

# 2000—2015年黄土高原生态系统的水源涵养、土壤保持和NPP服务的时空分布与权衡/协同关系

汪晓珍<sup>1</sup>, 吴建召<sup>1</sup>, 吴普侠<sup>2</sup>, 上官周平<sup>1,3</sup>, 邓蕾<sup>1,3</sup>

(1.西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西杨凌712100;

2.陕西省林业科学院黄土高原水土保持与生态修复国家林草局重点实验室,

西安710021;3.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌712100)

**摘要:** 生态系统服务评估决定区域可持续发展,对人类福祉至关重要。以黄土高原为研究区域,基于CASA、InVEST和RUSLE模型,结合土地利用类型、归一化植被指数、气象等数据,分析了2000年、2005年、2010年和2015年的NPP、土壤保持和水源涵养3项关键生态系统服务的时空分布特征,识别了3种生态系统服务的热点区,并基于相关系数法分析了黄土高原地区和不同气候区(干旱气候区、半干旱气候区、高原气候区、半湿润气候区)不同生态系统服务间的权衡/协同关系。结果表明:(1)2000—2015年,黄土高原地区的土地利用类型变化剧烈,其中林地(2.8%)和建设用地(43.1%)显著增加,耕地(-2.7%)明显减少;(2)2000—2015年,净初级生产力(NPP)、产水量和土壤保持均呈现增长趋势,分别增加14.1%,5.3%和101.3%;(3)黄土高原的4类热点区(非热点区、一类热点区、二类热点区、三类热点区)所占面积变化不显著,分布具有明显的地带性,从西北到东南依次为非热点区、一类热点区、二类热点区和三类热点区;(4)在整个黄土高原地区,土壤保持与NPP、水源涵养之间为协同关系,NPP与水源涵养为权衡关系;在4个气候区,NPP与土壤保持之间的权衡/协同关系与黄土高原地区一致,但土壤保持和水源涵养在半干旱气候区和半湿润气候区呈权衡关系,NPP与水源涵养在高原气候区和半湿润气候区为协同关系。为促进区域生态系统可持续管理,应在土地规划过程中考虑生态系统服务之间的相互关系,尽可能减少权衡,增加协同。

**关键词:** 生态系统服务; 碳固持; NPP; 水源涵养; 权衡与协同

中图分类号:X171.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2021)04-0114-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.04.016

## Spatial and Temporal Distribution and Trade-off of Water Conservation, Soil Conservation and NPP Services in the Ecosystems of the Loess Plateau from 2000 to 2015

WANG Xiaozhen<sup>1</sup>, WU Jianzhao<sup>1</sup>, WU Puxia<sup>2</sup>, SHANGGUAN Zhouping<sup>1,3</sup>, DENG Lei<sup>1,3</sup>

(1.State Key Laboratory for Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.Key Laboratory of State Forestry and Grass

Bureau of Loess Plateau of Shaanxi Forestry Academy of Sciences, Xi'an 710021; 3.Institute of Soil and

Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** Ecosystem services assessments determine regional sustainable development and are critical to human well-being. This study took the Loess Plateau as the research area, based on the CASA, InVEST and RUSLE model, combined with the data of land use types, normalized vegetation index, meteorology and so on, analyzed the spatial and temporal distribution characteristics of the three key ecosystem services (NPP, soil conservation, and water conservation) in 2000, 2005, 2010 and 2015; and identified the hot spots of three ecosystem services, analyzed the trade-offs between different ecosystem services on the Loess Plateau and different climatic regions (arid, semi-arid, plateau and semi-humid climate zone) based on the correlation coefficient method. The results showed: (1) From 2000 to 2015, land use types in the Loess Plateau region

changed drastically, among which forest land (2.8%) and construction land (43.1%) increased significantly, and cultivated land (-2.7%) decreased significantly. (2) From 2000 to 2015, all the average unit area of net primary productivity (NPP), water conservation and soil conservation showed an increasing trend, increased by 14.1%, 5.3% and 101.3% respectively. (3) The areas occupied by the four types of hotspots in the Loess Plateau (non-hotspots, first-type hotspots, second-type hotspots, and third-type hotspots) had not changed significantly, but the distribution had the obvious zonal distribution, that was non-hotspots, first-class hotspots, second-class hotspots, and third-class hot spots respectively from northwest to southeast. (4) Across the Loess Plateau, there was a synergistic relationship between soil conservation and NPP, soil conservation and water conservation. And there was a trade-off between NPP and water conservation. However, soil conservation and water conservation was trade-off in semi-arid and semi-humid regions, and the relationship between NPP and water conservation also was trade-off in arid and semi-arid regions. In order to promote the sustainable management of regional ecosystems, the relationships between ecosystem services should be considered in the land planning process, and trade-offs should be minimized and synergies should be maximized.

**Keywords:** ecosystem services; carbon sequestration; NPP; water conservation; trade-offs and synergies

生态系统服务(ecosystem service, ES)指人类从生态系统获得的各种惠益<sup>[1]</sup>。全球经济和人口的迅速增加导致人类对自然资源和环境过度利用,对生态系统服务的需求不断增加<sup>[2-3]</sup>。千年生态系统服务评估报告<sup>[4]</sup>指出,全球约60%的生态系统服务呈现退化趋势,严重影响人类福祉,直接威胁生态环境的可持续发展。生态系统的承载力有限,当人类对生态系统的开发利用超过一定限度时,会导致全球变暖、荒漠化加剧、水资源短缺等一系列环境问题<sup>[5]</sup>。因此,对生态系统服务研究有助于决策者管理多功能生态系统,实现区域可持续发展。

黄土高原是世界上水土流失最严重的地区之一,过度砍伐和耕作、地形陡峭、土壤沙化和夏季的高强度降雨造成该地区的生态环境退化<sup>[6]</sup>。为了防治水土流失,改善生态环境,自20世纪末,黄土高原实施了大规模的退耕还林(草)工程<sup>[7]</sup>。由此导致的土地利用方式的改变必然对生态系统服务及其权衡/协同关系产生重要的影响<sup>[8]</sup>。目前,针对黄土高原地区生态系统服务的研究,在内容方面,主要集中在土壤保持<sup>[9]</sup>、碳固持、水源涵养<sup>[10]</sup>等方面,或者评估土地利用变化<sup>[11]</sup>、植被覆盖度<sup>[12]</sup>、降雨、地形<sup>[13]</sup>等因素对生态系统服务的影响<sup>[14]</sup>;在研究尺度方面,多在小流域<sup>[15]</sup>、样带<sup>[16]</sup>和县市<sup>[17]</sup>等中小尺度。基于整个黄土高原地区的多种生态系统服务间权衡/协同关系的研究较少。因此,在退耕还林(草)等生态工程实施的大背景下,亟于开展黄土高原地区多种生态系统服务的时空分布特征及其权衡与协同关系研究。

