

doi: 10. 6046/zrzyyg. 2022279

引用格式: 黄卓,孙建国,冯春月,等. 基于生态系统服务变化的河西地区生态修复分区[J]. 自然资源遥感,2023,35(4):236 – 243. (Huang Z,Sun J G,Feng C Y,et al. ES change – based ecological restoration zoning for the Hexi region[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2023,35(4):236 – 243.)

基于生态系统服务变化的河西地区生态修复分区

黄 卓^{1,2,3}, 孙建国^{1,2,3}, 冯春月^{1,2,3}, 徐 鹏⁴, 杨 浩^{1,2,3}, 侯文兵^{1,2,3}

(1. 兰州交通大学测绘与地理信息学院,兰州 730070; 2. 地理国情监测技术应用国家
地方联合工程研究中心,兰州 730070; 3. 甘肃省地理国情监测工程实验室,
兰州 730070; 4. 西南石油大学地球科学与技术学院,成都 610500)

摘要:生态修复分区是有效开展生态修复的必要前提,基于生态系统服务(ecosystem services,ES)的分区是当前生态修复分区的热点方法。已有研究大多仅考虑 ES 现状而忽略其变化,无法反映生态修复的潜力和方向。该文提出一种基于 ES 变化的生态修复二级分区方法,并将其应用于甘肃省河西地区。首先,基于(Google Earth Engine,GEE)平台分类 Landsat 影像获得 2 期(2005 年和 2020 年)土地利用数据,采用当量因子法计算 2 期 ES 分项价值和总价值;然后,对 ES 总价值变化进行聚类 and 异常值分析,构建生态修复一级分区(优先修复区 PrR、重要修复区 ImR、潜在修复区 PoR、重要保护区 ImP 和优先保护区 PrP);最后,利用 ES 分项价值变化的组合特征构建二级分区。结果表明:①一级分区各类占比分别为 PrR 0.9%,ImR 7.2%,PoR 78.0%,ImP 13.0% 和 PrP 0.9%,PoR 大部分位于河西地区的戈壁荒漠,PrR 与 PrP 零散分布在祁连山与山前草地的过渡带,ImR 与 ImP 聚集在祁连山山地、走廊平原以及北山山地,ImR 与 ImP 的修复与保护潜力更大,且生态修复潜力有限,保护较修复更为迫切;②二级分区共有 10 类修复二级区和 6 类保护二级区,ImR 和 ImP 的二级分区均以分项服务协同变化为主,河西地区生态修复与保护均应关注 ES 的综合提升。

关键词: 生态系统服务;变化;聚类与异常值分析;生态修复分区;河西地区

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097 – 034X(2023)04 – 0236 – 08

0 引言

工业革命以来,人类社会对自然资源的过度开发和利用造成了荒漠化、水土流失、森林破坏和湿地萎缩等一系列生态退化问题^[1-2]。随着可持续发展理念的普及和深入,国际组织、各国和地方政府越来越重视生态修复的政策制定和工程实践^[3-5]。科学合理的分区是生态修复的关键环节和重要前提,已引起学术界的普遍关注^[6-7]。

目前,生态修复分区的方法大致可分为 2 类。其一,依据生态退化类型和原因的分区方法。例如,宋伟等^[8]选取水土流失、矿山开采、极端降水、降水分布、植被盖度、林分质量、农田质量、草地退化和贫困状况 8 个指标实行生态修复分区;马世发等^[9]结合高强度人类活动和土地利用景观变化开展粤港澳

大湾区生态修复分区。一般而言,此类分区存在指标选取的主观性问题。其二,依据生态系统服务(ecosystem services,ES)的分区。作为对人类从生态系统中获得的所有惠益的评定,ES 量值既能客观表达生态系统状况,又能全面体现各种生态退化的效应^[10-11]。因此,此类分区方法受到广泛关注和使用^[12-14]。例如,岳文泽等^[12]和刘春芳等^[13]从 ES 供需匹配差异视角构建生态修复分区方法;Comín 等^[14]根据 ES 相对总价值指数针对皮埃德拉河流域进行生态修复分区尝试。

然而,现有基于 ES 的生态修复分区大多仅考虑 ES 现状,难以有效反映生态修复的潜力。此外,当前的生态修复分区基本限于一级分区,侧重于修复和保护的优先级^[15-17],而未充分关注修复的类型和方向。本文以甘肃省河西地区为研究区,首先基于谷歌地球引擎(Google Earth Engine,GEE)平台分

收稿日期: 2022 – 07 – 05; 修订日期: 2022 – 11 – 01

基金项目: 甘肃省科技计划项目“甘肃省地表覆盖变化自动监测关键技术”(编号: 20YF3GA013)和兰州交通大学优秀平台(编号: 201806)共同资助。

第一作者: 黄 卓(1997 –),女,硕士研究生,主要研究方向为土地利用分类和生态遥感应用。Email: 1004094799@qq. com。

通信作者: 孙建国(1974 –),男,博士(博士后),教授,主要研究方向为环境遥感与 GIS 应用。Email: sunjguo@mail. lzjtu. cn。

