doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.033

陕北生态恢复区不同草地主导服务功能时空变化

马　琪[1]　刘　康[1]　李　婷[2]　包玉斌[1]　贺成民[3]

(1.西北大学城市与环境学院,西安 710127;
2.中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085;
3.陕西省水文水资源勘测局,西安 710068)

摘要:利用生态系统分类及生态参量数据产品,运用 InVEST 生态服务评估模型,分析了陕北重大生态建设工程实施关键年份(2000—2010 年)内草地生态系统类型及其主导服务功能的时空变化特征。结果表明:延安市和榆林市的黄土沟壑区草地生态系统面积明显增加,草地植被覆盖度整体由低覆盖向中覆盖等级转变,其中草原和草丛覆盖度呈明显增长趋势。11 年间,各草地类型平均土壤保持能力逐年增加,由大到小呈现草原、草丛、稀疏草地的一致特征,分布于榆林市南部和延安市北部的草原是陕北草地土壤保持服务功能增加的主要贡献者。各类型草地产水功能变化表现为先减少后增加,稀疏草地分布区产水功能对陕北风沙滩区能源化工基地建设、城市生态安全维护以及农牧业可持续发展意义重大。

关键词:草地;生态系统服务;植被覆盖度;土壤保持;产水量;陕北

中图分类号:S812;TP79　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2018)02-0260-09

Temporal and Spatial Variation of Grassland Dominant Ecosystem Services under Major Ecological Restoration in Northern Shaanxi Province

MA Qi[1]　LIU Kang[1]　LI Ting[2]　BAO Yubin[1]　HE Chengmin[3]

(1. *College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an* 710127, *China*
2. *State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100085, *China*
3. *Hydrology and Water Resources Investigation Bureau of Shaanxi Province, Xi'an* 710068, *China*)

Abstract: Based on the ecosystem classification and ecological parameter data, the structure and dominant services, including sediment retention and water supply, of grassland ecosystem in Northern Shaanxi Province from 2000 to 2010, which was a key period to the Grain to Green Program, were evaluated by using the integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs (InVEST) model. The impacts of human activities on the ecological construction of grassland area and its ecosystem service function were clarified. The results indicated that the area of grassland ecosystem in the loess gully region of Yan'an and Yulin Cities was increased significantly, especially in steppe and scrub-grass, which showed a greening trend of the low-cover vegetation to medium-cover vegetation. During the study periods, the function of sediment retention for each types of grassland was improved and the steppe was the major contributor for sediment retention, followed by scrub-grass and sparse grass. As to the water supply, each types of grassland exhibited the tendency of decreasing firstly and then increasing. The restoration of sparse grass in north of the Great Wall of Northern Shaanxi had great value to the construction of energy and chemical industry base, and the maintenance of urban ecological security as well as the sustainable development of farming and animal husbandry. The results provided scientific basis of the major ecological construction, the sustainable development of agriculture and animal husbandry in grassland ecosystem.

Key words: grassland; ecosystem services; vegetation coverage; sediment retention; water supply; Northern Shaanxi Province

收稿日期:2017-05-27　修回日期:2017-07-11
基金项目:环保部重点项目(STSN-05-27)
作者简介:马琪(1987—),男,博士生,主要从事综合自然地理学与 3S 技术应用研究,E-mail:502006767@qq.com
通信作者:刘康(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事生态评价与规划研究,E-mail:liuk63@126.com

0　引言

生态建设工程是进行区域生态建设战略的重要载体和实施方式。1999 年以来，全国范围陆续开展和实施了天然林资源保护、三北防护林建设、退耕还林还草、京津风沙源治理等一系列重大生态建设恢复工程。其中退耕还林还草工程规模之大、实施时间跨度和范围之广最为典型[1]。20 世纪生态环境脆弱、自然气候因素的影响，以及开垦草原、超载放牧、破坏草原植被等人类活动干扰引起的草地退化问题由此得到缓解和恢复[2]。陕北黄土高原作为全国退耕还林草生态建设与恢复工程实施的重点区域[3]，在生态工程实施的同时伴随着煤炭和石油经济发展带来的人口增长及城镇扩张，因此，草地生态系统服务功能在这一复杂环境中发生着深刻的变化。

众多学者已针对陕北地区生态系统空间结构、质量以及各类服务功能进行了定量评价。例如，JIA 等[4]对陕北退耕还林区生态系统服务功能权衡和协同关系的研究表明，2000—2008 年草地生态系统的土壤保持功能和净初级生产力均明显提高，产水量则有一定减少。FU 等[5]对 2000—2008 年黄土高原土壤保持功能评价结果显示，随着植被的恢复，生态系统土壤侵蚀控制服务能力随之提高。OUYANG 等[6]第一次对中国国家层面的生态系统评估结果表明，2000—2010 年陕北黄土高原各项生态系统服务功能呈集聚增长趋势。总体而言，已有研究多将区域内各类草地生态系统作为整体进行生态服务功能评估[4-7]。然而，草地生态系统分布具有明显的地带性和空间分布规律，不同降水和地形环境下草本植物组成不同[8]，因而不同草地类型服务功能变化各有差异。现阶段，阐释不同草地生态系统类型主导服务功能变化状况及其系统整体的演替方向研究较少。

草地生态服务功能在自然条件严酷、高寒和干旱的生态环境中起着关键性作用[9]。处于干旱半干旱脆弱区的陕北黄土高原土壤侵蚀剧烈、资源性缺水严重，但由于大规模生态恢复实施，河流输沙量得到有效控制[3]。不同类型草地产水功能和土壤保持功能的差异是影响上述生态过程的关键因素。由此，基于考虑自然环境参量差异的生态系统分类数据[8]，本文利用斯坦福大学、大自然保护协会、世界自然基金会和其他相关机构共同开发的 InVEST（Integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs）模型，对陕北重大生态恢复工程实施关键 11 年（2000—2010 年）内各类草地土壤保持与产水功能变化进行评估，旨在明析人类活动干预重要时段各类草地主导服务功能的时空演变特征，以期为重大生态恢复工程建设布局、草地生态系统的保育和农牧业可持续发展提供科学依据。