基于以上问题,本文基于黄土高原地区2000年、2005年、2010年和2015年的土地利用、气象、土壤属性、植被类型、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)等数据,利用RUSLE、CASA、In-

VEST等生物物理模型评估了土壤保持、水源涵养和NPP等3种生态系统服务的时空变化,并分析了生态系统服务间的权衡/协同关系;同时,采用空间叠置分析法分析了生态系统服务的热点区域,并揭示不同区域服务供给能力的强弱,以期为指导黄土高原地区生态恢复和管理提供理论依据和数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黄土高原地区位于我国中部偏北部(图1),是世界黄土分布最集中、面积最大的地区之一,总面积约64万km<sup>2</sup>,约占我国领土面积的6.5%,覆盖陕西、山西、河南、宁夏、甘肃、青海和内蒙7个省(自治区)。地形复杂,内有盆地、高原、丘陵和沟壑,海拔介于60~5 200 m。该区的气候属于大陆性季风气候,年均气温6~14℃,年均降水量200~700 mm,约有70%的降雨发生在6—9月。植被类型从西北到东南依次为干旱荒漠、温带草原和落叶阔叶林。按照自然条件相对一致、县级行政区相对完整原则,黄土高原地区可划分为4个气候区,分别为高原气候区、干旱气候区、半干旱气候区和半湿润气候区。

### 1.2 数据来源与处理

本文需要的数据主要包括土地利用/覆被数据、气象数据、DEM数据、土壤数据和归一化植被指数(NDVI)数据5类:(1)2000年、2005年、2010年、2015年的土地利用数据(1 km)来源于中国科学院资源环境数据中心(<http://www.resdc.cn>);(2)气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)提供的黄土高原305个气象站点的逐日降雨量、平均气温和日太阳总辐射数据,基于此,本文利用普通克里金插值获取2000年、2005年、2010年、2015年的黄土

高原地区气象数据;(3) DEM 数据(90 m)来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>);(4) 土壤数据(1 km)来源于寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>),包含土壤质地、土壤有机碳含量、植物可利用含水量、根系深度等数据;(5) 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年的 NDVI 数据(1 km)来源于美国地质调查局(<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/>)。

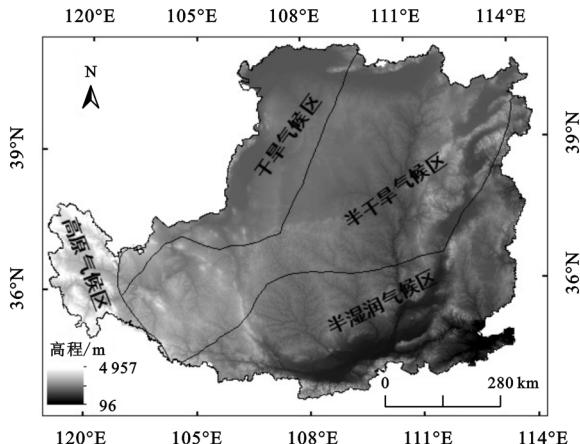


图 1 黄土高原地形

## 2 研究方法

### 2.1 生态系统服务定量评估

2.1.1 水源涵养 黄土高原水资源匮乏,生态系统产水服务与人类福祉息息相关,水资源是限制该地区经济和农业发展的重要因素之一。有研究<sup>[18]</sup>表明,水源涵养与产水量为正相关关系,InVEST 模型的 water yield 模块基于水量平衡原理评估栅格单元的产水能力,能够较好地反映生态系统的水源涵养能力。因此,本文采用 InVEST 模型的 water yield 模块估算黄土高原地区的水源涵养量,计算公式为:

$$Y(x) = (1 - \frac{AET(x)}{P(x)})P(x) \quad (1)$$

式中:  $Y(x)$  为栅格单元  $x$  的年产水量(mm);  $AET(x)$  为第  $x$  个栅格单元的年实际蒸散量(mm);  $P(x)$  为栅格单元  $x$  的年降雨量(mm)。

2.1.2 NPP 植物净初级生产力(net primary productivity, NPP)是判定生态系统碳循环的重要因子<sup>[18]</sup>。本研究采用 CASA 模型<sup>[19]</sup>估算研究区 NPP,公式为:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (2)$$

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \quad (3)$$

$$\epsilon(x, t) = T_{\epsilon 1}(x, t) + T_{\epsilon 2}(x, t) + W_{\epsilon}(x, t) \times \epsilon_{\max} \quad (4)$$

式中:  $NPP(x, t)$  为像元  $x$  在  $t$  月的净初级生产力( $g/m^2 C$ );  $APAR(x, t)$  为像元  $x$  在  $t$  月的光合有效辐射;  $\epsilon(x, t)$  为像元  $x$  在  $t$  月的实际光利用效率( $g/MJ$ );  $SOL(x, t)$  为像元  $x$  在  $t$  月的太阳总辐射( $MJ/m^2$ );

$FPAR(x, t)$  为像元  $x$  在  $t$  月植被层对入射光合有效辐射的吸收比例(无单位);  $T_{\epsilon 1}(x, t)$  为低温对光利用率的胁迫作用;  $T_{\epsilon 2}(x, t)$  为高温对光利用率的胁迫作用,无量纲;  $W_{\epsilon}(x, t)$  为水分胁迫影响系数,无量纲;  $\epsilon_{\max}$  为植被在理想状态下的实际光能利用率( $g/MJ$ )。