类 Landsat 影像获得 2 期(2005 年和 2020 年)土地
利用数据,采用当量因子法计算 2 期 ES 分项价值和
总价值;然后,对 ES 总价值变化进行聚类 and 异常值
分析,构建生态修复一级分区;最后,利用 ES 分项
价值变化的组合特征划分二级分区。本研究旨在验
证基于 ES 变化的生态修复二级分区方法,同时实
现河西地区生态修复分区进而提供一定的决策建
议。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

甘肃省河西地区位于甘肃省西北部,祁连山以
北,合黎山以南,乌鞘岭以西,新疆维吾尔自治区以
东(图 1)。行政区划包括武威市、张掖市、金昌市、
酒泉市和嘉峪关市,总面积 24.78 万 km²。河西地
区南北高、中间低,可分为南部祁连山地、中部走廊
平原以及北部北山山地 3 大地貌单元。南部祁连山
脉分布着大面积的冰川和永久积雪,消融后的冰川
汇集形成 3 大内陆河——石羊河、黑河和疏勒河,再
流入中部走廊平原,滋养大片绿洲和城市。北山山
地自东向西有龙首山、合黎山以及马鬃山。整体上,
河西地区气候干旱,土壤多沙^[18],生态系统脆弱,存
在冰川萎缩、草地退化、土地沙化以及城镇扩张等诸
多问题^[19],生态修复的任务艰巨。

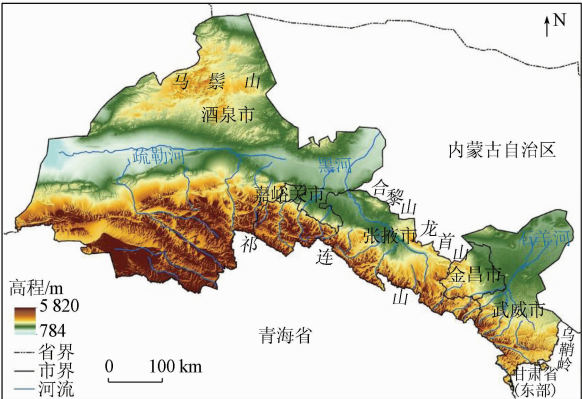


图 1 研究区概况图

Fig.1 Overview map of the study area

1.2 数据源

以下几项数据均来自 GEE 平台:2005 年和
2020 年遥感影像(Landsat5 和 Landsat8,空间分辨率
30 m)、净初级生产力(MOD17A3HGF V6 产品,空
间分辨率 500 m)、降水(GPM 数据集,空间分辨率
11 132 m)以及数字高程模型(digital elevation mod-
el,DEM)(SRTM 数据集,空间分辨率 30 m)。土壤
侵蚀数据来源于中国科学院资源环境科学数据中
心(<http://www.resdc.cn>),分辨率为 1 000 m。统计

数据(GDP 数据和粮食产值)从甘肃省统计局(<http://tjj.gansu.gov.cn>)和国家统计局(<https://data.stats.gov.cn>)获得。所有空间数据经重采样,空间
分辨率统一为 30 m。

2 研究方法

2.1 土地利用分类

根据河西地区的实际情况,土地利用类型分为
7 类:耕地、林地、草地、水体、建设用地、未利用地
和冰川。通过谷歌地球人工采集了 2020 年 1 264
个训练样本点和 534 个检验样本点以及 2005 年 460
个检验样本点。土地利用分类方法选取随机森林和
变化检测,主要见参考文献[20],此处不再赘述。
初步分类后再经众数滤波消除分类影像的噪声。最
后,选取总体精度(overall accuracy,OA)和 Kappa 系
数评价分类精度^[21]。

2.2 ES 评价

谢高地等^[22]对 Robert 等^[23]的成果改进,构建
了适用于中国生态系统的基于单位面积价值当量因
子法的 ES 价值动态评估方法。为考虑 ES 的时空
差异,选用土壤侵蚀、净初级生产力、降水以及统计
数据调整当量因子。根据千年生态系统评估,ES 可
分为供给服务(P)、调节服务(R)、支持服务(S)和
文化服务(C)4 项。采用当量因子法分别计算 ES
总价值和分项价值,具体方法参见文献[24]和
[25]。

2.3 生态修复分区

2.3.1 一级分区

聚类与异常值分析工具通过局部计算与显著性
分析,得到空间对象的热点区、冷点区和异常区,即:
HH(高值聚集)、LL(低值聚集)、HL(高值被低值包
围)以及 LH(低值被高值包围)4 种类型。该工具已
经广泛应用于包括 ES 在内的各种地理现象的空间
分析^[26-27],以反映其格局与动态。本文利用该工
具进行基于 ES 变化的生态修复一级分区(表 1)。HH
为 ES 变化高值聚集,代表生态条件有所改善,定义
为“重要保护区”(ImP)。同理,LL 定义为“重要修
复区”(ImR)。HL 为 ES 变化低值包围高值,代表

