

引用格式:殷小茜,孙希华,徐新良,等.我国北方农牧交错带西段退耕对土壤保持功能影响研究[J].地球信息科学学报,2018,20(12):1721-1732. [Yin X H, Sun X H, Xu X L, et al. The impact of returning farmland on the soil conservation function in the Western Section of the Farming-pastoral Ecotone of Northern China[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(12):1721-1732.] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.180341

我国北方农牧交错带西段退耕对土壤保持功能影响研究

殷小茜¹, 孙希华¹, 徐新良^{2*}, 张雪艳², 陈德超³

1. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250358; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 3. 江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009

The Impact of Returning Farmland on Soil Conservation Function in the Western Region of Farming-pastoral Ecotone of Northern China

YIN Xiaohan¹, SUN Xihua¹, XU Xinliang^{2*}, ZHANG Xueyan², CHEN Dechao³

1. School of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China; 2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information Systems, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Environmental Science and Engineering, School of Environmental Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Suzhou 215009, China

Abstract: Ecological engineering such as Grain for Green Project have significant impacts on the structure of regional land use and ecosystem service functions. Based on the RUSLE model and RS & GIS spatial analysis methods, this study assessed the impacts of returning farmland on soil conservation function in the western region of Farming-pastoral Ecotone of Northern China (FPENC) during 2000-2015. The results showed that the total area of farmland in the FPENC decreased by 1663.83 km² from 2000 to 2015, which was mainly converted into forest land, grassland and construction land. The implementation of the Grain for Green Program was the main reason for farmland decrease, and the area of farmland converted into forest and grassland accounted for 66.93% of the total area of farmland reduction. The newly added farmland was mostly converted from grassland and unused land, and mainly concentrated in the northern and central regions. Besides, the soil conservation function had improved significantly in the western region of FPENC during the past 15 years, and the amount of soil conservation increased by 56.50×10⁴t, which mainly resulted from returning farmland to forest and grassland between 2005 and 2010. In addition, the increase in soil conservation caused by ecological restoration had obvious difference in different slope grades, but the increased soil conservation generally showed decrease trend with the slope increase. Nevertheless, in some areas of slope greater than 25 degrees implemented Grain for Green Project have high benefits of soil conservation. The steep slope (slope greater than 25 degrees) area is mostly a contiguous area of extreme poverty, where is the key area implemented by a new round of Grain for Green Project and poverty alleviation projects. This study about the impact mechanism of returning farmland on

收稿日期:2018-07-26;修回日期:2018-11-07.

基金项目:中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA20010302). [**Foundation item:** The Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, No.XDA20010302.]

作者简介:殷小茜(1994-),女,山东潍坊人,硕士生,研究方向为土地利用/土地覆被变化. E-mail: syinxiaohan@163.com

*通讯作者:徐新良(1972-),男,山东青岛人,博士,研究员,博士生导师,研究方向为土地利用/土地覆被变化与陆地生态系统综合监测与评估. E-mail: xuxl@reis.ac.cn

soil conservation function in western region of FPENC will provide quantitative scientific basis for the planning and construction of regional ecological protection and restoration projects.

Key words: farming-pastoral ecotone; returning farmland; RUSLE; soil conservation function; spatio temporal characteristics

***Corresponding author:** XU Xinliang, E-mail: xuxl@lreis.ac.cn

摘要:退耕还林(草)等生态工程对区域用地结构及生态系统服务功能产生了重要影响。本研究基于RUSLE模型,并辅以遥感监测与GIS空间分析方法,对北方农牧交错带西段2000-2015年退耕状况及其引起的土壤保持功能变化分3个时段(2000-2005年、2005-2010年及2010-2015年)进行了探究。结果表明:北方农牧交错带西段地区2000-2015年耕地面积净减少1663.83 km²,以转为林地、草地、建设用地为主,其中耕地转林、草地净减少面积为1113.64 km²,草地和未利用地是新增耕地的主要来源;15年间土壤保持功能提升显著,退耕还林(草)工程的实施使土壤保持量增加了56.50×10⁴ t,2005-2010年由退耕所带来的土壤保持增加量在3段时期中最高;不同坡度等级的生态退耕引起的土壤保持增加量差别较大,总体随着坡度升高呈下降趋势,但在25°以上的陡坡耕地由退耕还林(草)带来的土壤保持效益又有所升高。研究对于评估北方农牧交错带西段地区实施退耕还林(草)等工程的生态效益具有重要意义,并能为区域生态保护与修复工程的建设规划提供科学依据。

关键词:北方农牧交错带西段;退耕;RUSLE;土壤保持功能;时空特征

1 引言

北方农牧交错带是中国东部农耕区与西部草原牧区相连接的半干旱生态过渡带,是遏止荒漠化、沙化向中东部地区扩展的重要生态安全屏障,生态系统服务功能以水源涵养、土壤保持、生物多样性保护为主^[1-2]。近年来,由于农牧结构失衡、持续超载过牧、水资源过度开发等,导致区域内植被盖度下降、草地退化沙化严重,生态系统服务功能大幅度减弱,区域生态功能与环境现状极不匹配^[3]。中国自1999年实施土地休耕/再造林地计划——退耕还林(草)工程(Grain for Green Project, GGP)以来^[4],北方农牧交错带地区对不宜耕种的农田进行了科学有序的退耕。随着生态退耕实施的深入,区域内土地利用结构发生了重大变化,从而对包括生态系统功能在内的生态系统功能产生了显著影响^[5-6],诸多学者也对典型地区GGP实施后的生态恢复和重建状况展开了研究^[7-10]。

目前,已有研究主要集中在退耕还林(草)对区域内LUCC、景观格局、植被覆盖度以及土壤侵蚀状况等方面的影响。在对LUCC影响研究中,周德成等^[11]对科尔沁左翼后旗研究发现,耕地面积的减少与草地面积的增多是区域内LUCC及景观格局动态变化的典型特征,退耕还林(草)工程对景观结构恢复起着积极作用;而杨卓等^[12]等对退耕前后包含科尔沁左翼后旗的典型北方农牧交错区LUCC过程的研究表明,区域内耕地和草地面积都大幅度减少,而未利用地显著增加。在植被盖度变化方面,

汪芳甜等^[13]对内蒙古武川县GGP实施后生态成效监测发现,虽整体水平上植被覆盖度增加,但程度不明显;范建忠等^[14]估算了2000-2010年陕西省重点生态建设工程区的植被覆盖度,结果显示陕北退耕还林工程区植被覆盖度显著增加。在土壤侵蚀状况方面,梁占岐等^[15]对陕西省安塞县1999-2010年土壤侵蚀变化评价结果表明侵蚀强度虽总体减小,但部分地区原耕地转化为林草地后出现的裸露斑块加剧了土壤侵蚀;汪邦稳等^[16]发现包括安塞县在内的陕北延河流域退耕后,植被覆盖度的增加使土壤侵蚀量明显减少。上述研究表明,不同学者对于GGP生态成效研究结果差异较大,长期以来生态退耕的建设成效还存在一些异议。此外,已开展的土地利用变化监测,多是同时进行各种地类的光谱或几何形态变化特征监测,耕地的时空变化过程以及生态退耕的环境影响难以准确体现。故进一步科学监测与评估GGP过程中的生态系统服务功能变化,是反映GGP等生态工程实施效果的重要环节。