2.1.3 土壤保持 黄土高原是世界上水土流失最严重的地区之一,研究土壤保持对该地区意义重大。本研究采用修正的通用土壤流失方程(RUSLE 模型)估算土壤保持服务。其计算公式为:

$$A_m = RKLSCP \quad (5)$$

$$A_p = RKLS \quad (6)$$

$$A_c = A_m - A_p \quad (7)$$

式中:  $A_m$  为年平均实际土壤侵蚀模数( $t/hm^2$ );  $A_p$  为年平均潜在土壤侵蚀模数( $t/hm^2$ );  $A_c$  为年平均土壤保持( $t/hm^2$ );  $R$  为降雨侵蚀力系数,采用 Wischmeier 等<sup>[20]</sup>提出的月尺度公式计算;  $K$  为土壤侵蚀力系数,采用国家系统科学数据中心的黄土高原 30 m 分辨率土壤可蚀性因子数据集;  $L$  为坡长系数;  $S$  为坡度系数; 坡长和坡度系数采用国家系统科学数据中心的黄土高原地区 90 m 分辨率的坡长因子和坡度因子;  $C$  为植被覆盖与管理因子;  $P$  为水土保持措施因子。

### 2.2 生态系统服务热点区识别及权衡关系分析

借助 ArcGIS 10.2.1 软件,采用空间叠置分析法识别黄土高原生态系统服务热点区,获得 2000—2015 年生态系统服务热点分布图。对某栅格单元超过黄土高原地区当年 NPP、水源涵养、土壤保持 3 种生态系统服务平均值的区域定义为热点区域<sup>[21]</sup>。其中,若栅格单元的 3 个生态系统服务均没有超过各自的平均值,这个栅格单元则为 0 类热点区;若有 1 个服务超过其平均值,则为 1 类热点区;以此类推,分别为 2 类和 3 类热点区。

通过相关性分析评估生态系统服务之间的权衡/协同关系,运用 SPSS 软件对 2 种不同生态服务进行相关性分析,若 2 种服务的相关系数为正,这 2 种服务为协同关系;反之,则为权衡关系。

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用格局时空变化

研究获取了黄土高原地区 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年各类土地利用面积。结果表明,2000—2015 年黄土高原地区林地、建筑用地和水域的面积呈不同程度的增加,其中林地增加 2 626  $km^2$ ,增幅为 2.8%;建筑用地增加 41%;耕地、草地与未利用地呈不同幅度的减少,分别减少 2.8%,0.6% 与 1.5%(表 1)。

表1 2000—2015年黄土高原土地利用变化面积统计

单位:km<sup>2</sup>

土地利用 类型	2000—2005年	2005—2010年	2010—2015年	2000—2015年
耕地	-2228	-2171	-1264	-5663
林地	2035	570	84	2626
草地	-1000	309	-1113	-1804
水域	105	-32	241	310
建筑用地	1194	578	3434	5206
未利用地	-102	743	-1319	-678

2000—2015年,黄土高原土地利用类型的空间分布格局基本保持不变。以2015年为例,耕地(约

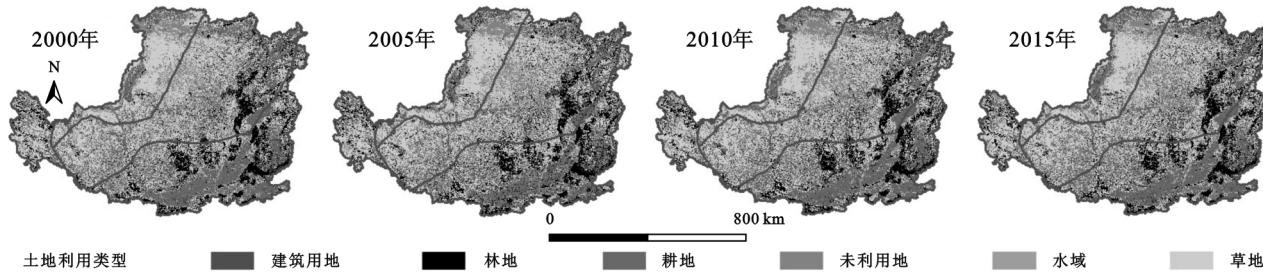


图2 2000—2015年黄土高原土地利用空间分布

### 3.2 生态系统服务时空分布格局

2000年、2005年、2010年和2015年黄土高原地区的NPP、土壤保持和水源涵养3种生态系统服务的单位面积平均值均呈增长趋势。NPP的单位面积平均值增幅为14%;土壤保持的单位面积平均值由2000年的6.2 t/hm<sup>2</sup>增加到2015年的12.4 t/hm<sup>2</sup>,增加显著,增幅为101.3%;水源涵养在4个时期的单位面积平均值分别为77.1,84.7,94.1,81.7 mm,呈波动增长趋势(表2)。

NPP空间格局在2000—2015年间变化较大,2000年NPP的高值区主要分布在半湿润气候区和高原气候区,2015年半干旱气候区NPP高值所占面积明显增加(图3);从变化量来看,高原气候区的NPP单位面积平均值总体下降,其他3个气候区均有不同程度的增加,增量较高的区域主要分布在半湿润气候区(90.4 g/m<sup>2</sup> C)和半干旱气候区(58.8 g/m<sup>2</sup> C)。

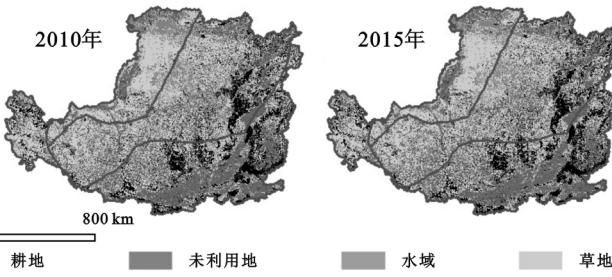
表2 2000—2015年黄土高原地区生态系统服务变化量

调查年份	干旱气候区			半干旱气候区			高原气候区			半湿润气候区			黄土高原地区		
	NPP/ (g·m <sup>-2</sup> C) (t·hm <sup>-2</sup> )		土壤保持量/ 养量/mm	NPP/ (g·m <sup>-2</sup> C) (t·hm <sup>-2</sup> )		土壤保持量/ 养量/mm	NPP/ (g·m <sup>-2</sup> C) (t·hm <sup>-2</sup> )		土壤保持量/ 养量/mm	NPP/ (g·m <sup>-2</sup> C) (t·hm <sup>-2</sup> )		土壤保持量/ 养量/mm	NPP/ (g·m <sup>-2</sup> C) (t·hm <sup>-2</sup> )		土壤保持量/ 养量/mm
2000—2005	-37.63	-0.35	-7.31	-37.63	-2.16	9.84	5.86	0.87	49.56	-25.19	0.84	4.21	-31.58	-0.70	7.59
2005—2010	37.21	0.20	14.07	39.79	4.03	8.65	24.74	1.09	-28.00	39.79	4.24	21.14	31.35	3.28	9.38
2010—2015	2.67	0.22	2.53	58.69	3.90	-6.27	-12.49	-1.53	-59.92	90.84	6.03	-26.13	55.39	3.65	-12.59
2000—2015	2.24	0.06	9.29	58.74	5.77	12.23	-14.73	0.44	-38.35	90.39	11.11	-0.77	55.16	6.23	4.38