1　研究区概况

陕北地区包括陕西省延安市和榆林市辖全部区域，含 22 个县和 3 个市辖区。位于东经 107°14′～111°14′，北纬 35°20′～39°35′，东邻山西，西与甘肃、宁夏接界，北与内蒙古毗连，南与省内铜川市、咸阳市和渭南市相接，总面积 79 981.9 km^2。研究区内榆林市长城以南具有暖温带气候特征，长城沿线以北具有温带气候特征。境内海拔 1 000～1 600 m 之间，年均降水量 400～600 mm 之间，降水空间分布由东南向西北逐渐减少[7]。

根据遥感数据光谱特征，结合植被覆盖度与生态系统植物群落构成特征，以全国遥感土地覆盖分类系统为基础，综合考虑气候、地形等因素，陕北地区草地生态系统分布由北向南依次为：稀疏草地、草原、草丛（图 1）[10-11]。其中草丛、草原是植被覆盖度大于 20%、高度小于 3 m 的自然或半自然的草地植被；稀疏草地植被覆盖度则介于 4%～20%。草丛主要为中生和旱生多年草本植物群落，以白羊草（*Bothriochloaischcemum*（Linn.）*Keng*）、黄背草（*Themeda japonica*（Willd.）*Tanaka*）为建群种并与其他中旱生草本相结合，分布于延河以南区域；草原位于温带半干旱气候下延河以北黄土梁峁丘陵区，

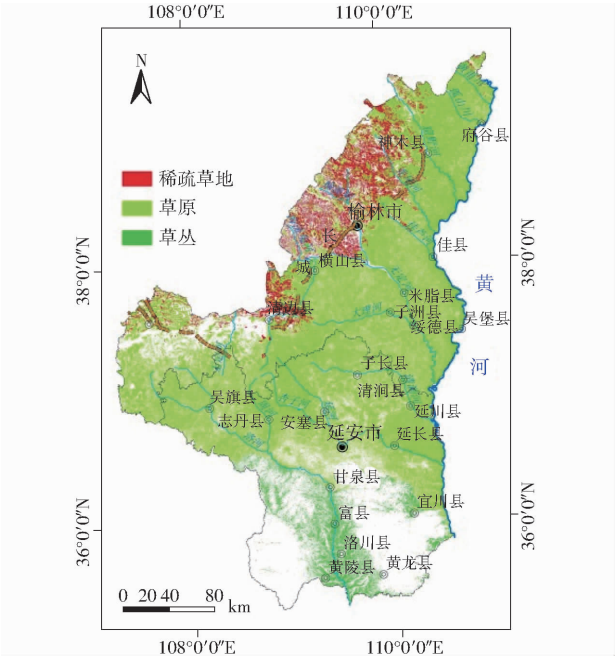


图 1　研究区位置与 2010 年不同草地类型分布

Fig. 1　Study area and distribution of different grassland types in 2010

植被类型单一,主要为旱生草本植物,以本氏针茅(*Stipacapillata* Linn.)、白羊草为建群种;在覆沙地段以冰草(*Agropyroncristatum* (Linn.) *Gaertn.*)为建群种并与其他旱生草本结合。稀疏草地主要分布于长城沿线毛乌素沙区,以沙蒿(*Artemisia desertorum* Spreng.)为建群种,局部地区存在以寸草苔(*Carexduriuscula* C. A. Mey.)为建群种的平原草甸类以及沼泽化草甸草场[10]。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

草地生态系统的土壤保持功能和产水功能通过InVEST模型中相应功能模块进行评估,各功能模块具体的计算公式原理参见InVEST 2.5.3版本用户指南[12]。

2.2 数据来源与处理

本文主要数据来源于全国生态环境11年变化(2000—2010年)遥感调查与评估项目专题数据集;其中2000、2005、2010年3期土地覆盖分类数据分别以2000和2005年LandsatTM以及2010年HJ-1 CCD为遥感数据源,采用面向对象的自动分类技术,通过高分影像和野外核查点开展遥感解译数据的修正与验证;2000—2010年生长季草地植被覆盖度、叶面积指数、潜在蒸散量等生态参量数据,主要基于时间分辨率为16 d的MODIS-NDVI产品数据并结合陕西省2个典型小样区、6个样地、54个样方的草地生态系统野外观测数据及气象数据反演获得;该数据均经过了严格的精度和质量控制,数据可靠[6,8,11]。30 m分辨率DEM和2000—2010年56个气象站降水量数据分别来源于中国科学院计算机网络信息中心-地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)以及中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn)。

InVEST模型中土壤保持、产水量模块运算参数及参数图层构建详见表1,栅格数据图层大小均统一为30 m×30 m,坐标系统为WGS_1984_Albers。

表1 草地生态系统服务综合评估模型参数表

Tab.1 Parameters for integrated valuation of grassland ecosystem services

功能模块	参数	参数图层构建
水土保持	降水侵蚀力	雨量雨强模型[13]计算后插值获得
	土壤可蚀性	据土壤砂粒、粉粒、粘粒和有机碳百分含量EPIC模型计算获得[14-15]
	坡度坡长因子	DEM输入模型生成
	植被覆盖因子	根据2000、2005、2010年3期年均植被覆盖度数据计算获得[16]
	管理措施因子	根据研究区稀疏草地、草原和草丛类型已有P值研究确定[17-18]
	泥沙持留率	以模型数据库66种泥沙持留效率值为基础,参考陕北黄土高原已有研究[18]
产水量	降水量	根据56个站点2000—2010年间多年平均降雨量反距离平方加权法插值获得[6]
	潜在蒸散量	全国生态十年下发的2000、2005、2010年3期数据,由ETWatch计算获得[6,8,11]
	土壤深度	郭兆元编《陕西土壤》中第二次土壤普查数据集[15]
	根系深度	根据草地类型文献报道获得[18-21]
	植物可利用水含量	利用土壤质地计算获得[7,15]
	蒸散系数	根据全国生态十年下发的2000、2005、2010年3期叶面积指数计算,叶面积指数基于冠层辐射传输模型,采用查找表(LUT)的方法来反演[6,8,11]