土壤保持功能定量地反映了人类采取各种措施对生态系统进行调节的综合效用^[17]。关于土壤保持功能的研究方法^[18-20]大致可分为2种:①基于统计数据的价值量估算,其对统计数据依赖较强,难以反映空间特征;②基于GIS和遥感的土壤侵蚀模型估算,其有效地解决了土壤侵蚀的空间异质性问题,其中修正通用土壤流失方程(RUSLE)是目前应用最广泛的土壤流失遥感定量模型之一。因此,本研究以RUSLE模型为基础,结合遥感

辅助监测与GIS分析方法,对位于黄土高原北部的北方农牧交错带西段地区开展2000–2015年的退耕状况监测及其对生态系统土壤保持功能的影响评价,旨在为该区域生态系统重建和可持续发展提供决策依据。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

本研究选取了位于黄土高原西北部的北方农牧交错带西段,地理位置介于 $36^{\circ}01' \sim 41^{\circ}50' \text{N}$, $106^{\circ}21' \sim 114^{\circ}25' \text{E}$,行政区域包括宁夏、甘肃、陕西、山西、内蒙古5个省(自治区)的42个县(旗、市、区)(图1),约17.78万 km^2 ,分别占北方农牧交错带和黄土高原总面积的26.29%和27.78%。该区属于温带干旱、半干旱气候,年均气温 $5 \sim 13^{\circ}\text{C}$,年均降水量200~550 mm,年均干燥度为1.7。地貌类型以黄土塬、梁、峁为主,沟壑众多,地面起伏较大,海拔变化于729~2723 m之间^[21]。全区植被类型从西南向东北呈带状分布,依次为温带灌木荒漠植被带、温带丛生典型草原植被带、温带落叶灌丛带、温带落叶阔叶林带。

该区土壤侵蚀以水力侵蚀和风力侵蚀为主,侵蚀模数为1000~1500 $\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$,中东部和西南部侵蚀强度较高^[21],是黄河中上游水土保持和退耕还林(草)工程的重点防治和实施区域。自2000年开展退耕还林(草)工程试点以来,截至2015年底区域内共完成退耕还林(草)面积83.93万 hm^2 ,取得了显著

的生态成效。在2015年土地利用结构中,草地面积最多,为8.79万 km^2 ,占区域总面积的49.44%,其次是耕地,占比为25.20%,林地面积小于未利用地面积,排名第四,占比为7.87%。区域内耕地主要分布在东北部的中海拔平原和小起伏中山区,以及中东部的中海拔丘陵和西南部的中海拔台地。中西部的鄂托克旗、乌审旗、鄂托克前旗多山地、梁地和沙地,耕地较少且分布分散。

2.2 数据源

本研究所使用的数据主要包括气象数据、土壤数据、数字高程模型(DEM)、MODIS数据、土地利用数据等。

气象数据为研究区内及其周边地区的58个国家气象站观测记录的2000–2015年降雨量日值数据^[22],来自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。在此基础上应用澳大利亚ANUSPLIN插值软件中的样条插值法进行空间插值,获得研究区日降水量的栅格数据,以用于模型中降水侵蚀力(R)因子计算。

土壤质地数据和土壤类型数据分别来自《中国土种志》^[23]和中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)^[24],用于土壤可蚀性(K)因子计算。DEM数据使用的是地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)的30 m分辨率数字高程数据产品(GDEM-DEM数据产品)^[25],基于DEM数据计算坡长、坡度(L, S)因子,并根据研究区地形将坡度分为6级,分别是: $<5^{\circ}$, $5 \sim 10^{\circ}$, $10 \sim 15^{\circ}$, $15 \sim 20^{\circ}$, $20 \sim 25^{\circ}$,

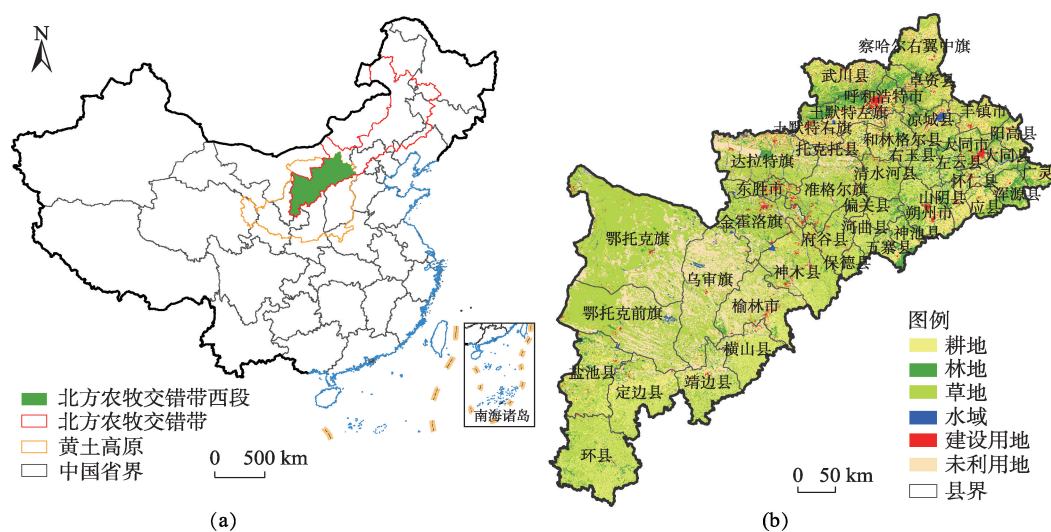


图1 北方农牧交错带西段地理位置及行政区划图

Fig. 1 The location of the western section of the farming-pastoral ecotone of Northern China and its administrative map

>25°,以辅助进行不同坡度等级下的土壤保持功能时空变化分析。

使用的MODIS数据来源于美国LPDAAC (Land process Distributed Active Archive Center) 提供的16 d最大合成植被指数MOD13Q1数据^[26],空间分辨率为250 m,时间跨度为2000–2015年,并利用MRT (MODIS ReProjection Tools) 和ENVI软件进行了数据格式和投影转换、数据拼接、裁剪等预处理工作,最后利用最大值合成法生成了年最大NDVI数据,以用于植被覆盖(C)因子计算。

土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心的1:10万土地利用数据库^[27–28],该数据库是基于Landsat长时间序列遥感影像通过人机交互目视解译生成。该土地利用数据包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6个一级类型以及25个二级类型,根据大量随机样本验证分析,全国土地利用一级类型的解译精度在94.3%以上,二级类型精度也在91.2%以上,是目前进行中国土地利用研究最可靠的数据集。本研究选取了研究区2000、2005、2010和2015年共4期土地利用数据,并结合坡度数据对水土保持措施(P)因子赋值,进而对土壤保持量进行计算。