### 3.3 生态系统服务热点区域分布

非热点区和一类热点区主要分布在干旱半干旱气

候区,其分布地区的土地利用类型大多为未利用地和草地;二类和三类热点区主要分布在半湿润气候区和高原气候区(图2);林地(约15%)主要分布在半干旱半湿润气候区过渡带及半湿润区东南部;草地(约41%)主要分布在半干旱气候区(图2)。由于退耕还林(草)工程的实施,干旱、半干旱和半湿润气候区的林地面积均呈增加趋势,其中干旱气候区和半干旱气候区的林地面积显著增加,分别增加452,1995 km<sup>2</sup>,高原气候区基本保持不变;干旱气候区、半干旱气候区、半湿润气候区和高原气候区耕地面积均有不同程度的减少,分别减少399,2676,2449,145 km<sup>2</sup>,主要被林地取代。值得注意的是,4个气候区的建筑用地面积均大幅度增加,涨幅处于20%~50%。



C)(图4)。2000年和2015年土壤保持空间格局基本稳定,大致呈现中间高、四周低的分布态势,高值区主要分布在半干旱半湿润气候区过渡带和高原气候区(图3);变化量的空间分布格局同土壤保持基本相似,增值较大的区域主要分布在半干旱半湿润气候区过渡带和半湿润气候区东南部(图4)。2000—2015年间水源涵养的空间格局变化明显,半湿润气候区水源涵养高值区所占面积逐年缩小,半干旱气候区产水量较高值所占面积逐年增大(图3);从变化量来看,2000—2015年高原气候区(-38.4 mm)和半湿润气候区(-0.8 mm)的水源涵养单位面积平均值呈下降态势,干旱(9.3 mm)和半干旱气候区(12.4 mm)的水源涵养单位面积平均值呈上升趋势(表2),其中半湿润气候区西南部、干旱气候区和半干旱气候区的水源涵养增加显著,干旱半干旱气候区的增值区主要分布在土地利用类型为未利用地的区域(图4)。

候区,其分布地区的土地利用类型大多为未利用地和草地;二类和三类热点区主要分布在半湿润气候区和高原

气候区,其中二类热点区的土地利用类型大多为草地和耕地,三类热点区的主要土地利用类型为林地。2000—2015 年,非热点区所占的面积比分别为 31%,35%,34% 和 33%,呈波动上升的趋势。一类热点区在 4 个年份的面积百分比分别为 30%,26%,28% 和 29%,在 2000—2010 年有所下降,2010—2015 年开始回升,呈波动下降态势;二类热点区所占百分比分别为 29%,25%,27% 和

28%,在 2000—2005 年有所下降,2005—2015 年则持续上升趋势,一类和二类热点区的下降比例均较小;3 类热点区在 4 个年份所占的比例分别为 10%,13%,11% 和 10%,先增加后减少,所占面积基本保持不变。整体来看,非热点区所占面积略有增加,一类和二类热点区所占面积略有减小,三类热点区所占面积则相对比较稳定(图 5)。