3 结果与分析

3.1 不同类型草地面积及其转变特征

2000—2010年间陕北3期草地生态系统面积组成如表2所示。研究时段内,草地生态系统面积增加显著,所占面积比由49.89%提高到53.84%。草原为陕北地区所占面积最大的覆盖类型,面积增加较为显著,2000—2005年是其恢复的主要阶段;草丛和稀疏草地所占面积比较小,草丛面积也有增加趋势,而稀疏草地面积略有减少。

表2 2000—2010年各类型草地生态系统面积统计

Tab.2 Area statistics of different grassland types from 2000 to 2010

类型	2000年		2005年		2010年		面积变化/km²		
	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	面积/km²	比例/%	2000—2005年	2005—2010年	2000—2010年
草原	33 495.16	41.88	36 085.49	45.12	36 623.08	45.79	2 590.33	537.59	3 127.92
草丛	2 283.14	2.85	2 366.29	2.96	2 385.02	2.98	83.15	18.73	101.88
稀疏草地	4 124.41	5.16	4 092.52	5.12	4 057.89	5.07	-31.89	-34.63	-66.52
合计	39 902.71	49.89	42 544.30	53.19	43 065.99	53.84	2 641.59	521.69	3 163.28

从草地生态系统整体的转变过程来看(表 3)，前 6 年草地面积增加 2 775.10 km^2，其中 99.31% 由农田转变而来，其他用地转入仅占 0.69%；后 5 年草地面积增加仅为 712.37 km^2，较 2000—2005 年期间有大幅度减少，但 97.40% 的增加面积仍由农田转变而来，其他用地转入不足 3%。从草地损失去向分析，2005 年前与 2005 年后两个时期草地损失面积分别为 100.86、189.70 km^2，其中前一时期 81.43 km^2 的草地转变为城镇用地，后一时期增加到 139.98 km^2；可见随着城镇用地逐年扩展，草地损失面积进一步增加。从不同草地类型来看，2000—2005 年草原面积增加最大为 2 679.63 km^2，占到草地增加总面积的 96.56%；而 2005—2010 年期间草原增加的面积占比(94.60%)依然最大，且 2 个时期各类型草地生态系统转入增加面积均主要来源于农田生态系统。草地整体损失去向主要是转变为城镇用地，其中稀疏草地和草原这一特征表现明显，而草丛与草地生态系统整体损失特征不同。

表 3　不同时段草地面积转入来源及损失去向

Tab. 3　Area statistics of different grassland types in different periods　　km^2

时段	类型		森林	灌丛	湿地	农田	城镇	荒漠	裸地	合计
2000—2005 年	稀疏草地	转入	0	0	1.33	0	0	5.34	3.07	9.74
		损失	0.01	1.70	2.42	6.64	30.22	0.26	0.30	41.55
	草原	转入	0	1.41	4.77	2 670.52	0	0	2.94	2 679.63
		损失	0.06	3.17	1.77	1.19	50.24	0.02	0.29	56.73
	草丛	转入	0.05	0	0.17	85.51	0	0	0	85.73
		损失	0.11	0.92	0.09	0.43	0.96	0	0.06	2.58
2005—2010 年	稀疏草地	转入	0	0.46	0	2.77	0	8.14	1.83	13.20
		损失	0.17	1.43	0.02	0.03	40.08	1.08	3.04	45.84
	草原	转入	0.01	1.33	2.65	666.07	0	0.03	3.81	673.90
		损失	1.96	18.06	7.34	12.47	95.50	1.59	0.98	137.91
	草丛	转入	0.07	0.02	0.10	25.02	0	0	0.05	25.27
		损失	0.01	0.02	0.62	0.90	4.40	0	0	5.95

3.2　草地生态系统植被覆盖度空间分布及其变化特征

将草地植被覆盖度分为低(0 ~ 20%)、较低(20% ~ 40%)、中(40% ~ 60%)、较高(60% ~ 80%)、高等(80% ~ 100%)5 级[22]，从植被覆盖度各等级面积统计变化可以看出(图 2)，2000—2010 年草地生态系统由低和较低覆盖度等级为主逐渐转为以中度和较低覆盖等级为主。11 年间，中度和较高覆盖度等级的草地面积呈缓慢增加趋势；低和较低覆盖度等级的草地面积前 5 年具有波动性特征，尤其是 2002 年低覆盖度草地明显较小，2006 年以后低覆盖等级的草地进一步减小，较低覆盖等级的草地则在波动变化后于 2006 年基本恢复至 2000 年水平；高覆盖度草地面积基本未变化。