2.3 研究方法

本研究选取修正的通用土壤流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)来进行土壤保持量估算。RUSLE模型是估算土壤侵蚀量与保持量的最佳模型之一,国内外研究者利用RUSLE模型进行大区域土壤侵蚀模拟都取得了较好的效果^[29–32]。

土壤保持量估算模型如下:

$$A_c = A_p - A_r = R \times K \times L \times S \times (1 - C \times P) \quad (1)$$

式中: A_c 为单位面积土壤保持量/ $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$, A_p 为单位面积潜在土壤侵蚀量/ $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,潜在土壤侵蚀量为生态系统在没有植被覆盖和任何水土保持措施情况下的土壤侵蚀量,即 $C=1$, $P=1$; A_r 为单位面积实际土壤侵蚀量/ $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,是考虑了植被覆盖和水土保持措施下的土壤侵蚀量; R 为降水侵蚀力因子/ $MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$; K 为土壤可蚀性因子/ $t \cdot hm^2 \cdot h \cdot hm^{-2} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$; L 、 S 为坡长、坡度因子, C 为植被覆盖因子, P 为水土保持措施; L 、 S 、 C 、 P 均无量纲。

2.3.1 R-降水侵蚀力因子

降水量对土壤侵蚀作用显著,在黄土高原地区

日降雨量超过12 mm则称为侵蚀性降雨^[33–34],采用半月降雨侵蚀力模型进行R因子计算,公式如下:

$$M_i = \alpha \sum_{j=1}^k (D_j)^\beta \quad (2)$$

式中: M_i 为第*i*个半月的降雨侵蚀力值/ $MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$; D_j 是半月内第*j*天降雨量,这里的降雨量为侵蚀性降雨的降雨量(要求 $D_j \geq 12$ mm,否则计为0); k 是研究期内半月时段数,每个月前15 d视为一个半月时段,剩下的为另一个半月,全年分为24个时段; α 、 β 是模型待定参数:

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (3)$$

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (4)$$

式中: P_{d12} 表示日雨量 ≥ 12 mm的日平均降雨量; P_{y12} 表示日雨量 ≥ 12 mm的年均降雨量。

2.3.2 K-土壤可蚀性因子

土壤可蚀性表征土壤对侵蚀力的敏感性,采用Williams等^[35]建立的EPIC侵蚀-生产力影响模型,基于土壤有机碳和粒径组成估算:

$$K = [0.2 + 0.3e^{-0.0256SAN(1 - \frac{SIL}{100})}] \times \left(\frac{SIL}{CLA + SIL} \right)^{0.3} \times \left(1.0 - \frac{0.25OC}{OC + e^{3.72 - 2.95OC}} \right) \times \left(1.0 - \frac{0.7SNI}{SNI + e^{-5.51 + 22.9SNI}} \right) \times 0.1317 \quad (5)$$

式中: SAN 、 SIL 、 CLA 分别为美制土壤粒级分类标准中的砂粒、粉粒、和黏粒含量(%); $SNI=1-SAN/100$; OC 为土壤有机碳含量(%),有机碳含量可由有机质含量转换而来: $OC=OM/1.724$, OM 为土壤有机质含量。结合北方农牧交错带西段1:10万土壤类型分布图,得到以土属为基本单元的土壤可蚀性K值空间分布数据。

2.3.3 L、S-坡长、坡度因子

地形是影响土壤侵蚀的重要因素,坡度坡长是影响坡面径流与水流产沙过程的重要地貌因子,可通过DEM提取。本研究坡长坡度因子算法建立在国内外已有研究成果基础上^[36–38],坡长因子的计算采用Wischmeier提出的坡长因子计算公式:

$$L = (\lambda/22.13)^\alpha \quad (6)$$

$$\alpha = \beta/(\beta + 1) \quad (7)$$

$$\beta = (\sin \theta/0.0896)/[3.0(\sin \theta)^{0.8} + 0.56] \quad (8)$$

式中: λ 为坡长/m,利用流向计算水平距离再除以 $\cos \theta$ 得到; α 为坡长指数;22.13为标准小区的坡长/m; θ 为利用DEM提取的坡度。

S 因子的计算公式建立在 McCool 等^[36]以及刘宝元等^[34]研究的算法基础上,如式(9)所示。

$$S = \begin{cases} 10.8 \times \sin(\theta) + 0.03, & \theta < 5 \\ 16.8 \times \sin(\theta) - 0.5, & 5 \leq \theta \leq 10 \\ 21.91 \times \sin(\theta) - 0.96, & \theta > 10 \end{cases} \quad (9)$$

2.3.4 C-植被覆盖因子

土壤侵蚀与植被覆盖度有紧密联系,是RUSLE中的一个关键性因子,为无量纲数,其值介于0~1之间。本研究拟采用蔡崇法等^[39]提出的基于归一化植被指数NDVI进行提取计算,得到植被覆盖度后计算*C*值:

$$C = \begin{cases} 1, & f = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \lg f, & 0 < f \leq 0.783 \\ 0, & f \geq 0.783 \end{cases} \quad (10)$$

*f*为植被覆盖度,计算公式为:

$$f = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (11)$$

式中:*NDVI*_{min}、*NDVI*_{max}分别为研究区*NDVI*的最小值和最大值。

2.3.5 P-水土保持措施因子

水土保持措施因子(*P*)定义为采用水土保持措施后的土壤流失量与顺坡种植时土壤流失量的比值,取值在0~1之间,通常的水土保持措施主要有等高耕作、修梯田、建淤地坝等模式。由于没有设置小区实验,基于遥感的方法在整个研究尺度上也难以实现,本研究中的*P*因子主要根据黄河流域长期的耕作习惯和不同坡度下等高耕作减少的土壤流失量以及相关研究^[40-43]进行取值。以北方农牧交错带西段土地利用图为基础,结合高程、坡度等地形特征以及生态退耕政策,将未采取水土保持措施的林地、草地和未利用土地的*P*因子取值为1,水域、建设用地取值为0,耕地按照坡度进行*P*因子赋值(表1)。

表1 不同坡度条件下的耕地*P*因子值

Tab. 1 P-factor value of farmland under different slope

conditions						
坡度范围	<5°	5~10°	10~15°	15~20°	20~25°	>25°
P值	0.100	0.221	0.305	0.575	0.705	0.800

3 结果与分析

3.1 耕地变化时空特征

自国家部署实施大规模的退耕还林(草)工程后,坡耕地以及不适宜耕种的耕地恢复为林草地。在退耕还林(草)等生态保护工程以及城镇化建设的影响下,2000~2015年,北方农牧交错带西段地区耕地面积呈不断减少趋势,15年间耕地面积净减少1663.83 km²,占2000年耕地总面积的3.6%(表2)。耕地转林地最多,其次是耕地转建设用地和耕地转草地,分别导致耕地面积净减少743.50、595.68和370.13 km²,由耕地转林、草地净减少的面积占耕地净减少总面积的66.93%,由此可见,退耕还林(草)是此时期内耕地减少的主导方式(表2)。从空间上看,耕地转出较为明显的斑块主要集中在区域内东北部和西南部的台地、丘陵地带,同时也是退耕还林(草)工程实施的主要区域(图2(a))。