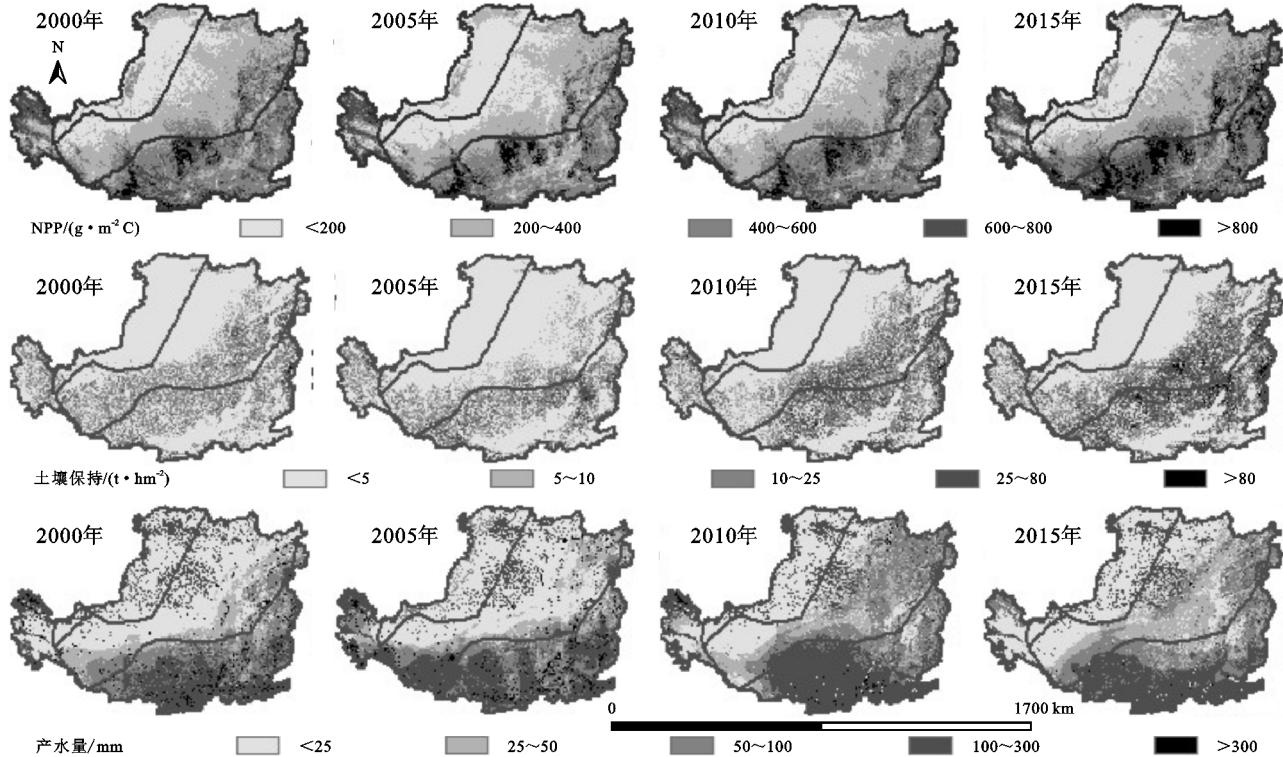


图 3 2000—2015 年黄土高原生态系统服务空间分布

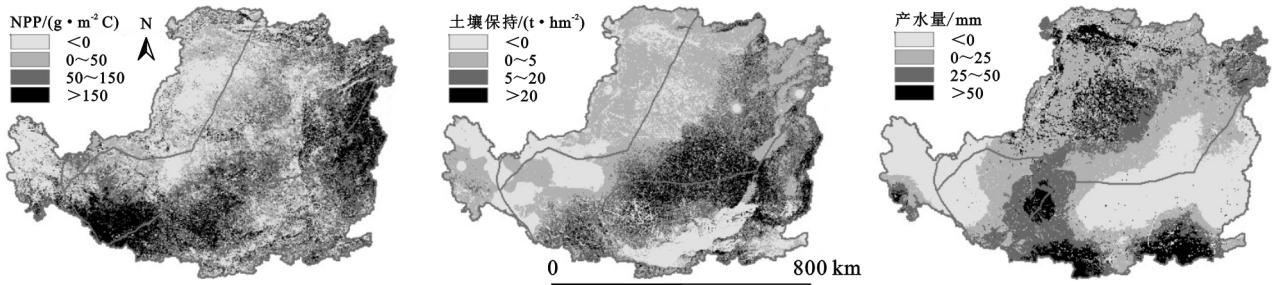


图 4 2000—2015 年黄土高原生态系统变化量空间分布

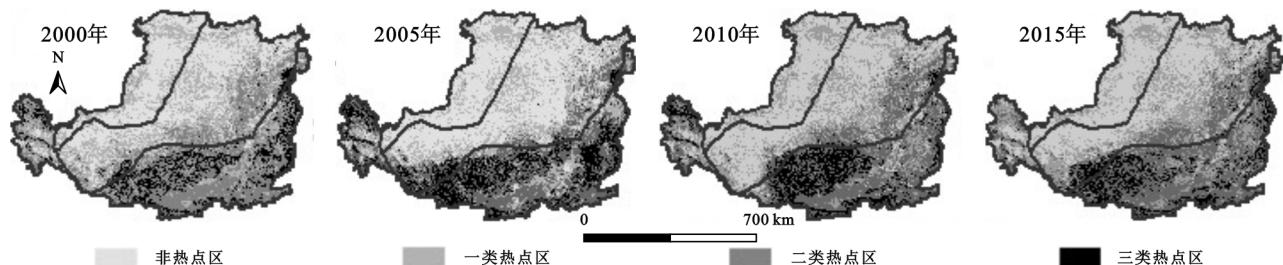


图 5 2000—2015 年黄土高原生态系统服务热点区分布

### 3.4 不同尺度的生态系统服务权衡/协同关系

以 2015 年生态系统服务之间的权衡/协同关系为例,对黄土高原地区来说,NPP 与土壤保持(显著正相关)、水源涵养与土壤保持之间为协同关系,NPP

与水源涵养之间为权衡关系(显著负相关)(表 3)。对不同气候区来说,NPP 与土壤保持服务在 4 个气候区均为协同关系,且呈显著正相关;但 NPP 与水源涵养仅在半湿润气候区和高原气候区为协同关系;土

壤保持与水源涵养在干旱气候区和高原气候区为协同关系,在半干旱气候区和半湿润气候区则为权衡关系(表4)。

表3 2015年黄土高原生态系统服务相关系数

生态系统服务	NPP	水源涵养	土壤保持
NPP	1	-0.32 <sup>**</sup>	0.51 <sup>**</sup>
水源涵养		1	0.57
土壤保持			1

注:“\* \*”表示在0.01水平上显著相关。下同。

表4 2015年黄土高原不同气候区生态系统服务相关系数

气候区	NPP—土壤保持	NPP—水源涵养	水源涵养—土壤保持
干旱气候区	0.48 <sup>**</sup>	-0.36	0.09
半干旱气候区	0.48 <sup>**</sup>	-0.02	-0.05
半湿润气候区	0.33 <sup>**</sup>	0.22 <sup>**</sup>	-0.04
高原气候区	0.41 <sup>**</sup>	0.34 <sup>**</sup>	0.04

## 4 讨论

### 4.1 黄土高原地区生态系统服务的时空动态变化

随着生态恢复,植被覆盖度显著增加是提高生态系统碳固持能力的重要原因,且从长期来看,碳储存量与恢复年限呈显著正相关<sup>[22]</sup>。干旱气候区、半干旱气候区和半湿润气候区的林地所占面积在15年间均有所增加,但干旱气候区的NPP基本保持稳定,半湿润和半干旱气候区NPP增长显著,主要原因是半湿润地区植被经过多年生长,有较强的碳固持能力<sup>[23]</sup>;半干旱地区林地显著增加,增强了该地区的碳固持能力<sup>[24]</sup>;干旱气候区的林地面积虽然明显增加,但由于该地区气候干旱、植被稀疏,沙漠生态系统占比大,植被恢复困难,故该区域的碳固持能力增长速度也较慢<sup>[25]</sup>。15年间,4个气候区的土壤保持服务均有所增加,这说明退耕还林(草)工程对土壤保持功能有明显的促进作用;增值较大的区域主要分布在半干旱半湿润气候区过渡带,原因是该地区地势平坦,林地覆盖度增加,林地有较强的冠层截留作用,有利于土壤保持<sup>[26]</sup>。干旱气候区的土壤保持量增值较小,主要是由于该区域土壤结构疏松、气候干旱,植被恢复困难<sup>[22]</sup>。另外,黄土高原地区自实施退耕还林(草)等生态恢复工程后,土地受到的人为干扰降低,土壤稳定性提高,这也是土壤保持功能提高的主要原因之一<sup>[3,27]</sup>。黄土高原地区单位面积水源涵养量平均值由2000年的77.1 mm增长至2015年的81.5 mm,其中干旱和半干旱气候区呈上升趋势,半湿润气候区和高原气候区呈下降趋势。在半干旱气候区,林地通过吸收深层土壤水分提供树木蒸腾作用,而相当一部分林地所吸收的水分则凝结成靠近林地的降雨,从而增加降水,提高水源涵养<sup>[28]</sup>;干旱气候区水源涵养量增加的主要原因是15年间该地区降雨量增