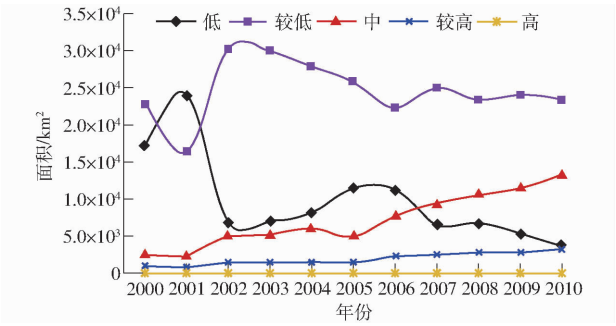


图 2　2000—2010 年不同等级植被覆盖度面积变化

Fig. 2　Area and vegetation changes of different levels from 2000 to 2010

从不同覆盖类型草地来看(图 3)，11 年间，稀疏草地年均植被覆盖度介于 11.02% ~ 20.11% 之间，多年平均覆盖度最低为 16.26%，绝大部分稀疏草地处于低覆盖等级水平。草原年均植被覆盖度介于 20.44% ~ 37.70%，大部分处于较低覆盖等级水平，但整体覆盖度有明显提升。草丛年均植被覆盖度介于 52.83% ~ 66.11%，2005 年前草丛主要处于中覆盖等级水平，2006 年以后覆盖度整体升高，大部分处于较高覆盖度等级水平。从3个时期空间分布来看(图 4a ~ 4c)，陕北草地年均植被覆盖度整体呈南高北低的特征，榆林市低覆盖度的草地从 2000 年到

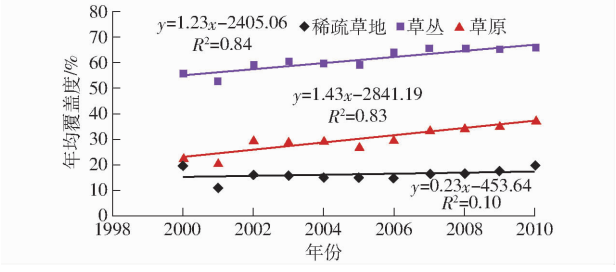
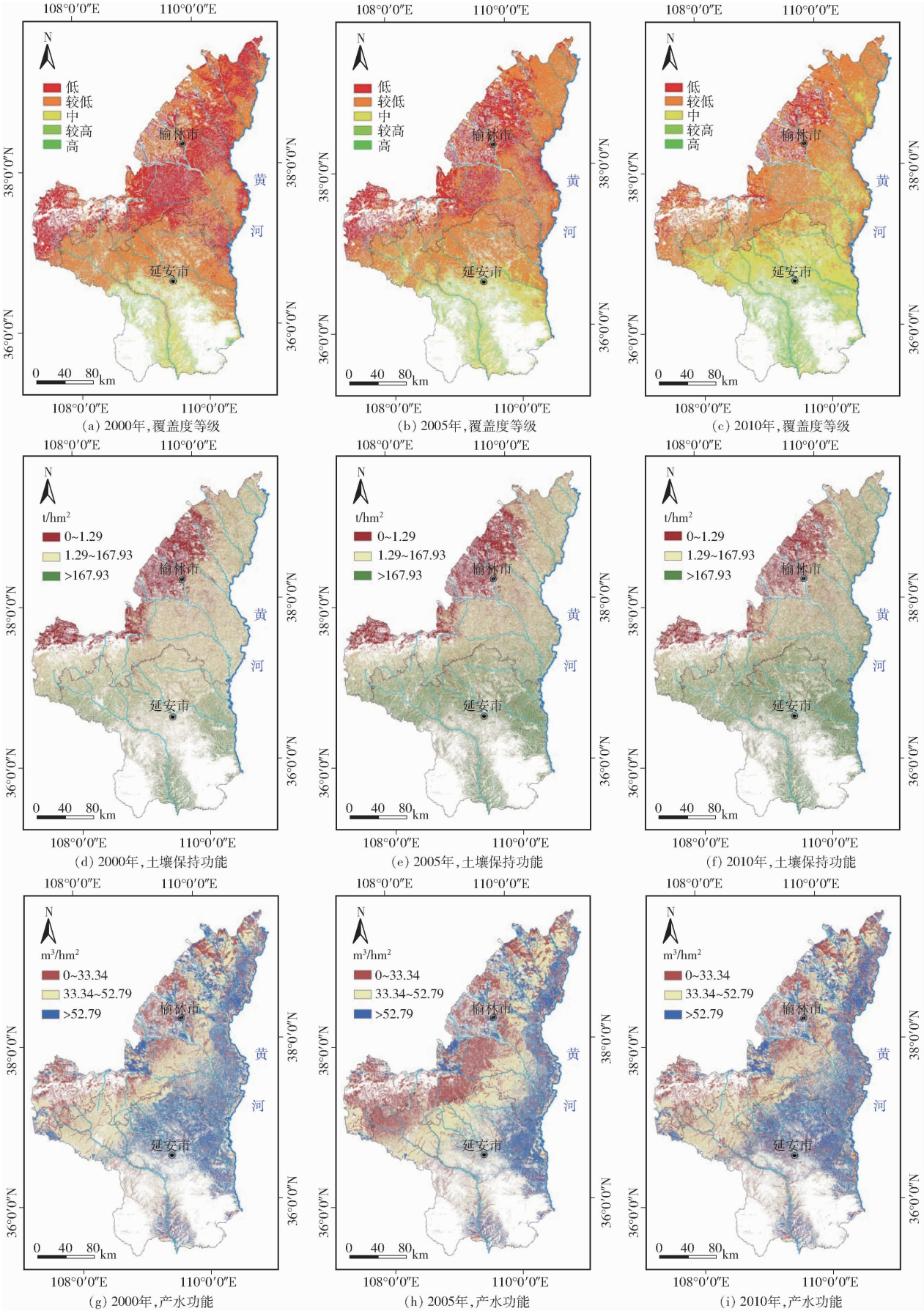


图 3　2000—2010 年各类草地年均覆盖度变化趋势

Fig. 3　Changing trend of annual average vegetation coverage of different grassland types from 2000 to 2010