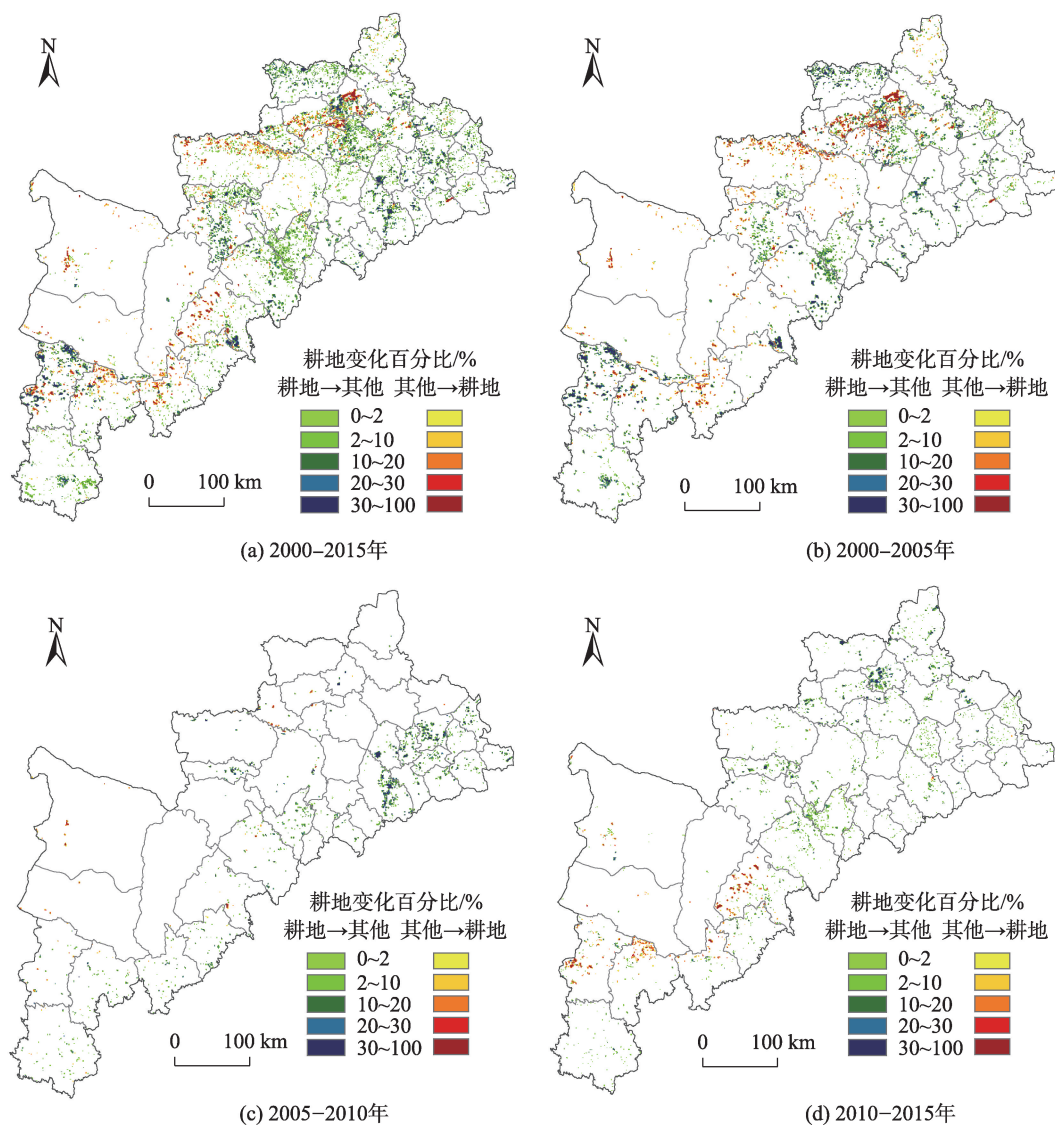
2000~2005年是北方农牧交错带西段地区退耕还林(草)工程实施的重点时期,退耕现象最为明显。5年间耕地面积净减少1070.31 km²,占2000年耕地总面积的2.31%,耕地转林、草地是耕地净减少的主导转换方式,分别导致耕地净减少451.83 km²和444.75 km²,其次是耕地转建设用地,导致耕地面积减少166.84 km²(表2)。期间,耕地与水域间的双向转换是耕地净增加的唯一途径。退耕区域要集

表2 2000~2015年北方农牧交错带西段耕地变化面积及占比

Tab. 2 The changeable area and its proportion of farmland in western section of the farming-pastoral ecotone of Northern China from 2000 to 2015

类型转换	2000~2005年		2005~2010年		2010~2015年		2000~2015年	
	面积/km ²	占耕地比例/%	面积/km ²	占耕地比例/%	面积/km ²	占耕地比例/%	面积/km ²	占耕地比例/%
耕地⇌林地	-451.83	-0.98	-269.45	-0.60	-22.21	-0.05	-743.50	-1.61
耕地⇌草地	-444.75	-0.96	-34.64	-0.08	109.25	0.24	-370.13	-0.80
耕地⇌水域	23.17	0.05	-1.77	0.00	-34.51	-0.08	-13.11	-0.03
耕地⇌建设用地	-166.82	-0.36	-49.08	-0.11	-379.78	-0.85	-595.68	-1.29
耕地⇌未利用地	-30.08	-0.07	14.34	0.03	74.33	0.17	58.59	0.13
耕地增减合计	-1070.31	-2.31	-340.60	-0.75	-252.91	-0.56	-1663.83	-3.60

注: 面积和比例数值为正,表示耕地净增加;数值为负,表示耕地净减少;比例表示耕地净变化面积占各时段基期耕地总面积的比例



注:图例中百分比表示1 km²栅格内耕地增加或减少面积的比例,空白区表示耕地未出现变化

图2 2000-2015年北方农牧交错带西段耕地变化图

Fig. 2 The change of farmland in the western section of the farming-pastoral ecotone of Northern China from 2000 to 2015

中在东北部的武川县、和林格尔县以及中部的伊金霍洛旗、府谷县,西南部的盐池县。新增耕地主要分布在东北部的呼和浩特市、土默特左旗、达拉特旗和南部的靖边县(图2(b))。

2005-2010年北方农牧交错带西段耕地净减少340.60 km²,占2005年耕地总面积的0.75%,耕地变化程度相较前期明显减小(表2)。耕地转林地是耕地减少的主要原因,导致耕地净减少269.45 km²,占2005年耕地总面积的0.6%,其次是耕地转建设用地,导致耕地净减少49.08 km²(表2)。虽然耕地与草地间的双向转化导致耕地净减少量相对前5年有大幅度减少,但依然是此时期内耕地转出的主要方向之一。耕地与未利用地之间的双向转换是

