地, 既满足了城市发展的土地需求, 又减少了城市扩张对耕地的侵占。

荒漠系统土地利用类型转移以未利用地转耕地为主、未利用地转建设用地为副。从净转出方面来看, 未利用地转出面积最多, 共转出 226.46 km², 其中转为耕地面积为 190.78 km², 占未利用地转出总面积的 84.24%, 其余主要转出为草地和建设用地; 从净转入方面来看, 耕地转入面积最多, 共转入 195.26 km², 建设用地和草地转入面积次之。张掖市未利用地面积占市域面积的 60% 以上, 2000 年以来, 人口增长与耕地资源短缺的矛盾凸显, 未利用地成为新增耕地主要来源, 在荒漠与耕地交接处通过植草建立生态过渡区, 有效阻止耕地荒漠化。

综上, “山地-绿洲-荒漠”复合系统中绿洲系统土地利用变化程度最剧烈, 变化面积为 1028.53 km²; 荒漠系统次之, 变化面积为 263.54 km²; 山地系统变化最小, 变化面积为 189.62 km²。

2.3 土地利用变化的生态系统服务权衡/协同效应

2.3.1 “山地-绿洲-荒漠”复合系统生态系统服务价值

2018 年张掖市生态系统服务价值总值为 419.11×10⁸ 元, 其中山地系统生态服务价值为 315.05×10⁸ 元, 绿洲系统生态服务价值为 82.62×10⁸ 元, 荒漠系统生态服务价值为 21.44×10⁸ 元, 三个子系统生态服务价值的关系为山地系统>绿洲系统>荒漠系统。1987—2018 年张掖市复合系统的生态系统服务价值整体呈现增加趋势, 其中山地系统生态服务价值呈现小幅减少, 绿洲系统和荒漠系统的生态服务价值呈现增加趋势(表 5)。

山地系统中, 1987—2000 年耕地的生态系统服务价值增加较明显, 变化率为 19.21%, 草地的生态系统服务价值减少, 变化率为 -2.63%, 其他土地利用类型的生态系统服务价值变化较小, 这一时期耕地的生态系统服务价值贡献值为正向, 而草地的生态系统服务价值贡献值为负向; 2000—2018 年山地系统中各地类的生态系统服务价值变化均较小。绿洲系统中, 2000—2018 年相较前一时期各地类的生态系统服务价值变化较为明显, 耕地生态系统服务价值变化率为 11.34%, 小于湿地的 33.14%, 但这一时期耕地的生态系统服务价值贡献值为正向且为最大, 为 1253.85×10⁴ 元, 未利用地生态系统服务价值变化率为 -8.13%, 其生态系统服务价值贡献值为负向且最小, 为 -542.85×10⁴ 元。荒漠系统中, 2000—2018 年各土地类型的生态系统服务价值变化率均大于前一时期, 其中耕地面积大幅增加, 伴随其生态系统服务价值变化率最大, 为 71.23%, 同时耕地的生态系统服务价值贡献值为正向且最大, 为 339.69×10⁴ 元。在张掖市“山地-绿洲-荒漠”复合系统中, 耕地面积变化引发的生态系统服务价值变化最大, 研究期内耕地对各生态系统的生态系统服务价值贡献值均为正向, 其中, 1987—2000 年耕地对山地系统服务价值贡献较大, 2000—2018 年耕地对绿洲系统和荒漠系统的生态系统服务价值贡献较大。

2.3.2 “山地-绿洲-荒漠”复合系统权衡/协同效应

张掖市生态系统服务权衡与协同如图 3 所示。计算生态系统服务权衡协同度, 各系统均得到 55 组值, 其中山地系统中 37 组为正值, 18 组为负值, 协同关系占 67.27%, 权衡关系占 32.73%; 绿洲系统中 45 组为正值,

10 组为负值,协同关系占 81.82%,权衡关系占 18.18%;荒漠系统中 55 组均为正值,协同关系 100.0%。张掖市复合系统中生态系统服务的协同关系占比大于权衡关系,即复合系统的协同效应大于权衡效应,其中荒漠系统的生态系统服务之间均为协同关系,山地系统中权衡关系体现在供给服务与其他服务之间,绿洲生态系统中权衡关系体现在调节服务与其他服务之间。