(a) 2000年,覆盖度等级 (b) 2005年,覆盖度等级 (c) 2010年,覆盖度等级

(d) 2000年,土壤保持功能 (e) 2005年,土壤保持功能 (f) 2010年,土壤保持功能

(g) 2000年,产水功能 (h) 2005年,产水功能 (i) 2010年,产水功能

图 4 2000—2010 年陕北草地年均植被覆盖度分级、土壤保持、产水功能空间分布特征

Fig. 4 Spatial distributions of annual average vegetation coverage, spatial pattern of soil conservation and water supply of grassland in Northern Shaanxi Province from 2000 to 2010

2010 年有大面积的减少，中度和较高覆盖度的草地在延安市北部和榆林市南部丘陵沟壑区有大范围的增加。

3.3　草地土壤保持功能时空变化

草地土壤保持功能评估结果表明，2000、2005 和 2010 年草地生态系统土壤保持总量分别为 2.588×10^8、4.111×10^8、5.112×10^8 t。单位面积平均土壤保持量为 47.02、77.01、93.34 t/hm^2。从各类型草地土壤保持功能来看，2000 年，草丛、草原和稀疏草地平均土壤保持量分别为 62.67、214.63、4.39 t/hm^2，土壤保持总量分别为 4.81×10^7、2.089×10^8、1.8×10^6 t。2005 年，草丛平均土壤保持量增长到 99.00 t/hm^2，草原和稀疏草地分别增长到 230.12、4.88 t/hm^2，土壤保持总量分别为 5.35×10^7、3.556×10^8、2.0×10^6 t。2010 年，草地平均土壤保持量进一步提高，草丛、草原和稀疏草地平均土壤保持量分别为 120.91、286.57、7.92 t/hm^2，土壤保持总量分别高达 6.72×10^7、4.408×10^8、3.2×10^6 t。3 个时期，草原是草地土壤保持服务功能的主要贡献者，各草地类型平均土壤保持能力逐年增加，由大到小呈现草原、草丛、稀疏草地的一致特征。从空间分布可知（图 4d～4f），草地土壤保持功能呈现南高北低的特征，3 个时期土壤保持功能高值区主要在延安市境内。11 年间，土壤保持功能增加的区域主要分布于榆林市南部和延安市北部的丘陵沟壑区。

3.4　草地产水功能时空变化

从草地产水量功能评估结果来看，2000、2005 和 2010 年草地生态系统产水总量分别为 1.864×10^8、1.781×10^8、1.942×10^8 m^3。2000 年草丛、草原和稀疏草地单位面积平均产水量分别为 44.99、46.88、53.09 m^3/hm^2，产水总量分别为 9.9×10^6、1.551×10^8、2.14×10^7 m^3。2005 年草丛单位面积平均产水量降低到 42.77 m^3/hm^2，草原和稀疏草地分别降低到 41.47、51.12 m^3/hm^2，产水总量分别为 9.9×10^6、1.479×10^8、2.04×10^7 m^3。2010 年，草地单位面积平均产水能力得到一定提高，草丛、草原和稀疏草地单位面积平均产水量分别为 44.29、45.03、53.25 m^3/hm^2，产水总量分别为 1.02×10^7、1.629×10^8、2.11×10^7 m^3。11 年间，各类型草地产水功能均表现出先减小后增加的规律，与 SU 等[23]和包玉斌等[7]对陕北黄土高原产水功能的变化规律的评估结果一致。大规模退耕还林（草）生态建设工程初期（2000—2005 年），区域内 25% 以上坡耕地被林灌草地取代，但造林植被的生长对水分消耗量大。随着退耕还林（草）工程进入巩固期，以“封山育林”为政策指导，草地生态系统逐渐趋于稳定，水文调节服务得到提升增强[24-25]。此外，3 个时期稀疏草地单位面积产水量均为最高，草原产水总量最大，这主要与草原面积增加有关。从空间分布可见（图 4g～4i），长城沿线以南黄土沟壑区草地产水功能整体上呈现出由西北向东南递增的分布格局，长城沿线以北风沙滩地区草地产水功能空间分布规律不明显。

4　讨论

本研究显示，2000—2010 年陕北草地生态系统面积占比增加 3.94%，其中 2000—2005 年期间增加明显大于 2006—2010 年期间。由于 1999 年延安市和榆林市作为退耕还林还草工程试点启动实施以来，大规模生态建设活动引起区域土地利用覆被发生强烈变化，陕北地区草地面积明显增加。随着国家退耕还林还草工程结构性调整进入巩固成果阶段后，农田退耕为草地面积从 2000—2005 年期间的 2 756.03 km^{2}减小到 2005—2010 期间的 693.86 km^2，这一期间草原是受人类退耕活动影响最大类型，草原增加面积占到变化总面积的 96.71%。但伴随陕北能源经济的发展，工业园区、交通路网、城镇发展扩建速度加快[26]，草地生态系统面积流向城镇用地的面积占比达 73.79% 以上，其中草原和稀疏草地二者损失占到 71.47%。分析结果表明（表 3），2000—2005 年和 2005—2010 年期间草原面积增加和损失变化特征最为明显。退耕还林还草工程推进的同时，当地政府积极采取封山禁牧、舍饲圈养等保护林草的措施，减少人为活动干扰[27]，陕北草地覆盖度整体呈现逐年增长的趋势，草地整体植被覆盖度等级由低覆盖向中覆盖等级转变。

土壤保持功能和产水功能主要受气候和人类活动的双重影响，FENG 等[28]研究表明，过去 10 年黄土高原及其各个生物-气候区多年平均降水和温度均未发生显著变化。本文主导服务功能的计算时降雨量亦采用多年平均值，故土壤保持和产水量变化的波动主要受人类活动影响。植被恢复等水土保持工程的实施，增加了这一区域蒸发和蒸腾作用，降低了径流的可再生性[29]；主导服务功能的计算因子及评估结果显示，2000—2010 年草地年均植被覆盖度提高 16.15%，年均潜在蒸散量升高 82.04 mm，其中 2000—2005 年期间升高达 60.39 mm，草原单位面积平均产水量这一时期下降最大，达 5.41 m^3/hm^2。从不同区域的人类活动来看，黄土沟壑区受退耕还林政策和快速城镇化的驱动影响[26]，大量的坡耕地退耕转变为草原，分析显示（表 3）2000—2010 年，草原面积增加 3 336.59 km^2，年均植被覆盖度增加