耕地净增加的唯一途径。退耕区域主要分布在东部的大同市、左云县和朔州市的台地、丘陵地带。新增耕地面积较小且分布分散,较为明显的区域主要是达拉特旗、土默特右旗和准格尔旗三旗的交界地带(图2(c))。

2010年以后,北方农牧交错带西段退耕还林(草)工程指标已基本完成,所以2010-2015年耕地变化程度均小于前两段时期,5年内耕地净减少252.91 km²,占2010年耕地总面积的0.56%(表2)。城镇扩张代替退耕还林(草)工程成为此时期内耕地减少的主导方式,耕地转建设用地导致耕地净减少379.78 km²,占2010年耕地总面积的0.85%(表2)。草地和未利用地是新增耕地的主要来源,分别使耕

地净增加 109.25 km²和 74.33 km²(表 2)。东北部的呼和浩特市和中部的东胜市、府谷县是耕地转出的主要区域,新增耕地主要分布在中部的榆林市和西南部的盐池县、定边县(图 2(d))。

3.2 退耕对土壤保持功能的影响

随着退耕还林(草)工程的实施,北方农牧交错带西段地区不宜耕种的坡耕地相继退耕,土壤保持功能也随之显著增强。2000–2015 年,区域内平均单位面积土壤保持量从 10.19 t/hm² 上升到 20.50 t/hm²,土壤保持能力提升显著。退耕区域 2015 年土壤保持量较退耕前净增加 54.50×10⁴ t,其中,退耕还林(草)使得土壤保持量净增加 56.50×10⁴ t,占退耕还林(草)区域 2000 年土壤保持总量的 55.15%,退耕还林(草)在区域内体现了较高的土壤保持效益(表 3)。大部分县(市、区、旗)土壤保持功能呈增长趋势,中东部内蒙古自治区的东胜市、准格尔旗和山西省的河曲县、五寨县以及西南部的靖边县、定边县和环县单位面积土壤保持功能增幅在 10 t/hm² 以上。土壤保持功能呈下降趋势的面积较小,且分布相对集中,主要是东北部内蒙古自治区的察哈尔右中旗、卓资县和丰镇市,以及山西省的右玉县、浑源县和广灵县下降趋势较为明显,降幅在 5 t/hm² 以上(图 3(a))。

2000–2005 年,北方农牧交错带西段退耕区域土壤保持量较退耕前增加了 22.58×10⁴ t,占 2000 年退耕区域土壤保持总量的 19.22%(表 3)。从耕地转出的类型看,耕地转林、草地均使土壤保持量增加,其中耕地转林地的区域内土壤保持增加量最高,使土壤保持量增加了 21.42×10⁴ t,占该区域退耕前土壤保持量的 52.56%(表 3)。此段时期内耕地转为未利用地区域整体上使土壤保持量出现了减

少现象,说明区域内由耕地弃耕、撂荒而形成的未利用地在该时期内由于疏于管理导致了土壤保持功能有所下降^[44](图 3(b))。

2005–2010 年,北方农牧交错带西段退耕区域土壤保持量较退耕前增加了 30.94×10⁴ t,占 2005 年退耕区域土壤保持总量的 57.53%(表 3)。从退耕转类角度看,耕地转为林地仍然占土壤保持增加量的比重最高,使土壤保持量增加了 21.57×10⁴ t,占该区域退耕前土壤保持量的 61.24%,其次是耕地转草地使土壤保持量增加 9.67×10⁴ t,占该区域退耕前土壤保持量的 53.60%(表 3)。与前 5 年相比,虽然区域内退耕还林还草的面积有明显减少,但此时期内退耕区土壤保持增加量却大于前 5 年退耕区的增加量,究其原因主要是后期退耕以耕地转林地为主,林地本身固土能力要强于耕地和草地,且在前期退耕还林(草)经验指导下,此段时期内已经形成了以灌木为主,乔木、草本为辅的区域最适退耕还林(草)模式,不仅达到了较好的水土保持效果而且带来了可观的经济效益。此外,耕地转未利用地也成为土壤保持量增加的来源,说明此时期内的退耕区域注重了对撂荒耕地的防侵蚀管理(图 3(c))。

2010–2015 年,退耕区土壤保持量较退耕前增加了 9800 t,占 2010 年退耕区土壤保持总量的 6.47%(表 3)。此段时期内第一阶段退耕还林(草)已基本结束,新一轮工程尚未全面启动,耕地减少的主要原因是城镇发展建设对耕地的侵占,由退耕还林(草)带来的土壤保持增加量较小,耕地转为水域是造成区域内土壤保持量下降的主要原因,减少的土壤保持量占退耕前土壤保持量的 48.46%。但此时期内耕地转未利用地增加的土壤保持量均高于前两段时期,说明区域内对撂荒耕地的土壤保持管理措施实施成效较好(图 3(d))。

表 3 2000–2015 年北方农牧交错带西段退耕区的土壤保持变化量及占比

Tab. 3 Variation of soil conservation degree and its proportion in returning farmland in the western section of the farming-pastoral ecotone of Northern China from 2000 to 2015

耕地转出类型	2000–2005 年		2005–2010 年		2010–2015 年		2000–2015 年	
	土壤保持 变化量/10 ⁴ t	比例/%	土壤保持 变化量/10 ⁴ t	比例/%	土壤保持 变化量/10 ⁴ t	比例/%	土壤保持 变化量/10 ⁴ t	比例/%
耕地→林地	21.42	52.56	21.57	61.24	0.44	25.73	43.43	55.91
耕地→草地	1.43	1.91	9.67	53.60	1.97	21.09	13.07	12.76
耕地→水域	-0.14	-29.79	-0.39	-86.67	-1.57	-48.46	-2.10	-50.48
耕地→未利用地	-0.13	-10.83	0.09	128.57	0.14	16.28	0.10	4.69
总计	22.58	19.22	30.94	57.53	0.98	6.47	54.50	29.24