加,植被稀疏,耗水较少<sup>[29]</sup>;在半湿润气候区,大规模的造林增加蒸散量,从而导致该区域径流量下降,水源涵养量减少<sup>[30]</sup>;高原气候区的高海拔、强蒸散量使得植被耗水增加,加上降雨量减少,共同导致该地区水源涵养量大幅度下降。另外,黄土高原4类热点区所占比例变化较小的原因可能是虽然该地区的土地利用方式变化剧烈,但其整体变化比例较小。

### 4.2 黄土高原生态系统服务的驱动因素

土地利用变化和人类活动是影响生态系统服务的关键因素<sup>[31]</sup>。2000—2015年,黄土高原单位面积NPP的平均值整体呈增加趋势,这一方面与该期间黄土高原地区的降水量呈增加态势有关,因为降水量与植被NPP存在显著的正相关关系<sup>[32]</sup>;另一方面,与植被恢复的时间关系较大,通常植被的生产力与恢复年限呈正相关,尤其是在生态恢复工程实施的早期阶段<sup>[33]</sup>。对整个黄土高原地区来说,NPP的空间分布格局由西北向东南递增,这是由降水量、气温、地形、植被覆盖方式等因子共同决定的。本研究表明,海拔较低的半湿润地区NPP相对较高,而海拔较高的干旱和半干旱气候区NPP反而较低,这是由于半湿润气候区森林覆盖度高,固碳能力强<sup>[31]</sup>,干旱和半干旱地区的土地利用类型多为未利用地和草地等固碳能力较弱的土地类型;但同样高海拔的高原气候NPP值却较高,这是由于高原气候区太阳辐射量充足,能够促进光合作用。

黄土高原地区的土壤保持量呈现“四周低,中间高”的分布态势,这与该地区坡度的分布基本吻合,表明坡度对土壤保持的影响较大,因此,在生态修复过程中,需加强坡地植被的保护。干旱气候区的土壤保持量( $0.71\sim 0.78\text{ t}/\text{hm}^2$ )极小,是由于该地植被覆盖度稀疏,荒漠化严重,应结合当地情况,种植适宜该地的梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)等植物,增强该地的土壤保持能力<sup>[34]</sup>。从2000年到2015年,黄土高原地区土壤保持量的单位面积平均值增长了101.3%,其中半干旱地区和半湿润地区增长显著,分别增加5.8,11.2  $\text{t}/\text{hm}^2$ ,而干旱气候区和高原气候区基本保持基本不变,其原因主要是半干旱和半湿润气候区植被覆盖度、降雨量在此期间呈现增长趋势,降水量主要通过影响降雨侵蚀力大小影响土壤保持功能<sup>[4,29]</sup>。

黄土高原地区水源涵养的低值主要分布在干旱气候区和高原气候区,高值主要分布在半干旱气候区和半湿润气候区。这主要是因为半干旱气候区和半湿润气候区的降雨量相对较高,2个气候区都处于低海拔区,蒸散量也较低,干旱气候区海拔低但降雨量稀少,降雨量和蒸散量是量化产水量的重要参数<sup>[35]</sup>。高原气候区产

水量较低的原因是该地区海拔高,日照充足,故蒸散量大于其他地区。值得注意的是,干旱气候区中部的产水量值较高,主要是由于该区域土地利用类型为未利用地,受到的人为干扰小,表面形成一层物理结皮,不利于水分入渗,从而形成径流,增加产水量<sup>[36]</sup>。

#### 4.3 生态系统服务权衡/协同关系的驱动因素

尺度大小的改变可能会增强、逆转或减弱生态系统服务之间的权衡/协同关系<sup>[37]</sup>。在整个黄土高原地区,土壤保持与 NPP 为协同关系,这与 Su 等<sup>[35]</sup>的研究结果一致,其原因为植被覆盖度的增加会提高固碳能力,同时也减少雨水对土壤的侵蚀,增加土壤保持能力。郝梦雅等<sup>[38]</sup>研究认为,土地利用是影响土壤保持与 NPP 呈权衡关系的主要因素;土壤保持与水源涵养之间为协同关系,可能是因为其类似的生物物理联系和土壤水文过程。在土壤保持方面,砂粒、黏粒、粉粒和有机质含量共同影响土壤的抗侵蚀能力<sup>[39]</sup>,对于产水功能,砂粒、黏粒、粉粒和有机质含量共同影响植物可利用含水率<sup>[40]</sup>;然而,由于退耕还林(草)工程实施以来植被恢复的差异,土壤保持与水源涵养之间可能存在“权衡”关系<sup>[41]</sup>。如在半干旱气候区和半湿润气候区,土壤保持与水源涵养为权衡关系。NPP 与水源涵养为“权衡”关系,主要因为 NPP 是由光合作用和植物生产力共同决定的,与太阳辐射量和植被的光利用效率有关,取决于温度和水分的限制,产水量是除蒸散和地面补给的降水部分,大量植树造林会导致水资源浪费<sup>[42]</sup>。

在不同气候区,土壤保持与水源涵养、NPP 与水源涵养之间的权衡/协同关系和黄土高原尺度的生态系统服务间的关系有所不同,表明生态系统服务之间的关系具有尺度依赖性。在干旱和半干旱气候区,NPP 和水源涵养之间为权衡关系的主要原因是干旱半干旱地区的草地具有较高的固碳能力,但该地区的降水量稀少。半湿润和半干旱气候区产水和土壤保持之间为权衡关系是由于该地区的耕地和建设用地占比较大,土质相对疏松,容易发生水土流失。总体而言,在大区域尺度上,气候(降水、气温、辐射等)、地形(海拔、坡度)和植被覆盖类型是影响生态系统服务间权衡/协同关系的主要因子;在相对小的尺度上,其主要影响因子为土地利用方式和管理措施等。