17.26%,草原土壤保持总量增加 1.11 倍,从空间上看(图 4),草原覆盖度升高的区域与土壤保持功能增加的区域分布一致,呈现出南高北低分布规律。11 年间,土壤保持能力明显提高的区域主要位于延安市北部和榆林市南部的草原分布区,且 2000—2005 年该区域草地土壤保持能力改善较 2005—2010 年期间明显。表明植被恢复显著增强了生态系统土壤侵蚀控制能力[5,7,30],并提高了植被固碳释氧效益[31]。

稀疏草地生长于榆林市长城沿线以北风沙滩地区,主要处于榆溪河、秃尾河的中上游区,区内地形平坦,第四系砂层结构疏松,孔隙发育,储水空间大,透水性、导水性好,常有地下水出漏形成海子或小湖泊;但该区域随着陕北能源化工基地快速发展,工业用水急剧增加,煤矿开采等人为活动造成地面塌陷,进一步破坏含水层及地下水运移环境,造成稀疏草地面积有所减少,分析结果表明(表 3),2000—2005 年期间稀疏草地 72.73% 的损失面积由于人为活动引起,2005—2010 年期间这一比例增长到 87.43%。但该区域稀疏草地植被覆盖度随着退耕还林还草工程、三北防护林工程等生态恢复建设整体有所提高,退化程度得到一定缓解和改善,植被覆盖度趋势斜率为 0.23,草地蒸发和蒸腾作用有一定增强,同样引起河川径流减少;根据刘晓燕等[32]的研究,沙生植物根系较黄土沟壑区深,风沙滩区改善植被的耗水量更大,高家堡以上秃尾河流域林草植被覆盖率每增加 1 个百分点,径流系数将下降 0.010 4,而窟野河中游径流系数则将下降 0.009 6。稀疏草地分布的主要河流上游压盖丰富的煤炭资源,下游为榆横煤化工业园区、榆神煤电化工业区,随着工业化进程加快,工业需水量将日趋加大。2000—2010 年间窟野河流域煤炭大规模开发,煤炭开采量的平均值是 20 世纪末期的 30 多倍,工业用水增加了近 10 倍,煤炭开发引起的减水量由一开始几乎没有增加到 2010 年的 1.60×10^8 t。这一时期由生态工程实施造成减水量的占比为 47%,煤炭开采影响占到 19%[33]。所以尚未进行大规模煤炭开发的稀疏草地核心分布区区域应在继续保护治沙成果和治理裸露沙地的同时[22],注重限制不合理的煤炭开采活动,防止地下水渗漏疏干引起的大面积草地退化,保护稀疏草地核心区的产水功能对陕北能源化基地建设及该区域城市生态安全、农牧业发展具有不可忽视的重要作用。草地生态系统主导服务功能受气候因子、人文和政策的人为活动影响复杂,未来需要加强量化评估和驱动因素分析,继续探索新的生态参数组合纳入草地生态系统服务功能的评价中,使评估结果更精确和完整。

5 结论

(1)2000—2010 年,陕北草地生态系统面积逐年增加,其中草原面积增加最大,其次是草丛和稀疏草地;增加的区域主要位于延安市和榆林市的黄土丘陵区,草地生态系统损失转出方向主要为工业、交通、居住等城镇用地,转入增加面积主要来源为农田。草地生态系统整体由低和较低覆盖度等级为主逐渐转为以中度和较低覆盖度等级为主,年均植被覆盖度 2005—2010 年增长明显。

(2)陕北重大生态恢复工程实施关键 11 年内,草原是草地土壤保持服务功能增加的主要贡献者,各草地类型平均土壤保持能力逐年增加,由大到小呈现草原、草丛、稀疏草地的一致特征。空间上,土壤保持功能高值区主要在延安市境内,土壤保持功能增加的区域主要分布于榆林市南部和延安市北部的丘陵沟壑区。

(3)各类型草地产水功能变化表现为先减少后增加;人类活动干预重要时段内稀疏草地单位面积产水量均为最高,稀疏草地分布区产水功能对陕北风沙滩区能源化工基地建设、城市生态安全维护以及农牧业可持续发展意义重大;空间上,长城沿线以南黄土沟壑区草地产水功能整体上呈现出由西北向东南递增的分布格局,长城沿线以北风沙滩地区草地产水功能空间分布规律不明显。

参 考 文 献

1 张力小. 关于重大生态建设工程系统整合的思考[J]. 中国人口·资源与环境,2011,21(12):73 - 77.
ZHANG Lixiao. Systematic integration of key ecological construction projects in China[J]. China Population, Resources and Environment,2011,21(12):73 - 77. (in Chinese)

2 张海燕,樊江文,邵全琴,等. 2000—2010 年中国退牧还草工程区生态系统宏观结构和质量及其动态变化[J]. 草业学报,2016,25(4):1 - 15.
ZHANG Haiyan,FAN Jiangwen,SHAO Quanqing,et al. Ecosystem dynamics in the 'Returning Rangeland to Grassland' programs, China[J]. Acta Prataculturae Sinica,2016,25(4):1 - 15. (in Chinese)

3 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等. 降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(2):169 - 175. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20140228&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.028.
YAN Qinghong,YUAN Cuiping,LEI Tingwu,et al. Effect of rainstorm patterns and soil erosion control practices on soil and water

loss in small watershed on Loess Plateau[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(2):169 – 175. (in Chinese)

4 JIA X Q,FU B J,FENG X M,et al. The tradeoff and synergy between ecosystem services in the Grain-for-Green areas in Northern Shaanxi, China[J]. Ecological Indicators,2014,43:103 – 113.