表 1 生态修复一级分区情况

Tab.1 Ecological restoration level - 1 zones

一级分区	全称	聚类类别
PrR	优先修复区	LH
ImR	重要修复区	LL
ImP	重要保护区	HH
PrP	优先保护区	HL
PoR	潜在修复区	不显著区

中心区生态条件变化好于邻近区,定义为“优先保护区”(PrP)。同样,LH 定义为“优先修复区”(PrR)。此外,ES 变化无显著聚集区被定义为“潜在修复区”(PoR)。

为克服行政区划的局限性,同时考虑研究区的面积,选取 10 km × 10 km 规则格网作为空间单元,统计 2005—2020 年 ES 总价值变化量,利用上述方法获得生态修复一级分区。

2.3.2 二级分区

根据 ES 分项价值变化的组合特征开展二级分区,以进一步了解生态修复与保护的类型和方向。具体地,PrP 和 ImP 按照 ES 分项价值增加的类不同划分保护二级区;PrR,ImR 和 PoR 依据 ES 分项价值减少的类不同划分修复二级区。理论上,每个一级分区的分项价值变化组合特征均有 15 个——P, R, S, C, PR, RS, SC, PS, PC, RC, PRS, RSC, PSC, PRC 和 PRSC。另外,PoR 还有一个“None”的组合特征,表示所有分项服务价值均呈现稳定状态。实际中,二级分区类型可能远少于理论类型数。二级分区的命名规则为“一级分区 - 分项价值增加/减少的组合特征”。例如,PrR - P 代表“优先修复区 - 供给服务减少”。

3 结果与分析

3.1 土地利用和 ES 价值时空变化

3.1.1 土地利用时空变化

图 2(a)和(b)分别为 2005 年和 2020 年土地利用分类结果。2005 年与 2020 年土地利用分类的 OA 分别达到 0.878 和 0.926, Kappa 系数分别达到 0.842 和 0.907,精度满足本文的研究需求。河西地区土地利用类型以未利用地为主,占比 62.3%,其他类型占比从高到低分别为:草地 21.8%、耕地 5.8%、冰川 4.4%、林地 4.1%、建设用地 1.3% 和水体 0.3%。从空间分布来看,林地、冰川主要分布在祁连山地,耕地、建设用地大多在走廊平原,未利用地在走廊平原东北部、西部以及北山山地分布较多,草地在祁连山地和北山山地分布较多,水体较少,主要是三大内陆河。2005—2020 年间,走廊平原的耕地、建设用地明显增加,北山山地的草地在减少,祁连山的林地和草地在增加。整个研究区而言,草地和未利用地面积在减少,耕地、林地以及建设用地面积在增加,水体和冰川的面积变化较小。

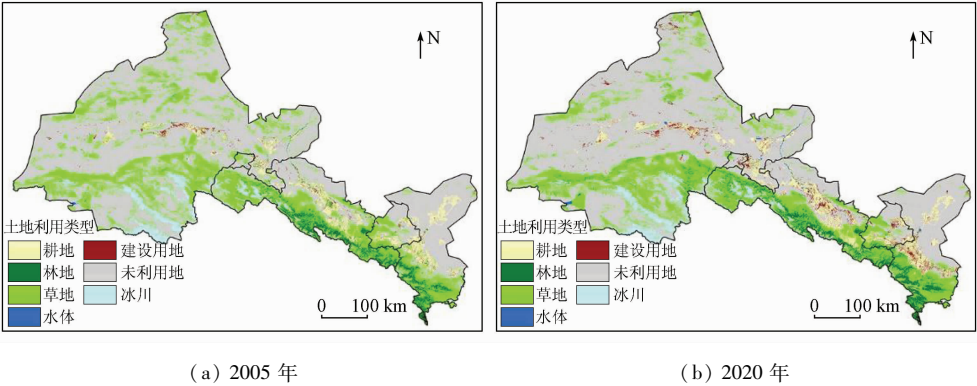


图 2 2005 年和 2020 年土地利用分类图
Fig.2 Land use classification map for 2005 and 2020

3.1.2 ES 价值时空变化

图 3(a)为 2005—2020 年 ES 总价值变化空间分布图。ES 总价值总体较稳定,增加和减少区域较集中,未变化区域所占比重最大,占比 69.1%,增加和减少区域分别占比 16.8%和 14.1%,可见河西地区生态修复与保护已初见成效。其中,增加区域主要分布在祁连山西部冰川区域以及石羊河流域上游的林草地,减少区域主要分布在马鬃山和祁连山中