注:比例表示发生退耕的农田的土壤保持变化量与退耕前的土壤保持量相比

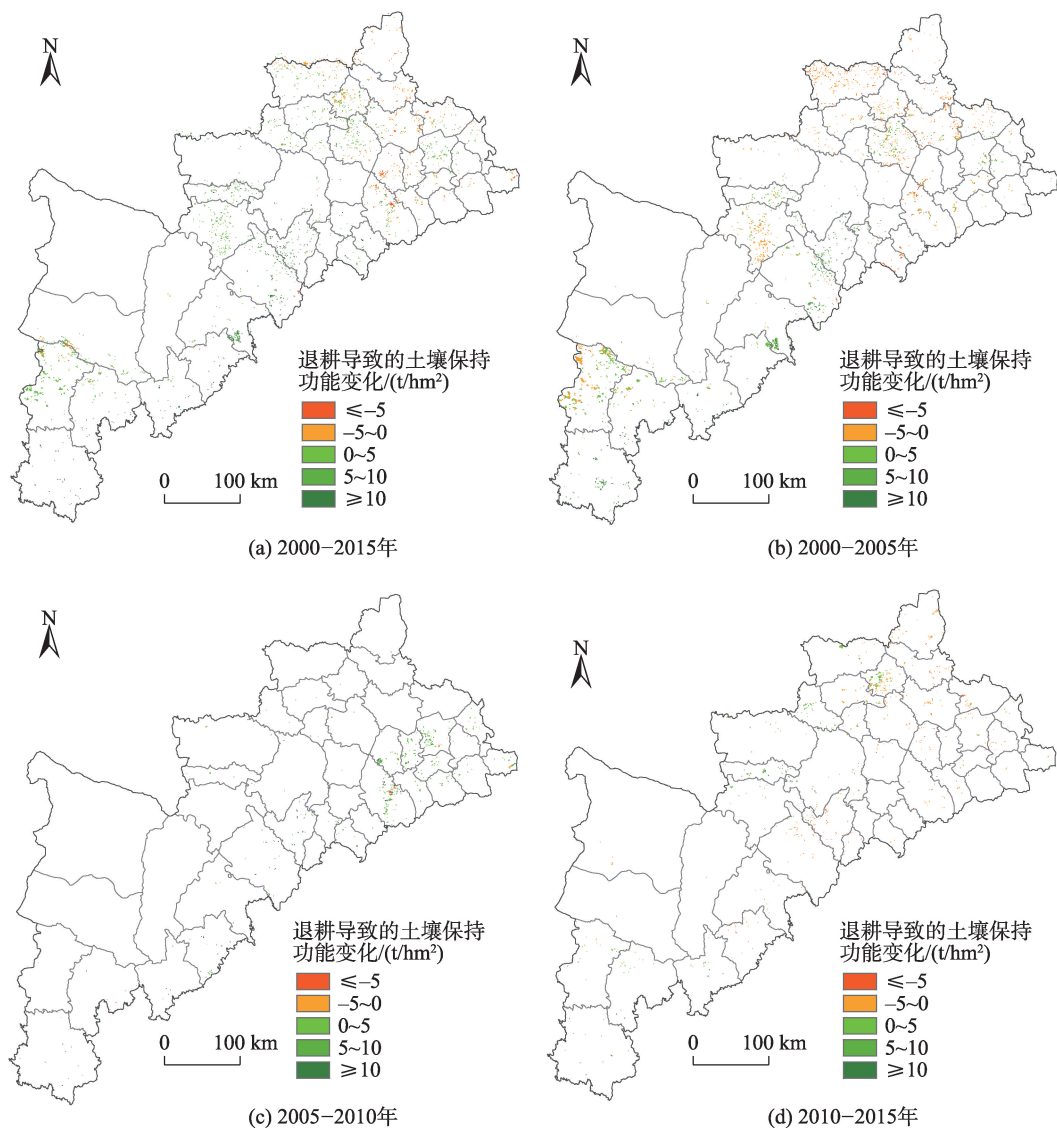


图3 2000-2015年北方农牧交错带西段退耕导致的土壤保持功能变化

Fig. 3 The changes of soil conservation function caused by the returning farmland in the western section of the farming-pastoral ecotone of Northern China from 2000 to 2015

3.3 不同坡度等级下生态退耕对土壤保持功能的影响

为进一步探讨坡耕地退耕还林(草)对提升区域土壤保持功能的贡献,将北方农牧交错带西段坡度等级数据与耕地转林、草地区域土壤保持量数据进行叠加,分析2000-2015年不同坡度条件下退耕还林(草)对土壤保持功能的影响,同时有助于对生态退耕的合理性进行评价。

2000-2015年,北方农牧交错带西段地区不同坡度等级内退耕还林(草)面积占比差别较小,但由生态退耕引起的土壤保持量变化却差别明显,总体来看,随着坡度升高,土壤保持增加量及其占比呈

现下降趋势。坡度小于5°的区域是退耕还林(草)的主要区域,由生态退耕带来的土壤保持效益最高,退耕区域土壤保持增加量占2000年该区域土壤保持总量的15.85%(表4)。在5°以上的坡耕地中,5~10°区域由生态退耕带来的土壤保持量增加最多,土壤保持量增加了 5.15×10^4 t,增加量占该退耕区2000年土壤保持总量比例为10.01%;坡度为10~15°的区域内退耕还林(草)面积占比最小,但其退耕区土壤保持增加量在坡耕地中仅次于5~10°区域内的增加量,增加量占比为8.11%,退耕还林(草)面积比例虽小,但土壤保持效益较高;20~25°区域退耕还林(草)面积占比在坡耕地中位居第二,但土

表4 2000–2015年不同坡度退耕还林(草)面积及其引起的土壤保持量变化

Tab. 4 The area of GGP and the variation of soil conservation degree in different slope from 2000 to 2015

坡度/ $^{\circ}$	各坡度等级面积/ km^2	退耕还林(草)		土壤保持量	
		面积/ km^2	占比/%	变化/ 10^4t	占比/%
<5	91 670.36	1136.94	1.24	11.35	15.85
5~10	49 072.63	515.92	1.05	5.15	10.01
10~15	19 279.02	180.65	0.94	1.80	8.11
15~20	8554.33	90.61	1.06	0.90	7.30
20~25	4327.15	51.02	1.18	0.51	7.10
>25	4977.66	63.63	1.28	0.63	7.99

注:退耕还林(草)占比表示各坡度等级下退耕还林(草)面积占相应坡度等级面积的比例,土壤保持量变化占比表示退耕还林(草)斑块上土壤保持变化量占2000年该斑块上土壤保持量的比例

壤保持增加量及占比均为最低,生态退耕对土壤保持功能的提升作用不明显;25°以上的陡坡耕地退耕还林(草)面积占比最大,从土壤保持增加量占比来看,该区域由生态退耕带来的土壤保持效益要高于坡度15~20°以及20~25°的区域(表4)。究其原因主要是15~25°坡耕地是重要水源地,生态工程实施力度较小,而25°以上陡坡耕地集中区域大多是连片特困地区,是退耕还林(草)工程重点推进与资金扶持区域,生态建设成效较高,也是新一轮退耕还林(草)工程与扶贫项目相结合的重点组织实施区域。

4 结论与讨论

本研究对2000–2015年北方农牧交错带西段实施退耕还林(草)工程以来耕地变化特征以及退耕对生态系统土壤保持功能的影响进行了定量分析与评估,并进一步揭示了不同坡度水平内的生态退耕对土壤保持功能的影响,得到主要结论为:

(1)自退耕还林(草)工程实施后,北方农牧交错带西段地区2000–2015年耕地面积净减少1663.83 km^2 ,前期(2000–2010年)是退耕还林(草)的主要时期,耕地转为林、草地是耕地净减少主导方式,后期(2010–2015年)减少的耕地以转为建设用地为主。15年内发生退耕的区域由东北部和西南部逐渐向东部和中部地区迁移,主要集中在台地、丘陵地带;耕地增加的区域主要集中在北部和中部地区,新增耕地主要来源于草地和未利用地。