表 5 1987—2018 年“山地-绿洲-荒漠”复合系统生态系统服务价值变化及贡献值

Table 5 Changes and contribution of ecosystem service value of “Mountain-Oasis-Desert” complex system from 1987 to 2018

生态系统类型 System types	土地类型 Land types	生态系统服务价值			变化率			贡献值	
		Ecosystem service value/($\times 10^8$ 元)			Change rate/%			Contribution value/($\times 10^4$ 元)	
		1987 年	2000 年	2018 年	1987—2000 年	2000—2018 年	1987—2018 年	1987—2000 年	2000—2018 年
山地系统 Mountain system	耕地	6.04	7.20	7.21	19.21	0.14	19.37	64.22	0.00
	林地	131.66	131.60	131.62	-0.05	0.02	-0.03	-0.01	-0.01
	草地	116.87	113.80	113.85	-2.63	0.04	-2.58	-160.39	-0.08
	湿地	12.21	12.06	12.30	-1.23	1.99	0.74	-0.08	0.21
	未利用地	19.01	18.98	18.98	-0.16	0.00	-0.16	-0.39	0.00
	水域	31.30	31.87	31.09	1.82	-2.45	-0.67	5.76	-11.92
	小计	317.09	315.51	315.05	-0.50	-0.15	-0.64	—	—
绿洲系统 Oasis system	耕地	29.92	31.74	35.34	6.08	11.34	18.11	32.10	1253.85
	林地	7.94	8.18	8.47	3.02	3.55	6.68	0.11	1.69
	草地	8.53	8.63	8.17	1.17	-5.33	-4.22	0.04	-14.55
	湿地	3.51	3.41	4.54	-2.85	33.14	29.34	-0.01	9.66
	未利用地	13.80	13.40	12.31	-2.90	-8.13	-10.80	-8.58	-542.85
	水域	13.35	13.82	13.79	3.52	-0.22	3.30	0.07	0.00
	小计	77.05	79.18	82.62	2.76	4.34	7.23	—	—
荒漠系统 Desert system	耕地	1.90	2.12	3.63	11.58	71.23	91.05	7.51	339.69
	林地	1.58	1.72	1.93	8.86	12.21	22.15	0.80	1.20
	草地	2.63	2.62	2.72	-0.38	3.82	3.42	-0.01	1.08
	湿地	1.41	1.38	1.28	-2.13	-7.25	-9.22	-0.01	-0.12
	未利用地	8.66	8.87	8.73	2.42	-1.58	0.81	-9.69	-37.72
	水域	3.10	3.03	3.15	-2.26	3.96	1.61	-0.02	0.07
	小计	19.28	19.74	21.44	2.39	8.61	11.20	—	—
合计 Total		413.42	414.43	419.11	0.24	1.13	1.38	—	—

山地系统中,调节服务、支持服务和文化服务互为协同关系,而供给服务与三者之间表现为权衡关系,具体表现为粮食生产功能和原料生产功能与其他服务功能之间的权衡关系。这是由于草地转出后,受其影响较大的气候调节和气体调节服务功能下降,草地转为耕地等生产用地,提升了粮食生产功能和原料生产功能,其生态服务价值随之增加,但土地类型转为耕地之后,土壤结构和土壤质量发生较大变化,连续种植使土地土壤保持等支持服务功能下降,耕地的专业化生产和集约化经营,土地利用均质化,原有的生态系统被破坏,生物多样性下降,维持生物多样性和提供美学景观等服务功能也呈现下降趋势。绿洲系统中,调节服务与其他服务之间表现为权衡关系,具体表现为净化环境功能与其他服务功能之间的权衡关系,这是由于未利用地转为耕地,化肥、农药、农用塑料薄膜的广泛使用,给生态环境带来较大压力,净化环境等调节服务功能呈现下降趋势。荒漠系统中,各生态系统服务之间均呈现协同关系,这是因为未利用地转为耕地之后,粮食生产、原料生产等服务功能提升,同时未利用地转为草地等生态用地,气体调节、土壤保持、维持生物多样性等服务功能也随之提升,各生态系统服务之间呈现正向的协同关系。