部的草地以及走廊平原的绿洲城市。图 3(b)—(e)分别为 2005—2020 年 P, R, S 和 C 价值变化的空间分布图。P、R、S 以及 C 价值较稳定,未变化区域分别占比 73.8%, 69.5%, 71.7% 和 80.9%。前三者增加和减少集中区域基本与总价值的分布相似,C 价值变化的空间分布特征较为不同,在马鬃山地、疏勒河流域平原以及祁连山西部的变化较少。

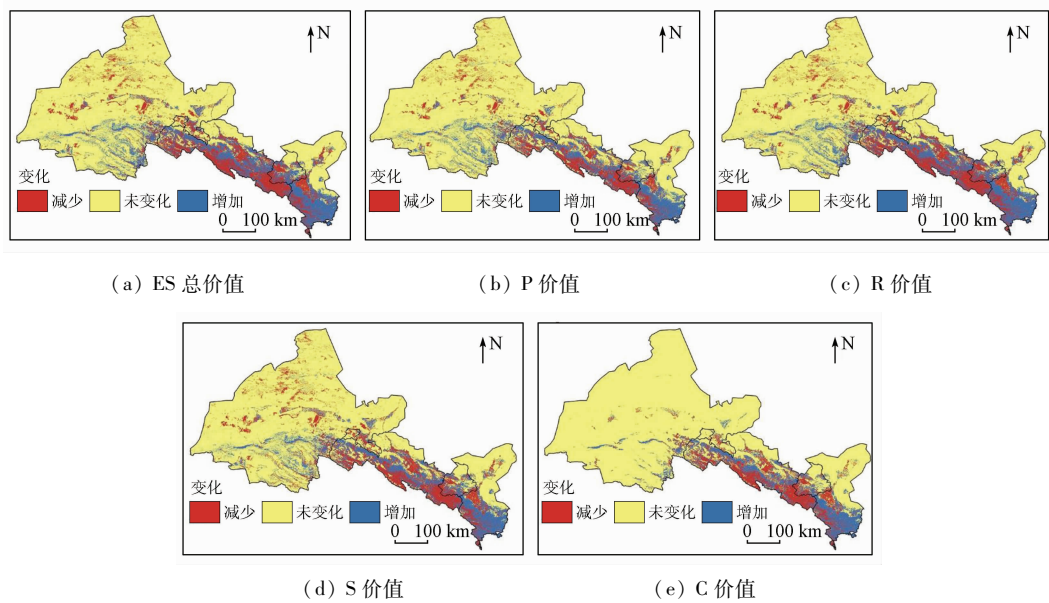


图 3 ES 总价值和分项价值变化的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of ES total value and sub - value changes

3.2 生态修复一级分区

生态修复一级分区结果如图 4 所示。PoR 分布范围最广,面积最大,占河西地区总面积的 78.0%, 主要分布在 3 大流域平原以及北山山地的戈壁荒漠地区,该区地势平坦,平均高程较低,平均植被覆盖率极低,ES 总价值较稳定,涉及酒泉市、张掖市、金昌市和武威市的 12 个区县。PrR 与 PrP 的分布分散,面积极小,面积占比均不足 1%,其中,PrR 分布在 ImP 范围内,位于东、西部祁连山与山前草地的过渡带,PrP 分布在 ImR 范围内,零散于祁连山中部与山前草地的过渡带。PrR,PrP 的平均高程和平均植被覆盖率均较高,ES 总价值分别处于减少和增加,PrR 涉及酒泉市、张掖市、金昌市和武威市的 5 个区县,PrP 涉及张掖市的 3 个县。ImR 与 ImP 的分布聚集,面积较大,面积占比分别为 7.2% 与 13.0%,修复和保护潜力较于前三者更大。ImR 主要分布在走廊平原、马鬃山山地以及中部祁连山山地 3 部分,

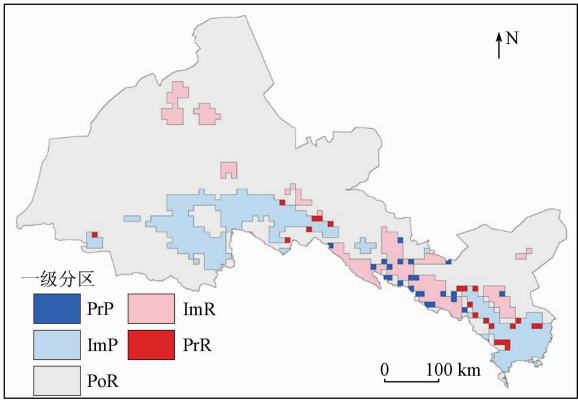


图 4 生态修复一级分区

Fig. 4 Ecological restoration level - 1 zones

地势起伏大,平均高程较低,平均植被覆盖度较高,ES 总价值聚集性减少,涉及酒泉市、张掖市、嘉峪关市和武威市的 11 个区县。ImP 主要分布在祁连山东部的林草地和西部的冰川区域 2 部分,平均高程与平均植被覆盖率较高,地势西高东低,ES 总价值聚集性增加,涉及酒泉市、张掖市、武威市以及金昌市的 6 个区县。ImR 的空间分布较 ImP 复杂,因此 ImR 的修复方向较 ImP 的保护方向多样。但较于修复,河西地区的生态保护更为迫切,具体表现为 ImP 面积大于 ImR。