(2)北方农牧交错带西段地区15年内平均单位面积土壤保持量上升了两倍多,土壤保持功能提升显著。2000–2015年,退耕还林(草)区域土壤保持

总量较退耕前净增加 $56.50\times 10^4\text{t}$,退耕还林(草)工程实施的土壤保持效益较好,其中耕地转林地使土壤保持量增加最为明显。在注重撂荒耕地的土壤保持管理后,耕地转为未利用地总体增加了土壤保持量。耕地转为水域使土壤保持量持续减少,增加了区域内的土壤侵蚀。2005–2010年退耕面积虽然不大,但退耕带来的土壤保持效益较高,退耕所增加的土壤保持量在3段时期中最多。2010–2015年因为耕地主要转为建设用地,退耕还林(草)面积较小,由退耕带来的土壤保持效益并不明显。

(3)不同坡度等级的退耕还林(草)引起的土壤保持量变化差别较为明显。小于5°的坡度范围内的生态退耕增加的土壤保持量最多,20~25°的坡度区域增加量最少,总体上土壤保持增加量随着坡度升高呈现下降趋势。但从土壤保持增加量占比看,25°以上的陡坡耕地生态退耕后的土壤保持效益要高于坡度15~20°以及20~25°的区域,陡坡耕生态工程实施的政策扶持力度较高,也是新一轮工程实施的重点区域。

本研究围绕北方农牧交错带西段耕地变化特征以及退耕的土壤保持功能效应展开研究,研究中还存在以下不足:在计算RUSLE模型中降雨侵蚀力因子 R 时,仅基于日降雨量进行了计算,未与基于日10 min最大雨强资料计算的降雨侵蚀力进行验证,是今后工作中应弥补的不足;研究区内土壤侵蚀受水力侵蚀和风力侵蚀共同作用,本研究仅探讨了区域内水力侵蚀影响下的土壤保持特征和变化,风蚀影响的研究是今后研究工作的重点;此外,研究只探讨了退耕对土壤保持服务功能的影响,退耕对区域内生态系统其它服务功能的影响也是今后研究的重要方向。

参考文献(References):

- [1] Crossman N D, Burkhard B, Nedkov S. Quantifying and mapping ecosystem services[J]. *International Journal of Biodiversity Science*, 2012,8(1):1-4.
- [2] 刘慧,潘志华,周蒙蒙,等.北方农牧交错带不同退耕方式对生态健康的影响——以武川县为例[J]. *干旱地区农业研究*, 2010,28(1):175-192. [Liu H, Pan Z H, Zhou M M, et al. Influence of different ways of returning farmland on ecosystem health in the Northern Agro-grazing Ecotone: A case study of Wuchuan County[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010,28(1):175-192.]
- [3] 蒋卫国,陈云浩,李京,等.中国北方农牧交错带生态环境的空间格局演变[J]. *自然资源学报*, 2005,20(6):871-878. [Jiang W G, Chen Y H, Li J, et al. Change and spatial pattern of eco-environment in the Farming-pastoral Ecotone of the Northern China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005,20(6):871-878.]
- [4] 薛亚永,王晓峰.黄土高原森林草原区退耕还林还草土壤保持效应评估[J]. *干旱地区农业研究*, 2017(5):122-128. [Xue Y Y, Wang X F. Evaluation on soil conservation effect of returning cropland to forest and grassland in forest-steppe zone of Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017(5):122-128.]
- [5] 谷长磊,刘琳,邱扬,等.黄土丘陵区生态退耕对草本层植物多样性的影响[J]. *水土保持研究*, 2013,20(5):99-103. [Gu C L, Liu L, Qiu Y, et al. Effects of ecological restoration on species diversity of herb layer in the Hilly-gullied Area of Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013,20(5):99-103.]
- [6] Bennett M T. China's sloping land conversion program: Institutional innovation or business as usual?[J]. *Ecological Economics*, 2008,65(4):699-711.
- [7] 田宁宁,张建军,李玉婷,等.晋西黄土区退耕还林地涵养水源和保育土壤功能评价[J]. *水土保持学报*, 2015,29(5):124-129. [Tian N N, Zhang J J, Li Y T, et al. Functional assessment of soil and water conservation under conversion of cropland to forest in Loess Plateau of Western Shanxi Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015,29(5):124-129.]
- [8] 杨波,王全九,董莉丽.榆林市还林还草后土壤保持功能和经济价值评价[J]. *干旱区研究*, 2017,34(6):1313-1322. [Yang B, Wang Q J, Dong L L. Assessment of soil conservation function and economic value in Yulin City after implementing the Project of "Grain for Green" [J]. *Arid Zone Research*, 2017,34(6):1313-1322.]
- [9] 李柏延,任志远,易浪. 2001-2010年榆林市土壤侵蚀动态变化趋势[J]. *干旱区研究*, 2015,32(5):918-925. [Li B Y, Ren Z Y, Yi L. Study on changing trend of soil erosion in Yulin City from 2001 to 2010[J]. *Arid Zone Research*, 2015,32(5):918-925.]
- [10] 杨波,王全九.退耕还林后榆林市土壤侵蚀和养分流失功效研究[J]. *水土保持学报*, 2016,30(4):57-63. [Yang B, Wang Q J. Research on soil erosion and nutrient loss in Yulin City after afforestation[J]. *Soil and Water Conservation*, 2016,30(4):57-63.]
- [11] 周德成,赵淑清,朱超.退耕还林还草工程对中国北方农牧交错区土地利用/覆被变化的影响——以科尔沁左翼后旗为例[J]. *地理科学*, 2012,32(4):442-449. [Zhou D C, Zhao S Q, Zhu C. The impact of the Grain for Green Project on the land use/cover change in the Northern Farming-pastoral Ecotone, China: A case study of Kezuohe County [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012,32(4):442-449.]
- [12] 杨卓,李全,魏斌,等.典型东北农牧交错区土地利用/覆被变化分析[J]. *水土保持研究*, 2010,17(4):212-216. [Yang Z, Li Q, Wei B, et al. Analysis of land use/cover changes of typical Agro-pasture Zigzag Zone in Northeast China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010,17(4):212-216.]
- [13] 汪芳甜,安萍莉,蔡璐佳,等.基于RS与GIS的内蒙古武川县退耕还林生态成效监测[J]. *农业工程学报*, 2015,31(11):269-277. [Wang F T, An P L, Cai L J, et al. Monitoring effects of ecosystem restructuring project for returning grain plots to forestry in Wuchuan county of Inner Mongolia based on RS and GIS[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015,31(11):269-277.]
- [14] 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 J Z, Li D K, Dong J F. Remote sensing analysis of vegetation restoration in key ecological construction areas of Shaanxi province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012,28(7):228-234.]
- [15] 梁占岐,李锦荣,郭建英,等.退耕还林工程建设对土壤侵蚀的影响——以安塞县为例[J]. *水土保持研究*, 2016,23(3):77-81. [Liang Z Q, Li J R, Guo J Y, et al. Effects of returning farmland to forest construction on soil erosion—A case study of Ansai County[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016,23(3):77-81.]
- [16] 汪邦稳,杨勤科,刘志红,等.延河流域退耕前后土壤侵蚀强度的变化[J]. *中国水土保持科学*, 2007,5(4):27-33. [Wang B W, Yang Q K, Liu Z H, et al. Changes of soil erosion intensity due to conversion of farmland to forest and grassland in Yanhe River Basin[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007,5(4):27-33.]
- [17] 余新晓,吴岚,饶良懿,等.水土保持生态服务功能评价方法[J]. *中国水土保持科学*, 2007(2):110-113. [Yu X X, Wu L, Rao L Y, et al. Assessment on the ecological service value of soil and water conservation[J]. *Science of Soil*