5 FU B J,LIU Y,LÜ Y H,et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China[J]. Ecological Complexity, 2011,8(4):284 – 293.

6 OUYANG Z Y,ZHENG H,XIAO Y,et al. Improvements in ecosystem services from investments in naturalcapital[J]. Science, 2016,352(7):1455 – 1459.

7 包玉斌,李婷,柳辉,等. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J]. 地理研究,2016,35(4): 664 – 676.
BAO Yubin,LI Ting,LIU Hui,et al. Spatial and temporal changes of water conservation of Loess Plateau in Northern Shaanxi Province by InVEST model[J]. Geographical Research,2016,35(4): 664 – 676. (in Chinese)

8 欧阳志云,张路,吴炳方,等. 基于遥感技术的全国生态系统分类体系[J]. 生态学报,2015,35(2):219 – 226.
OUYANG Zhiyun, ZHANG Lu,WU Bingfang,et al. An ecosystem classification system based on remote sensor information in China[J]. Acta Ecologica Sinica,2015,35(2):219 – 226. (in Chinese)

9 刘兴元,梁天刚,龙瑞军,等. 北方牧区草地资源分类经营机制与可持续发展[J]. 生态学报,2009,29(11):5851 – 5859.
LIU Xingyuan,LIANG Tiangang,LONG Ruijun,et al. Classification management mechanisms for grassland resources and sustainable development strategies in Northern China[J]. Acta Ecologica Sinica,2009,29(11): 5851 – 5859. (in Chinese)

10 殷世杰,闵乐园,王友荣,等. 陕西草场资源[M]. 西安:陕西人民出版社,1989.

11 欧阳志云,王桥,郑华,等. 全国生态环境十年变化(2000—2010 年)遥感调查评估[J]. 中国科学院院刊,2014,29(4):462 – 466.
OUYANG Zhiyun,WANG Qiao,ZHENG Hua,et al. National ecosystem survey and assessment of China(2000—2010)[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2014,29(4):462 – 466. (in Chinese)

12 TALLIS H T,RICKETTS T,GUERRY A D,et al. InVEST 2.5.3 user's guide[R]. The Natural Capital Project, Stanford, 2013.

13 卜兆宏, 董勤瑞, 周伏建, 等. 降雨侵蚀力因子新算法的初步研究[J]. 土壤学报, 1992,9(4):408 – 417.
BU Zhaohong, DONG Qinrui, ZHOU Fujian, et al. Preliminary study on new algorithm of erosive factor of rainfall[J]. Acta Pedologica Sinica, 1992, 9(4):408 – 417. (in Chinese)

14 陈姗姗,刘康,李婷,等. 基于 InVEST 模型的商洛市水土保持生态服务功能研究[J]. 土壤学报,2016,53(3):800 – 807.
CHEN Shanshan,LIU Kang,LI Ting, et al. Evaluation of ecological service function of soil conservation in Shangluo City based on InVEST model[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016,53(3):800 – 807. (in Chinese)

15 郭兆元. 陕西土壤[M]. 北京:科学出版社, 1992.

16 蔡崇法, 丁树文, 史志华,等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2):19 – 24.
CAI Chongfa, DING Shuwen, SHI Zhihua, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(2):19 – 24. (in Chinese)

17 谢红霞. 延河流域土壤侵蚀时空变化及水土保持环境效应评价研究[D]. 西安:陕西师范大学,2008.
XIE Hongxia. Study on the spatio-temporal change of soil loss and on the assessment of impacts on environment of soil and water conservation in Yanhe Basin[D]. Xi'an:Shaanxi Normal University,2008. (in Chinese)

18 包玉斌. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原生态服务功能时空变化研究[D]. 西安:西北大学, 2015.
BAO Yubin. Temporal and spatial change of ecological services on loess plateau of Shaanxi by InVEST model[D]. Xi'an: Northwest University,2015. (in Chinese)

19 游松财, 邸苏闯,袁晔. 黄土高原地区土壤田间持水量的计算[J]. 自然资源学报,2009, 24(3):545 – 552.
YOU Songcai, DI Suchuang, YUAN Ye. Study on soil field capacity estimation in the Loess Plateau region[J]. Journal of Natural Resources,2009, 24(3): 545 – 552. (in Chinese)

20 彭怡. InVEST 模型在生态系统服务功能评估中的应用研究—以四川汶川地震灾区为例[D]. 成都:中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 2010.
PENG Yi. Application of InVEST model in ecosystem services assessment: acasestudy from Wenchuan Earthquake Area[D]. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry Water Conservancy, 2010. (in Chinese)

21 傅斌, 徐佩, 王玉宽,等. 都江堰市水源涵养功能空间格局[J]. 生态学报, 2013,33(3):789 – 797.
FU Bin, XU Pei, WANG Yukuan,et al. Spatial pattern of water retetnion in Dujiangyan County[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3):789 – 797. (in Chinese)

22 肖强,陶建平,肖洋. 黄土高原近 10 年植被覆盖的动态变化及驱动力[J]. 生态学报,2016,36(23):7594 – 7602.
XIAO Qiang,TAO Jianping,XIAO Yang. Dynamic vegetation cover change over the past 10 years on the Loess Plateau,China[J]. Acta Ecologica Sinica,2016,36(23):7594 – 7602. (in Chinese)

23 SU C H,FU B J. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and landuse changes[J]. Global and Planetary Change,2013,101:119 – 128.