3 讨论

关于“山地-绿洲-荒漠”复合系统子系统的划分,任继周等^[34]研究了复合系统中不同子系统的景观组分

特征,即山地景观系统中山地草原为基质,绿洲景观系统中耕地为基质,荒漠景观系统中砾漠为基质。本研究在划分山地系统时除草地外还将林地的相对优势度指数作为划分依据,更加符合张掖市的自然生态特征,在划分绿洲系统是除耕地外还将建设用地的相对优势度指数作为划分依据,主要是考虑到研究期内张掖市建设用地面积增加明显,且主要集中在中部绿洲,只依据耕地的相对优势度指数进行划分可能会出现漏划。

山地系统

FP	6.33	-2.11	-1.73	-0.26	-0.79	-0.31	-2.71	-19.00	-0.66	-1.46
6.33	RMP	-0.33	-0.27	-0.04	-0.12	-0.05	-0.43	-3.00	-0.10	-0.23
-2.11	-0.33	WRS	0.82	0.12	0.37	0.15	1.29	9.00	0.31	0.69
-1.73	-0.27	0.82	GR	0.15	0.46	0.18	1.57	11.00	0.38	0.85
-0.26	-0.04	0.12	0.15	CR	3.00	1.16	10.29	72.00	2.48	5.54
-0.79	-0.12	0.37	0.46	3.00	EP	0.39	3.43	24.00	0.83	1.85
-0.31	-0.05	0.15	0.18	1.16	0.39	HR	8.86	62.00	2.14	4.77
-2.71	-0.43	1.29	1.57	10.29	3.43	8.86	SC	7.00	0.24	0.54
-19.00	-3.00	9.00	11.00	72.00	24.00	62.00	7.00	NCM	0.03	0.08
-0.66	-0.10	0.31	0.38	2.48	0.83	2.14	0.24	0.03	MB	2.23
-1.46	-0.23	0.69	0.85	5.54	1.85	4.77	0.54	0.08	2.23	ALS

绿洲系统

FP	2.25	14.38	1.42	2.30	-5.75	1.20	0.89	7.67	6.05	9.58
2.25	RMP	6.37	0.63	1.02	-2.55	0.53	0.40	3.40	2.68	4.25
14.38	6.37	WRS	0.10	0.16	-0.40	0.08	0.06	0.53	0.42	0.67
1.42	0.63	0.10	GR	1.62	-4.05	0.84	0.63	5.40	4.26	6.75
2.30	1.02	0.16	1.62	CR	-2.50	0.52	0.39	3.33	2.63	4.17
-5.75	-2.55	-0.40	-4.05	-2.50	EP	-0.21	-0.16	-1.33	-1.05	-1.67
1.20	0.53	0.08	0.84	0.52	-0.21	HR	0.74	6.40	5.05	8.00
0.89	0.40	0.06	0.63	0.39	-0.16	0.74	SC	8.60	6.79	10.75
7.67	3.40	0.53	5.40	3.33	-1.33	6.40	8.60	NCM	0.79	1.25
6.05	2.68	0.42	4.26	2.63	-1.05	5.05	6.79	0.79	MB	1.58
9.58	4.25	0.67	6.75	4.17	-1.67	8.00	10.75	1.25	1.58	ALS

荒漠系统										
FP	1.95	18.50	1.12	1.28	6.17	1.76	0.74	6.17	4.11	9.25
1.95	RMP	9.50	0.58	0.66	3.17	0.90	0.38	3.17	2.11	4.75
18.50	9.50	WRS	0.06	0.07	0.33	0.10	0.04	0.33	0.22	0.50
1.12	0.58	0.06	GR	1.14	5.50	1.57	0.66	5.50	3.67	8.25
1.28	0.66	0.07	1.14	CR	4.83	1.38	0.58	4.83	3.22	7.25
6.17	3.17	0.33	5.50	4.83	EP	0.29	0.12	1.00	0.67	1.50
1.76	0.90	0.10	1.57	1.38	0.29	HR	0.42	3.50	2.33	5.25
0.74	0.38	0.04	0.66	0.58	0.12	0.42	SC	8.33	5.56	12.50
6.17	3.17	0.33	5.50	4.83	1.00	3.50	8.33	NCM	0.67	1.50
4.11	2.11	0.22	3.67	3.22	0.67	2.33	5.56	0.67	MB	2.25
9.25	4.75	0.50	8.25	7.25	1.50	5.25	12.50	1.50	2.25	ALS