- and Water Conservation, 2007(2):110-113.]
- [18] 盛莉, 金艳, 黄敬峰. 中国水土保持生态服务功能价值估算及其空间分布[J]. 自然资源学报, 2010, 25(7):1105-1113. [Sheng L, Jin Y, Huang J F. Value Estimation of conserving water and soil of ecosystem in China[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(7):1105-1113.]
- [19] Meusburger K, Konz N, Schaub M, et al. Soil erosion modelled with USLE and PESERA using QuickBird derived vegetation parameters in an alpine catchment[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2010, 12(3):208-215.
- [20] Feng X M, Wang Y F, Chen L D, et al. Modeling soil erosion and its response to land-use change in hilly catchments of the Chinese Loess Plateau[J]. Geomorphology, 2010, 118(3-4):239-248.
- [21] 孙文义, 邵全琴, 刘纪远. 黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价[J]. 自然资源学报, 2014, 29(3):365-376. [Sun W Y, Shao Q Q, Liu J Y. Assessment of soil conservation function of the ecosystem services on the Loess Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(3):365-376.]
- [22] 国家气象信息中心. 中国地面气候资料日值数据集 (V3.0) [DB/OL]. http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0.html. 2017-06-23. [National Meteorological Information Center. Dataset of Daily Climate Data from Chinese Surface Stations(V3.0) [DB/OL]. http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0.html. 2017-06-23.]
- [23] 全国土壤普查办公室. 中国土种志(第一卷至第六卷) [M]. 北京: 中国农业出版社, 1996. [National Soil Census Office. Soil Species of China (Volumes 1 to 6) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1996.]
- [24] 资源环境数据云平台. 土壤类型空间分布数据[DB/OL]. <http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=145>. [Resource and Environment Data Cloud Platform. Spatial Distribution Data of Soil Types[DB/OL]. <http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=145>.]
- [25] 地理空间数据云. GDEMDEM 30M分辨率数字高程数据 [DB/OL]. <http://www.gscloud.cn/sources/?cdataid=302&pdataid=10>. [Geospatial Data Cloud. GDEMDEM 30M [DB/OL]. <http://www.gscloud.cn/sources/?cdataid=302&pdataid=10>.]
- [26] Wang K, Wan Z, Wang P, et al. Evaluation and improvement of the MODIS land surface temperature/emissivity products using ground-based measurements at a semi-desert site on the western Tibetan Plateau[J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(11):2549-2565.
- [27] Liu J Y, Zhang X Z, Zhuang D F, et al. A study on the spatial-temporal dynamic changes of land-use and driving forces analyses of China in the 1990s[J]. Geographical Research, 2003, 6(3):38-42.
- [28] Liu J, Aoser B. Study on spatial-temporal feature of modern land use change in China: Using remote sensing techniques[J]. Quaternary, 2000, 20(3):229-239.
- [29] Yang D, Kanae S, Oki T, et al. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes[J]. Hydrological Processes, 2003, 17(14):2913-2928.
- [30] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [J]. Agriculture Handbook, 1997:703.
- [31] Fu B J, Zhao W W, Chen L D, et al. Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: A case study in the Loess Plateau of China[J]. Land Degradation & Development, 2005, 16(1):73-85.
- [32] 李天宏, 郑丽娜. 基于 RUSLE 模型的延河流域 2001-2010 年土壤侵蚀动态变化[J]. 自然资源学报, 2012, 27(7):1164-1175. [Li T H, Zheng L N. Soil erosion changes in the Yanhe Watershed from 2001 to 2010 based on RUSLE model [J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(7):1164-1175.]
- [33] 王万忠. 黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究 III——关于侵蚀性降雨的标准问题[J]. 水土保持通报, 1984(2):58-63. [Wang W Z. Study on the relations between rainfall characteristics and loss of soil in loess region [J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 1984(2):58-63.]
- [34] 谢云, 刘宝元. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4):6-11. [Xie Y, Liu B Y. Study on standard of erosive rainfall[J]. Soil and Water Conservation, 2000, 14(4):6-11.]
- [35] Williams J R, Jones C A, Dyke P T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity [EPIC, Erosion-Productivity Impact Calculator, mathematical models][C]// Transactions of the ASAE, 1984:129-144.
- [36] McCool D K, Foster G R, Mutchler C K, et al. Revised slope length factor for the universal soil loss equation[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 30(5):1387-1396.
- [37] Remortel V, Maichle R, Hickey R. Computing the RUSLE LS factor through array-based slope length processing of digital elevation data using a C++ executable [J]. Computers & Geosciences, 2004, 30(9-10):1043-1053.
- [38] Liu B Y, Nearing M A, Shi P J, et al. Slope length effects on soil loss for steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 64(5):1759-1763.
- [39] 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 C F, Ding S W, Shi Z H,

- et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed[J]. *Soil and Water Conservation*, 2000,14(2):19-24.]
- [40] 水利部水土保持监测中心.西北黄土高原区土壤侵蚀预报模型开发项目研究成果报告[R].2006. [*Soil and Water Conservation Monitoring Center of the Ministry of Water Resources. Report on the research results of the soil erosion prediction model development project in the Loess Plateau of Northwest China*[R]. 2006.]
- [41] Fu B J, Zhao W W, Chen L D, et al. Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: A case study in the Loess Plateau of China[J]. *Land Degradation & Development*, 2005,16(1):73-85.
- [42] 陈雅如,康慕谊,宋富强.延安市退耕还林前后水土保持功能价值评估[J].*北京林业大学学报*,2013,35(6):67-73. [*Chen Y R, Kang M Y, Song F Q. Valuation of ecological service on soil conservation function before and after Grain for Green Project in Yan'an City, Northwestern China*[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2013,35(6): 67-73.]
- [43] 张加琼,刘章,杨明义,等.黄土高原水蚀风蚀交错带坡面土壤侵蚀特征及其影响因素[J].*水土保持研究*,2018,25(1):1-6,22. [*Zhang J Q, Liu Z, Yang M Y, et al. Soil erosion and its influence factors on a slope in the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau*[J]. *Soil and Water Conservation*, 2018,25(1):1-6,22.]
- [44] 刘文超.陕北地区农田退耕对生态系统关键服务功能的影响研究[D].北京:中国科学院大学,2016. [*Liu W C. The impact research of returning farmland on the key ecosystem services function in Northern Shaanxi, China*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.]