#### 4.4 展望

结合黄土高原地区土地利用现状和生态系统服务分布,为了后续黄土高原土地资源可持续利用,提出建议:(1)自退耕还林工程实施之后,黄土高原的林地面积增加较为迅速,根据黄土高原土地利用分布图,其东南部的林地占比较大,但西北部的林地很少,在后期造林过程中,应加强黄土高原西北部的植树强

度;(2)耕地应该特别加强管理,不能无节制的复垦,防止耕地出现较明显的土地退化而造成水土的进一步流失;(3)本研究发现,黄土高原地区的 NPP 与水源涵养为权衡关系(显著负相关),这是由于该地区的水资源不足,植树造林消耗水资源,所以政府部门在今后的植被恢复过程中,需优先考虑耗水较少的物种;(4)各个地区的自然环境不同,其所需要的关键生态系统服务也不同,故相关部门在指定决策时,应当结合该地区的具体条件,筛选出最有利于该地区生态和经济协调发展的生态系统服务,并加强功能区域;(5)研究期间,建筑用地的面积迅速增加。在兼顾经济发展的条件下,应当尽可能地限制建筑用地的增加以保护环境,如明确宅基地、合理规划未利用地等。

### 5 结论

2000—2015 年黄土高原地区林地面积增加 2.8%,耕地、草地和未利用地面积分别减少 2.7%,0.6% 和 1.5%;2000—2015 年黄土高原 NPP、土壤保持和水源涵养的平均值分别增加 14.1%,101.3% 和 5.6%;在黄土高原地区,NPP 与土壤保持、水源涵养与土壤保持之间为协同关系,NPP 与水源涵养之间为权衡关系;但 NPP 与水源涵养在高原气候区和半湿润气候区为协同关系,土壤保持与水源涵养在半干旱气候区和半湿润气候区为权衡关系。总体而言,在大区域尺度上,气候(降水、气温、辐射等)、地形(海拔、坡度)和植被覆盖类型是影响生态系统服务间权衡/协同关系的主要因子;在相对小的尺度上,其主要影响因子为土地利用方式和管理措施等。

#### 参考文献:

- [1] Daily G C. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington D C: Island Press, 1997.
- [2] Pan J H, Dong L L. Spatio-temporal variation in vegetation net primary productivity and its relationship with climatic factors in the Shule River basin from 2001 to 2010[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2017, 24(3): 797-818.
- [3] 傅伯杰,田汉勤,陶福禄,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):25-30.
- [4] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being[M]. Washington D C: Island Press, 2005.
- [5] Xu Q, Yang R, Zhuang D C, et al. Spatial gradient differences of ecosystem services supply and demand in the Pearl River Delta region[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 279: 12389-12400.
- [6] Daniel K W, Eliza Z, Karin H M. Estimating the joint effect of multiple soil conservation practices: A case study of smallholder farmers in the Lake Naivasha basin, Kenya[J]. Land Use Policy, 2014, 39: 177-187.

- [7] 山仑,徐炳成.新时期黄土高原退耕还林(草)有关问题探讨[J].水土保持通报,2019,39(6):295-297.
- [8] Sun X, Lu Z M, Li F, et al. Analyzing spatio-temporal changes and trade-offs to support the supply of multiple ecosystem services in Beijing, China[J]. Ecological Indicators, 2018, 94:117-129.
- [9] 孙艺杰,任志远,郝梦雅,等.黄土高原生态系统服务权衡与协同时空变化及影响因素:以延安市为例[J].生态学报,2019,39(10):3443-3454.
- [10] 刘铮,杨金贵,马理辉,等.黄土高原草地净初级生产力时空趋势及其驱动因素[J].应用生态学报,2021,32(1):113-122.
- [11] 徐晓宇,郭萍,张帆,等.政策驱动下石羊河流域生态效应变化分析[J].水土保持学报,2020,34(6):185-191.
- [12] 张琨,吕一河,傅伯杰,等.黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值[J].地理学报,2020,75(5):949-960.
- [13] 宋家鹏,陈松林.基于生态系统服务簇的福州市生态系统服务格局[J].应用生态学报,2021,32(3):1045-1053.
- [14] 包蕊,刘峰,张建平,等.基于多目标线性规划的甲积峪小流域生态系统服务权衡优化[J].生态学报,2018,38(3):812-828.
- [15] 徐彩仙,巩杰,李焱,等.基于地形梯度的甘肃白龙江流域典型生态系统服务分布特征[J].生态学报,2020,40(13):4291-4301.
- [16] 赵琪琪,李晶,刘婧雅,等.基于 SolVES 模型的关中—天水经济区生态文化服务评估[J].生态学报,2018,38(10):3673-3681.
- [17] 刘宥延,刘兴元,张博,等.黄土高原丘陵区人工灌草生态系统水土保持功能评估[J].水土保持学报,2020,34(3):84-97.
- [18] 宁佳,邵全琴.黄土高原土地利用及生态系统服务时空变化特征研究[J].农业环境科学学报,2020,39(4):774-785.
- [19] 朱文泉,潘耀忠,张锦水.中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J].植物生态学报,2007,31(3):413-424.
- [20] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss[J]. Transactions American Geophysical Union, 1958, 39(2):285-291.
- [21] Pan J H, Wei S M, Li Z. Spatiotemporal pattern of trade-offs and synergistic relationships among multiple ecosystem services in an arid inland river basin in NW China[J/OL]. Ecological Indicators, 2020, 114: 106345. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106345>.
- [22] Deng L, Liu G B, Shangguan Z P. Land use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: A synthesis[J]. Global Change Biology, 2014, 20(11):3544-3566.
- [23] Zhi G L, Zi S S, Yang J T, et al. Impact of land use/cover change on Yangtze River Delta urban agglomeration ecosystem services value: Temporal-spatial patterns and cold/hot spots ecosystem services value change brought by urbanization[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(1):123-141.
- [24] Liang J, Li S, Li X D, et al. Trade-off analyses and optimization of water-related ecosystem services (WRESSs) based on land use change in a typical agricultural watershed, southern China [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 279: 12831-12842.
- [25] 邓元杰,侯孟阳,谢怡凡,等.退耕还林还草工程对陕北地区生态系统服务价值时空演变的影响[J].生态学报,2020,40(18):6597-6612.
- [26] 史晓亮,杨志勇,王馨爽,等.黄土高原植被净初级生产力的时空变化及其与气候因子的关系[J].中国农业气象,2016,37(4):445-453.
- [27] Jiang C, Zhang L B. Ecosystem change assessment in the Three-river Headwater Region, China: Patterns, causes, and implications [J]. Ecological Engineering, 2016, 93: 24-36.
- [28] Yang S L, Bai Y, Alatalo J M, et al. Spatio-temporal changes in water-related ecosystem services provision and trade-offs with food production [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 286: 125316-125326.
- [29] Liu S N, Lei Y, Zhao J S, et al. Research on ecosystem services of water conservation and soil retention: A bibliometric analysis[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2020, 61: 194-203.
- [30] Li S, Liang W, Fu B J, et al. Vegetation changes in recent large-scale ecological restoration projects and subsequent impact on water resources in China's Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2016, 569/570: 1032-1039.
- [31] 刘洋洋,王倩,杨悦,等.黄土高原草地净初级生产力时空动态及其影响因素[J].应用生态学报,2019,30(7):2309-2319.
- [32] Jiang C, Zhang H Y, Wang X C, et al. Challenging the land degradation in China's Loess Plateau: Benefits, limitations, sustainability, and adaptive strategies of soil and water conservation[J]. Ecological Engineering, 2019, 127: 135-150.
- [33] 王蕊,姚治君,刘兆飞.西北干旱区气候和土地利用变化对水沙运移的影响:以小南川流域为例[J].应用生态学报,2018,29(9):2879-2889.
- [34] Li X, Yu X, Wu K N, et al. Land-use zoning management to protecting the Regional Key Ecosystem Services: A case study in the city belt along the Chaobai River, China [J]. Science of the Total Environment, 2021, 762: 143167.