3.3 生态修复二级分区

本文根据二级分区的类型探讨一级分区的修复和保护方向,因此,仅在此分析二级分区的组成与结构。河西地区二级分区实际共有 10 类修复二级区和 6 类保护二级区。如图 5 所示,二级分区主要为 5 类:PoR - None (66.8%),ImP - PRSC (12.9%),

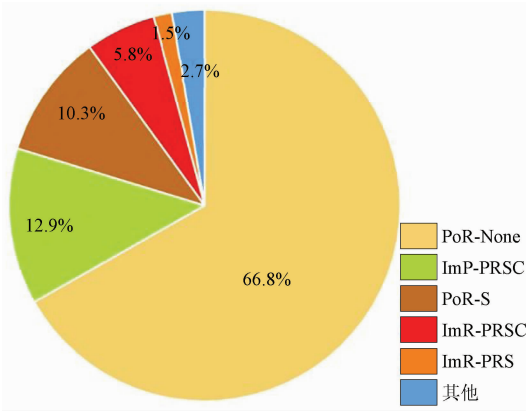


图 5 生态修复二级分区面积占比图

Fig. 5 Area percentage map of ecological restoration level - 2 zones

PoR - S (10. 3%) , ImR - PRSC (5. 8%) 和 ImR - PRS (1. 5%) , 其他二级分区占比均不足 1% 。通过分析 ImP 和 ImR 的二级分区面积占比, 可得 ImP 以 ImP - PRSC 为主, ImR 以 ImR - PRSC 为主。河西地区的分项服务之间主要呈协同关系, ES 分项价值的同向变化是 ES 总价值变化的主要原因, ImR 和 ImP 的修复与保护应注重 P, R, S 和 C 的综合提升。

4 讨论

4.1 生态修复一级分区

5 类一级分区的空间分布和地理特征存在差异, 采用的修复和保护对策也应不同。

ImP 主要分布在祁连山东部和西部, 以草地、林地和冰川为主, 生态条件良好, 是河西地区重要的水源地。近年来, “南护水源、中保绿洲、北治风沙” 方针的指导, 退耕还林、退牧还草项目的开展^[28], 使得该区域未利用地面积急剧减少, 林地和草地面积大幅增加, 植被覆盖率得到有效提升, 水源涵养能力持续提高, 生态条件不断改善, ES 总价值增加。因此, ImP 应该继续推动环境保护和绿色发展, 对祁连山区的冰川、河流和森林实施管护, 重视水源地生态保护, 确保林草资源安全。

ImR 可分为 3 部分, 分别是祁连山中部山地、马鬃山山地和走廊平原绿洲。第一部分以林地和草地为主, 生态本底较好, 但耕地的增加占用了大量林地和草地, 使得 ES 总价值减少。应结合高山区域特色, 实行高坡度耕地退耕还林还草、封山育林等措施。第二部分以未利用地和草地为主, 土壤疏松多沙, 少水多风, 近年来草地发生退化、泉水逐渐枯竭, 水土流失加剧^[29-30]。该区域应以防风固沙为重点, 大力建设“北方防风固沙带” 综合防护体系, 栽种荒漠植被, 严格水资源管理制度, 开展水生态修复。第三部分以耕地、草地为主, 由于人口的扩张和长期过度放牧^[31], 导致建设用地和耕地面积增加, 草地面积减少, ES 总价值损失。该区域应坚守生态保护红线, 提倡建设用地扩张不占用基本农田, 持续推进退牧还草和草原生态修复治理工程。

除修复潜力较大的 ImR 和 ImP 之外, 还需注意 PoR, PrR 的修复和 PrP 的保护。为避免 PoR 沙漠化进一步的加剧, ES 总价值降低的聚集性出现, 应该采取适当的预防措施, 积极治理土地沙化, 封沙育林育草以增加植被, 向 ES 总价值提升的方向努力。不全面的生态保护措施使得 PrR 的生态条件恶化, 该区域 ES 总价值损失主要由于林地和草地的减少, 因此, 必须实行严格的人工干预, 开展造林种草,

确保 PrR 林草地充足, 以逐步提升生态质量。生态修复措施的有效开展促进 PrP 生态条件改善, 该区域需实施首要的保护措施, 促进未利用地继续转化为植被区域, 维持 ES 总价值的稳步提升, 并发挥其中心作用, 逐渐改善邻近区的生态质量。