24 张琨,吕一河,傅伯杰. 黄土高原典型区植被恢复及其对生态系统服务的影响[J]. 生态与农村环境学报,2017,33(1): 23 – 31.
ZHANG Kun, LÜ Yihe, FU Bojie. Vegetation restoration and its influences on ecosystem services in areas typical of the Loess Plateau[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2017,33(1): 23 – 31. (in Chinese)

25 滕晗,夏建新,任华堂. 退耕还林还草工程对黄土高原延河流域水土保持功能影响研究[J]. 泥沙研究,2015,62(4): 14 – 19.
TENG Han,XIA Jianxin,REN Huatang. Study on GTGP effect of soil and water conservation functionin Yan River Basin in the Loess Plateau[J]. Journal of Sediment Research,2015,62(4): 14 – 19. (in Chinese)

26 李登科,范建忠,权文婷. 陕西省植被退化及其驱动因素分析[J]. 生态学杂志,2015,34(10):2907 - 2913.
LI Dengke, FAN Jianzhong, QUAN Wenting. Analysis of vegetation degradation and its driving factors in Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(10): 2907 - 2913. (in Chinese)

27 李登科,郭铌,何慧娟. 陕北长城沿线风沙区植被指数变化及其与气候的关系[J]. 生态学报,2007,27(11):4620 - 4629.
LI Dengke, GUO Ni, HE Huijuan. Vegetation change and its relationship with climate in the region along the Great Wall in Northern Shaanxi[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 27(11): 4620 - 4629. (in Chinese)

28 FENG X M, FU B J, LÜ N, et al. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau[J]. Scientific Reports, 2013, 3, Article number: 2846.

29 信忠保,余新晓,甘敬,等. 黄河中游河龙区间植被覆盖变化与径流输沙关系研究[J]. 北京林业大学学报,2009,31(5):1 - 7.
XIN Zhongbao, YU Xinxiao, GAN Jing, et al. Vegetation restoration andits effects on runoff and sediment yield in Hekouzhen - Longmen Section of the middle reaches of Yellow River[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(5): 1 - 7. (in Chinese)

30 范建忠,李登科,董金芳. 陕西省重点生态建设工程区植被恢复状况遥感监测[J]. 农业工程学报,2012,28(7):228 - 234.
FAN Jianzhong, LI Dengke, DONG Jinfang. Remote sensing analysis of vegetation restoration in key ecological construction areas of Shaanxi Province[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(7): 228 - 234. (in Chinese)

31 张翀,任志远. 陕北地区土地生态系统固碳释氧价值量动态测评[J]. 地理研究,2015,34(8):1522 - 1534.
ZHANG Chong, REN Zhiyuan. Dynamic evaluation of the value of carbon fixation and oxygen release based on land ecosystem in Northern Shaanxi[J]. Geographical Research, 2015, 34(8): 1522 - 1534. (in Chinese)

32 刘晓燕,刘昌明,杨胜天,等. 基于遥感的黄土高原林草植被变化对河川径流的影响分析[J]. 地理学报,2014,69(11):1595 - 1603.
LIU Xiaoyan, LIU Changming, YANG Shengtian, et al. Influences of shrubs-herbs-arbor vegetation coverage on the runoff based on the remote sensing data in Loess Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(11): 1595 - 1603. (in Chinese)

33 吴喜军,李怀恩,董颖,等. 陕北地区煤炭开采等人类活动对河道径流影响的定量识别[J]. 环境科学学报,2014,34(3):772 - 780.
WU Xijun, LI Huaien, DONG Ying, et al. Quantitative identification of coal mining and other human activities on river runoff in Northern Shannxi region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(3): 772 - 780. (in Chinese)

(上接第 112 页)

13 袁建平,张克玉,司乔瑞,等. 基于非均相流模型的离心泵气液两相流动数值研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(1):89 - 95. http://www.j-csam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20170112&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.012.
YUAN Jianping, ZHANG Keyu, SI Qiaorui, et al. Numerical investigation of gas - liquid two-phase flow in centrifugal pumps based on inhomogeneous model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 89 - 95. (in Chinese)

14 陈次昌,刘正英,刘天宝,等. 两相流泵的理论与设计[M]. 北京:兵器工业出版社,1993.

15 余志毅,刘影. 叶片式混输泵气液两相非定常流动特性分析[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(5):66 - 69. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20130513&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.013.
YU Zhiyi, LIU Ying. Characteristic analysis of unsteady gas - liquid two-phase flow in a multiphase rotodynamic pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 66 - 69. (in Chinese)

16 张余亚,蔡淑杰,朱宏武,等. 三级螺旋轴流式混输泵可压缩流场数值模拟[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(9):89 - 95. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20140915&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.015.
ZHANG Yuya, CAI Shujie, ZHU Hongwu, et al. Numerical investigation of compressible flow in a three-stage helico-axial multiphase pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 89 - 95. (in Chinese)

17 SATO S, FURUKAWA A, TAKAMATSU Y, et al. Air-water two-phase flow performance of centrifugal pump impeller with various blade angles[J]. The Japanese Society of Mechanical Engineers, 1996, 39(2): 223 - 229.

18 MINEMURA K, UCHIYAMA T. Three-dimensional calculation of air-water two-phase flow in a centrifugal pump based on a bubbly flow model with fixed cavity[J]. JSME International Journal, Series B: Fluids & Thermal Engineering, 1994, 37(4): 726 - 735.

19 PINEDA H, BIAZUSSI J, LÓPEZ L, et al. Phase distribution analysis in an electrical submersible pump (ESP) inlet handling water-air two-phase flow using computational fluid dynamics (CFD)[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2016, 139: 49 - 61.

20 FURUKAWA A, SHIRASU S I, SATO S. Experiments on air-water two-phase flow pump impeller with rotating-stationary circular cascades and recirculating flow holes[J]. The Japanese Society of Mechanical Engineers, 1996, 39(3): 575 - 582.

21 SATO S, FURUKAWA A. Air-water two-phase flow performances of centrifugal pump with movable blade impeller and effects of installing diffuservanes[J]. International Journal of Fluid Machinery & Systems, 2010, 3(3): 245 - 252.