- Functional Ecology, 2016, 30(7):1227-1238.
- [17] Schmidt M A, Kreinberg A J, Gonzalez J M, et al. Soil microbial communities respond differently to three chemically defined polyphenols [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, 72:190-197.
- [18] Kuppusamy S, Thavamani P, Megharaj M, et al. Bioremediation potential of natural polyphenol rich green wastes: A review of current research and recommendations for future directions [J]. Environmental Technology and Innovation, 2015, 4:17-28.
- [19] Hanson G J, Cook K R. Development of excess shear stress parameters for circular jet testing [C]. American Society of Agricultural and Biological Engineers, ASAE Paper No. 97-2227, St. Joseph, MI, USA, 1997:18.
- [20] Foster G R, Johnson C B, Moldenhauer W C. Hydraulics of failure of unanchored cornstalk and wheat straw mulches for erosion control [J]. 1982, 25(4):940-947.
- [21] 林琳, 张程程, 王恩姬. 稼秆长度对黑土力学特征的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(5): 128-134.
- [22] 李朝栋, 李占斌, 马建业, 等. 不同长度小麦秸秆覆盖下黄土耕地坡面流水动力学特性 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(4):153-160.
- [23] 孙昭安, 张轩, 胡正江, 等. 稼秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响 [J]. 环境科学, 2021, 42(1):459-466.
- [24] Wang J G, Feng S Y, Ni A M, et al. Soil detachment by overland flow on hillslopes with permanent gullies in the Granite area of southeast China [J/OL]. Catena, 2019, 183. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104235>.
- [25] Six J, Bossuyt H, Degryze S. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79(1):7-31.
- [26] Liu Q J, Wells R R, Dabney S M, et al. Effect of water potential and void ratio on erodibility for agricultural soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 2017, 81(3):622-632.
- [27] Li Z W, Zhang G H, Geng R, et al. Rill erodibility as influenced by soil and land use in a small watershed of the Loess Plateau, China [J]. Biosystems Engineering, 2015, 129:248-257.
- [28] Karamigolbaghi M, Ghaneeizad S M, Atkinson J F, et al. Critical assessment of jet erosion test methodologies for cohesive soil and sediment [J]. Geomorphology, 2017, 295:529-536.
- [29] Rose C W, Olley J M, Haddadchi A, et al. An alternative method for interpreting jet erosion test (JET) data: Part 1. Theory [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018, 43(3):735-742.
- [30] Haddadchi A, Rose C W, Olley J M, et al. An alternative method for interpreting JET erosion test (JET) data: Part 2. Application [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018, 43(3):743-754.

(上接第 121 页)

- [35] Su C H, Dong M, Fu B J, et al. Scale effects of sediment retention, water yield, and net primary production: A case study of the Chinese Loess Plateau [J]. Land Degradation and Development, 2020, 31(11): 1408-1421.
- [36] 戴尔阜, 王亚慧. 横断山区产水服务空间异质性及归因分析 [J]. 地理学报, 2020, 75(3):607-619.
- [37] Carlucci M B, Brancalion P H S, Rodrigues R R, et al. Functional traits and ecosystem services in ecological restoration [J]. Restoration Ecology, 2020, 28(6):1372-1383.
- [38] 郝梦雅, 任志远, 孙艺杰, 等. 关中盆地生态系统服务的权衡与协同关系动态分析 [J]. 地理研究, 2017, 36(3): 592-602.
- [39] Wen X, Zhen L. Soil erosion control practices in the Chinese Loess Plateau: A systematic review [J]. Environmental Development, 2020, 34:100493.
- [40] Hao R F, Yu D Y, Wu J G. Relationship between paired ecosystem services in the grassland and agro-pastoral transitional zone of China using the constraint line method [J]. Ecosystems and Environment, 2017, 240:171-181.
- [41] Wang J T, Peng J, Zhao M Y, et al. Significant trade-off for the impact of Grain-for-Green Programme on ecosystem services in North-western Yunnan, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, 574:57-64.
- [42] Wang C, Wang S, Fu B J, et al. Precipitation gradient determines the tradeoff between soil moisture and soil organic carbon, total nitrogen, and species richness in the Loess Plateau, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, 575:1538-1545.