4.2 生态修复二级分区

分项服务之间主要呈协同关系, 分项价值的同向变化是引起总价值变化的主要原因。因此, 需注重 P, R, S 和 C 的整体提升, 加强分项服务之间的协同增强作用, 减弱分项服务之间的相互抑制作用, 消耗生态系统服务功能时, 需投入一定量资金保证 ES 的再生产, 避免消极的抑制作用; 在发展和保护之间寻求平衡点, 兼顾多项 ES, 促使 ES 效益最大化, 例如, 加大人工投入来提升原料生产、食物生产的供给能力时, 需限制水源附近的农业生产开发, 以确保支持服务和调节服务的稳定。

4.3 局限性

本文的研究仍有诸多不足, 主要包括 3 个方面: ①是否有更优的空间单元未进一步探讨; ②未考虑 ES 价值变化的剧烈程度, 某分项价值变化是否为总价值变化的主要变化有待分析; ③未探究 2005—2020 年间 ES 变化的规律和趋势, 下一步可采取每隔 5 a 的方法探究 ES 变化, 提高生态修复分区的可靠性。

5 结论

1) 本文以甘肃省河西地区为研究区, 结合遥感影像和统计年鉴等多种数据, 采用随机森林分类、当量因子法以及聚类与异常值分析等方法, 提出了基于 ES 变化的生态修复二级分区方法。根据 ES 总价值变化开展生态修复一级分区, 再依据 ES 分项价值变化的组合特征划分二级分区。该方法充分考虑了生态修复的潜力和方向, 具有一定的科学性和合理性, 对修复和保护的方向提供一定的参考, 为有效解决生态退化问题、稳步提升 ES 价值提供有利前提。

2) 2005—2020 年间, 走廊平原的耕地、建设用地增加, 北山山地的草地减少, 祁连山的林地和草地增加, ES 总价值和分项价值总体较稳定, 增加和减少区域较集中。

3) 河西地区生态修复一级分区的面积占比分别为: PrR 0. 9% , ImR 7. 2% , PoR 78. 0% , ImP 13. 0% 和 PrP 0. 9% 。PoR 主要分布在 3 大流域平原以及北山山地的大片区域; PrP 和 PrR 零散分布在祁连山与山前草地的过渡带; ImR 在走廊平原、马鬃山

以及祁连山中部均有分布；ImP 主要在祁连山东、西部。较于 PoR、PrR 以及 PrP,ImR 和 ImP 的修复和保护潜力更大,且生态保护较修复更为迫切。

4)生态修复二级分区包括 10 类修复二级区和 6 类保护二级区。ImP 与 ImR 的二级分区类型分别以 ImP-PRSC 与 ImR-PRSC 为主。河西地区分项服务之间主要呈协同关系,ES 分项价值的同向变化是总价值变化的主要原因,生态修复与保护需从 P,R,S 和 C 价值的整体提升入手。

参考文献 (References) :

[1] 欧阳志云.我国生态系统面临的问题与对策[J].中国国情国力,2017(3):6-10.
Ouyang Z Y. Problems and countermeasures faced by ecosystems in China[J]. China National Conditions and Strength,2017(3):6-10.

[2] 曹 宇,王嘉怡,李国煜.国土空间生态修复:概念思辨与理论认知[J].中国土地科学,2019,33(7):1-10.
Cao Y, Wang J Y, Li G Y. Ecological restoration for territorial space: Basic concepts and foundations[J]. China Land Science, 2019,33(7):1-10.

[3] 管英杰,刘俊国,崔文惠,等.中国生态修复研究进展态势分析[J].生态学报,2022,42(12):1-11.
Guan Y J, Liu J G, Cui W H, et al. Progress and future direction of ecological restoration research in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(12):1-11.

[4] 李淑娟,郑 鑫,隋玉正.国内外生态修复效果评价研究进展[J].生态学报,2021,41(10):4240-4249.
Li S J, Zheng X, Sui Y Z. Research progress in the evaluation of ecological restoration effects at home and abroad[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(10):4240-4249.

[5] 刘俊国,崔文惠,田 展,等.渐进式生态修复理论[J].科学通报,2021,66(9):1014-1025.
Liu J G, Cui W H, Tian Z, et al. Theory of stepwise ecological restoration[J]. Chinese Science Bulletin, 2021,66(9):1014-1025.

[6] 陈新闯,李小倩,吕一河,等.区域尺度生态修复空间辨识研究进展[J].生态学报,2019,39(23):8717-8724.
Chen X C, Li X Q, Lyu Y H, et al. Review of spatial identification of ecological restoration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(23):8717-8724.

[7] 陈新闯,李小倩,吕一河,等.生态空间区划体系的理论内涵及关键技术研究[J].生态学报,2022,42(3):843-850.
Chen X C, Li X Q, Lyu Y H, et al. Theoretical and technical discussion on the system of ecological space zoning[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(3):843-850.