■ 协同关系 ■ 权衡关系

图3 生态系统服务的权衡与协同关系

Fig.3 Tradeoffs and synergies of ecosystem services

1.供给服务 Supply service(FP:表示粮食生产 Food production;RMP:表示原料生产 Raw material production;WRS:表示水资源供给 Water resource supply)2.调节服务 Regulation service(GR:表示气体调节 Gas regulation;CR:表示气候调节 Climate regulation ;EP:表示净化环境 Environment purification;HR:表示水文调节 Hydrological regulation)3.支持服务 Support services(SC:表示土壤保持 Soil conservation;NCM:表示维持养分循环 Nutrients cycle maintenance;MB:表示维持生物多样性 Maintaining biodiversity)4.文化服务 Cultural Services(ALS:表示提供美学景观 Aesthetic landscape supply)

研究发现,复合系统中生态服务价值的关系为山地系统>绿洲系统>荒漠系统。张敏等^[35]在开展博斯腾湖流域生态系统服务研究以及郝梦雅等^[36]在开展关中盆地生态系统服务研究时均表明,盆地边缘的山地生态系统服务价值高于盆地中部,高值区分布主要受林地、水域和草地等分布影响,低值区分布主要受耕地、建设用地和未利用地分布影响,这与本研究中生态系统服务价值评估结果基本吻合。同时本研究发现,山地系统中权衡关系主要体现在粮食生产和原料生产与其他服务功能之间,绿洲系统中权衡关系主要体现在净化环境与其他服务功能之间,这是由于复合系统的土地利用空间格局以及各子系统中不同土地利用转移模式共同影响的结果。余玉洋等^[37]在秦巴山区生态系统服务研究中发现,全域尺度下在人口密集的汉江上游水资源供给与土壤保持权衡关系显著,在平原和盆地地区由于耕地分布,粮食生产与土壤保持和 NPP 之间均为权衡关系,而在综合分区和典型样区尺度,随着尺度缩小,生态系统服务之间的关系也发生了不同转变;而冉凤维等^[38]在鄱阳湖生态系统服务研究中发现食物供给与产水量和土壤保持在不同地类之间均表现出权衡关系。可见,生态系统服务受不同研究尺度、不同研究区域、以及不同的土地利用等影响,不同生态系统服务之间的权衡与协同关系不同。本研究仅基于系统尺度进行了探讨,今后还应从多尺度视角出发,探究不同尺度下复合系统中生态系统服务的权衡与协同关系,并进行对比研究,从而得到复合系统中生态系统服务之间的关系变化规律。

“山地-绿洲-荒漠”复合系统由其子系统之间通过物质和能量的交流互动紧密联系在一起。山地系统土地类型以林地和草地为主,承担着干旱区水源涵养等重要的生态功能;绿洲系统土地类型以耕地和建设用地为主,作为干旱区人口集聚区,承担着几乎全部的生产生活功能;荒漠系统环境相对较为恶劣,脆弱的生态环境使其成为潜在的生态风险区。为维护现有复合系统格局,实现生态稳定与经济发展“双赢”,需进一步提升山地系统的水源涵养等生态功能,不断满足绿洲系统的水资源需求;协调好绿洲系统耕地、建设用地与其他生态性用地之间的关系,避免单纯追求经济发展而导致生态服务损失和生态功能下降,损害人类福祉;在保护好现有荒漠植被的前提下,通过人工绿化等方式进一步提高荒漠系统的抗风险能力,防止荒漠化加剧。全域把控、精准施策,构筑山地—绿洲、绿洲—荒漠生态过渡带,既能稳定复合系统的生态格局,促进各子系统之间物质和能量的交流互动,又能减缓系统对相邻系统的消极影响,实现复合系统可持续发展。

4 结论

(1)张掖市复合系统呈现地域分异特征,由南部山地系统、中部绿洲系统和北部荒漠系统构成;各子系统内部呈现不同的土地利用特征,山地系统以林地和草地为主,绿洲系统以耕地和建设用地为主,荒漠系统以未利用地为主。

(2)研究期内,2000—2018 年各系统的土地利用变化较 1987—2000 年更为强烈。2000—2018 年,绿洲系统中耕地和建设用地区积增加最多,分别为 363.08 km² 和 174.12 km²,同时,荒漠系统中耕地和建设用地区积的增加幅度最大,分别为 70.81% 和 78.23%。各子系统土地利用转移模式为:山地系统以草地转耕地为主、耕地转草地为副,绿洲系统以未利用地转耕地为主、未利用地和耕地转建设用地为副,荒漠系统以未利用地转耕地为主、未利用地转建设用地为副。

(3)研究期内,张掖市复合系统的生态服务价值整体呈现增加趋势,其中山地系统的生态服务价值小幅减少,绿洲系统和荒漠系统的生态服务价值呈现增加趋势,各子系统的生态服务价值量关系为山地系统>绿洲系统>荒漠系统。各系统中生态服务价值贡献最大的为耕地,尤其 2000—2018 年,耕地对绿洲系统的生态服务价值贡献量最大,为 1253.85×10⁴ 元。

(4)张掖市土地利用变化的生态系统服务协同效应大于权衡效应,其中荒漠系统的生态系统服务之间均为协同关系,山地系统中权衡关系体现在供给服务与其他服务之间,关系占比 32.73%,绿洲生态系统中权衡关系体现在调节服务与其他服务之间,关系占比 18.18%。

参考文献 (References):

- [1] De Groot R S, Wilson M A, Boumans R M J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 2002, 41(3): 393-408.
- [2] 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. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441-446.
- [3] 龙花楼. 论土地利用转型与土地资源管理. *地理研究*, 2015, 34(9): 1607-1618.
- [4] 许丁雪, 吴芳, 何立环, 刘海江, 江源. 土地利用变化对生态系统服务的影响——以张家口-承德地区为例. *生态学报*, 2019, 39(20): 7493-7501.
- [5] 王让会, 马英杰, 张慧芝, 杨发相, 孙洪波, 黄俊芳. 山地、绿洲、荒漠系统的特征分析. *干旱区资源与环境*, 2004, 18(3): 1-6.
- [6] Tian Y Y, Jiang G H, Zhou D Y, Li G Y. Systematically addressing the heterogeneity in the response of ecosystem services to agricultural modernization, industrialization and urbanization in the Qinghai-Tibetan Plateau from 2000 to 2018. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 285: 125323.
- [7] 周亮, 车磊, 周成虎. 中国城市绿色发展效率时空演变特征及影响因素. *地理学报*, 2019, 74(10): 2027-2044.
- [8] 孙钦珂, 周亮, 唐相龙, 孙东琪, 党雪薇. 干旱区绿洲城镇扩张对耕地空间影响及预测——以河西走廊区域为例. *自然资源学报*, 2021, 36(4): 1008-1020.
- [9] 彭建, 吴见, 徐飞雄, 吕俭. 基于价值评估的黄山市生境质量时空演变特征分析. *生态学报*, 2021, 41(2): 665-679.
- [10] Shen J S, Li S C, Liang Z, Liu L B, Li D L, Wu S Y. Exploring the heterogeneity and nonlinearity of trade-offs and synergies among ecosystem services bundles in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Ecosystem Services*, 2020, 43: 101103.