[8] 宋 伟,韩 赟,刘 琳.山水林田湖草生态问题系统诊断与保护修复综合分区研究——以陕西省为例[J].生态学报,2019,39(23):8975-8989.
Song W, Han Z, Liu L. Systematic diagnosis of ecological problems and comprehensive zoning of ecological conservation and restoration for an integrated ecosystem of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands in Shaanxi Province[J]. Acta Ecologica

Sinica, 2019,39(23):8975-8989.

[9] 马世发,劳春华,江海燕.基于生态安全格局理论的国土空间生态修复分区模拟——以粤港澳大湾区为例[J].生态学报,2021,41(9):3441-3448.
Ma S F, Lao C H, Jiang H Y. Ecological restoration zoning of territorial space based on the pattern simulation of eco-security scenario: A case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(9):3441-3448.

[10] 欧阳志云,王如松,赵景柱.生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J].应用生态学报,1999,10(5):635-640.
Ouyang Z Y, Wang R S, Zhao J Z. Ecosystem services and their economic valuation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999,10(5):635-640.

[11] 欧阳志云,王效科,苗 鸿.中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J].生态学报,1999,19(5):607-613.
Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values [J]. Acta Ecologica Sinica, 1999,19(5):607-613.

[12] 岳文泽,侯 丽,夏皓轩,等.基于生态系统服务供需平衡的宁夏固原生态修复分区与优化策略[J].应用生态学报,2022,33(1):149-158.
Yue W Z, Hou L, Xia H X, et al. Territorially ecological restoration zoning and optimization strategy in Guyuan City of Ningxia, China: Based on the balance of ecosystem service supply and demand[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(1):149-158.

[13] 刘春芳,李鹏杰,刘立程,等.西北生态脆弱区省域国土空间生态修复分区[J].农业工程学报,2020,36(17):254-263.
Liu C F, Li P J, Liu L C, et al. Ecological restoration zoning of provincial territorial space in the ecologically fragile areas of Northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(17):254-263.

[14] Comín F A, Miranda B, Sorando R, et al. Prioritizing sites for ecological restoration based on ecosystem services[J]. Journal of Applied Ecology, 2018,55(3):1155-1163.

[15] 倪庆琳,侯湖平,丁忠义,等.基于生态安全格局识别的国土空间生态修复分区——以徐州市贾汪区为例[J].自然资源学报,2020,35(1):204-216.
Ni Q L, Hou H P, Ding Z Y, et al. Ecological remediation zoning of territory based on the ecological security pattern recognition: Taking Jiawang district of Xuzhou City as an example[J]. Journal of Natural Resources, 2020,35(1):204-216.

[16] 丹宇卓,彭 建,张子墨,等.基于“退化压力-供给状态-修复潜力”框架的国土空间生态修复分区——以珠江三角洲为例[J].生态学报,2020,40(23):8451-8460.
Dan Y Z, Peng J, Zhang Z M, et al. Territorially ecological restoration zoning based on the framework of degradation pressure, supply state and restoration potential: A case study in the Pearl River Delta region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(23):8451-8460.

[17] 付梦娣,唐文家,刘伟玮,等.基于生态系统服务视角的生态风险评估及生态修复空间辨识——以长江源区为例[J].生态学报,2021,41(10):3846-3855.
Fu M D, Tang W J, Liu W W, et al. Ecological risk assessment and spatial identification of ecological restoration from the ecosystem service perspective: A case study in source region of Yangtze River

[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(10): 3846–3855.

[18] 张建永, 李 扬, 赵文智, 等. 河西走廊生态格局演变跟踪分析[J]. *水资源保护*, 2015, 31(3): 5–10.

Zhang J Y, Li Y, Zhao W Z, et al. Tracking analysis on changes of ecological patterns in Hexi Corridor Region[J]. *Water Resources Protection*, 2015, 31(3): 5–10.

[19] 谢丽丽. 河西走廊生态保护修复现状及优化路径[J]. *发展*, 2021(7): 68–69.

Xie L L. Status quo and optimization path of ecological protection and restoration of Hexi Corridor [J]. *Developing*, 2021(7): 68–69.

[20] Ge Y, Hu S, Ren Z, et al. Mapping annual land use changes in China’s poverty-stricken areas from 2013 to 2018[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 232: 111285.

[21] Wohlfart C, Mack B, Liu G, et al. Multi-faceted land cover and land use change analyses in the Yellow River Basin based on dense Landsat time series: Exemplary analysis in mining, agriculture, forest, and urban areas[J]. *Applied Geography*, 2017, 85: 73–88.

[22] 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.

Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243–1254.

[23] Robert C, Ralph D, Rudolf D G, et al. The value of the world’s ecosystem services and natural capital[J]. *Nature: International Weekly Journal of Science*, 1997, 387(6630).

[24] 欧阳晓, 朱 翔, 贺清云. 基于生态系统服务和生态系统健康的生态风险评价——以长株潭城市群为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(16): 5478–5489.

Ouyang X, Zhu X, He Q Y. Incorporating ecosystem services with ecosystem health for ecological risk assessment: A case study in Changsha–Zhuzhou–Xiangtan urban agglomeration, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(16): 5478–5489.

[25] Xie G, Zhang C, Zhen L, et al. Dynamic changes in the value of China’s ecosystem services[J]. *Ecosystem Services*, 2017(26): 146–154.

[26] 舒 波, 李雨哲, 王 玲, 等. 乐山市土地利用与生态系统服务价值时空动态变化分析[J]. *生态科学*, 2022, 41(1): 159–168.

Shu B, Li Y Z, Wang L, et al. Spatial and temporal dynamic changes of land use and ecosystem service value in Leshan City[J]. *Ecological Science*, 2022, 41(1): 159–168.

[27] 许长军, 金孙梅, 王 英. 基于 GIS 的青藏高原人居环境自然适宜性评价[J]. *生态科学*, 2020, 39(6): 93–103.

Xu C J, Jin S M, Wang Y. Natural suitability evaluation of human settlements in Qinghai–Tibet Plateau based on GIS[J]. *Ecological Science*, 2020, 39(6): 93–103.

[28] 李传华, 范也平, 曹红娟, 等. 基于 CASA 模型的植被第一性生产力人为影响定量研究——以石羊河流域为例[J]. *干旱区地理*, 2018, 41(1): 142–151.

Li C H, Fan Y P, Cao H J, et al. Impact of human activities on net primary productivity based on the CASA model: A case study of the Shiyang River Basin[J]. *Arid Land Geography*, 2018, 41(1): 142–151.

[29] 杨雪菡, 白永平, 车 磊, 等. 甘肃省生态安全时空演变特征及影响因素解析[J]. *生态学报*, 2020, 40(14): 4785–4793.

Yang X D, Bai Y P, Che L, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of ecological security pattern in Gansu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(14): 4785–4793.

[30] 候 启, 张 勃, 何 航, 等. 近 50 多年河西地区干热风事件时空变化特征[J]. *干旱区研究*, 2019, 36(2): 403–411.

Hou Q, Zhang B, He H, et al. Spatiotemporal variation of dry-hot wind events in the Hexi region in recent 50 years[J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(2): 403–411.

[31] 许春娟, 贾生海, 白有帅, 等. 河西走廊荒漠区及水源涵养区水保和人工植被建设刍议[J]. *水利规划与设计*, 2022(4): 89–92.

Xu C J, Jia S H, Bai Y S, et al. Discussion on the construction of water conservation and artificial vegetation in the desert area and water conservation area of the Hexi Corridor[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2022(4): 89–92.

ES change – based ecological restoration zoning for the Hexi region

HUANG Zhuo^{1,2,3}, SUN Jianguo^{1,2,3}, FENG Chunyue^{1,2,3}, XU Peng⁴, YANG Hao^{1,2,3}, HOU Wenbing^{1,2,3}
(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. National – Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China; 3. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China; 4. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Ecological restoration zoning is a prerequisite for effective ecological restoration, and currently, the most commonly used zoning method is based on ecosystem services (ES). Most of the previous studies merely focus on the current ES status but ignore its changes, thus failing to reflect the potential and direction of ecological restoration. This study proposed a two-level zoning method for ecological restoration based on ES changes and applied this method to the Hexi region, Gansu Province. First, through Landsat image classification based on the Google Earth Engine (GEE) platform, this study obtained two periods (2005 and 2020) of land use data and

calculated the ES sub – value and total value of the two periods of data using the equivalent factor method. Then, this study constructed the level – 1 ecological restoration areas (priority restoration area PrR, important restoration area ImR, potential restoration area PoR, important protection area ImP, and priority protection area PrP) through the clustering and outlier analyses of the total ES value changes. Finally, the level – 2 ecological restoration zones were determined based on the combined characteristics of changes in the values ES subitems. The results show that: ① Various level – 1 areas, i. e. , the PrR, ImR, PoR, ImP, and PrP areas account for 0.9% , 7.2% , 78.0% , 13.0% , and 0.9% , respectively. Most of the PoR areas are distributed in the Gobi desert of Hexi region, the PrR and PrP areas are sporadically distributed in the transition zone from the Qilian Mountains to the piedmont grassland , the ImR and ImP zones are mostly distributed in the Qilian Mountains, corridor plains, and mountains in the north. There exit greater potential for the restoration of the ImR areas and the protection of the ImP areas but limited potential for ecological restoration. Furthermore, there is a more urgent need for protection than for restoration; ② The level – 2 areas can be classified into 10 categories of restoration areas and six categories of protection areas. The level – 2 areas of the ImR and ImP areas are primarily determined based on the synergistic changes in sub – services. Both ecological restoration and protection measures for the Hexi region should focus on the comprehensive enhancement of ES.

Keywords: ES; change; clustering and outlier analysis; ecological restoration zoning; Hexi region
(责任编辑: 陈昊旻)