- [11] 张碧天, 闵庆文, 焦雯珺, 何思源, 刘某承, 杨伦. 生态系统服务权衡研究进展. 生态学报, 2021, 41(14): 5517-5532.
- [12] Shen J S, Li S C, Liu L B, Liang Z, Wang Y Y, Wang H, Wu S Y. Uncovering the relationships between ecosystem services and social-ecological drivers at different spatial scales in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 290: 125193.
- [13] 曹祺文, 卫晓梅, 吴健生. 生态系统服务权衡与协同研究进展. 生态学杂志, 2016, 35(11): 3102-3111.
- [14] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 赵东升. 生态系统服务权衡: 方法、模型与研究框架. 地理研究, 2016, 35(6): 1005-1016.
- [15] 孙艺杰, 任志远, 赵胜男, 张静. 陕西河谷盆地生态系统服务协同与权衡时空差异分析. 地理学报, 2017, 72(3): 521-532.
- [16] 王晓萌, 潘佩佩, 王晓旭, 刘苗苗, 赵倩石, 王雪然, 王新云. 基于土地利用的河北省生态系统服务权衡/协同关系研究. 地理与地理信息科学, 2021, 37(1): 80-88.
- [17] 方露露, 许德华, 王伦澈, 牛自耕, 张明. 长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究. 地理研究, 2021, 40(3): 821-838.
- [18] 王永洵, 王亚飞, 张静文, 王强. 海岸带土地利用转型及其生态环境效应——以福建海岸带为例. 环境科学学报, 2021, 41(10): 3927-3937.
- [19] 韩美, 孔祥伦, 李云龙, 魏帆, 孔凡彪, 黄淑萍. 黄河三角洲“三生”用地转型的生态环境效应及其空间分异机制. 地理科学, 2021, 41(6): 1009-1018.
- [20] 张蕾, 刘格格, 魏俊青, 刘艳芳. “三生用地”转型的生态系统服务价值效应——以营口市为例. 生态学杂志, 2019, 38(3): 838-846.
- [21] 史洋洋, 吕晓, 黄贤金, 于森. 江苏沿海地区耕地利用转型及其生态系统服务价值变化响应. 自然资源学报, 2017, 32(6): 961-976.
- [22] 刘永强, 廖柳文, 龙花楼, 秦建新. 土地利用转型的生态系统服务价值效应分析——以湖南省为例. 地理研究, 2015, 34(4): 691-700.
- [23] 韩美, 孔祥伦, 李云龙, 魏帆, 孔凡彪, 黄淑萍. 黄河三角洲“三生”用地转型的生态环境效应及其空间分异机制. 地理科学, 2021, 41(6): 1009-1018.
- [24] 欧阳晓, 贺清云, 朱翔. 多情景下模拟城市群土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以长株潭城市群为例. 经济地理, 2020, 40(1): 93-102.
- [25] 谢余初, 巩杰, 赵彩霞, 颜耀文. 干旱区绿洲土地利用变化的生态系统服务价值响应——以甘肃省金塔县为例. 水土保持研究, 2012, 19(2): 165-170.
- [26] 夏鑫鑫, 朱磊, 杨爱民, 靳含, 张青青. 基于山地-绿洲-荒漠系统的生态系统服务正负价值测算——以新疆玛纳斯河流域为例. 生态学报, 2020, 40(12): 3921-3934.
- [27] 孙洪波, 王让会, 张慧芝, 黄俊芳, 赵振勇. 新疆山地-绿洲-荒漠系统及其气候特征. 干旱区地理, 2005, 28(2): 199-204.
- [28] 刘彦随, 彭留英, 王大伟. 东南沿海地区土地利用转换态势与机制分析. 自然资源学报, 2005, 20(3): 333-339.
- [29] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 罗娅, 周旭, 赵海根. 1976 年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应. 地理学报, 2014, 69(1): 54-63.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 李晶, 李红艳, 张良. 关中-天水经济区生态系统服务权衡与协同关系. 生态学报, 2016, 36(10): 3053-3062.
- [33] 勾蒙蒙, 刘常富, 李乐, 肖文发, 王娜, 胡建文. “三生空间”视角下三峡库区土地利用转型的生态系统服务价值效应. 应用生态学报, 2021, 32(11): 3933-3941.
- [34] 任继周. 河西走廊山地-绿洲-荒漠复合系统及其耦合. 北京: 科学出版社, 2007: 4-29.
- [35] 张敏, 迪丽努尔·阿吉. 博斯腾湖流域生态系统服务价值时空演变及权衡协同关系. 水生态学杂志: 1-14. DOI: 10.15928/j.1674-3075.202104060094.
- [36] 郝梦雅, 任志远, 孙艺杰, 赵胜男. 关中盆地生态系统服务的权衡与协同关系动态分析. 地理研究, 2017, 36(3): 592-602.
- [37] 余玉洋, 李晶, 周自翔, 马新萍, 张城. 基于多尺度秦巴山区生态系统服务权衡协同关系的表达. 生态学报, 2020, 40(16): 5465-5477.
- [38] 冉凤维, 罗志军, 吴佳平, 齐松, 曹丽萍, 蔡正妹, 陈瑶瑶. 鄱阳湖地区生态系统服务权衡与协同关系的时空格局. 应用生态学报, 2019, 30(3): 995-1004.