

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0041

高超, 赵军, 李传华, 魏伟, 王建邦, 康重阳. 石羊河流域草地覆盖与其生态服务功能变化. 草业科学, 2019, 36(1): 27-36.
GAO C, ZHAO J, LI C H, WEI W, WANG J B, KANG C Y. Grassland cover and ecological service function changes in Shiyang River basin. Pratacultural Science, 2019, 36(1): 27-36.

石羊河流域草地覆盖与其生态服务功能变化

高超, 赵军, 李传华, 魏伟, 王建邦, 康重阳

(西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃兰州 730070)

摘要: 草地生态系统容易受到环境变化影响, 研究草地覆盖及其生态服务功能变化具有较重要的意义。本研究以石羊河流域为研究区, 基于遥感数据和 InVEST 模型, 定量估算了 2000 年以来草地覆盖变化以及产水量、土壤保持、固碳等服务功能, 并探讨了草地覆盖变化对生态系统服务的影响。结果表明, 2000–2015 年间, 石羊河流域草地覆盖面积明显减小; 草地产水量呈先减少后增加趋势, 土壤保持与固碳服务呈减少趋势; 除草地覆盖与流域中游产水量无显著相关关系 ($P > 0.05$), 与下游土壤保持呈显著 ($P < 0.001$) 负相关关系外, 与其余不同尺度不同生态系统服务间均呈显著 ($P < 0.001$) 正相关关系; 石羊河流域上游草地植被显著减小, 引起草地生态系统服务能力下降; 改善上游的草地生态系统质量对于提高全流域草地生态系统服务具有重要意义。

关键词: 草地植被覆盖; 草地生态系统服务功能; 产水量; 土壤保持; 固碳服务; 石羊河流域

中图分类号: S812.29 文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2019)01-0027-10

Grassland cover and ecological service function changes in Shiyang River basin

GAO Chao, ZHAO Jun, LI Chuanhua, WEI Wei, WANG Jianbang, KANG Chongyang

(College of Geography and Environmental Science of Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Grassland ecosystem is susceptible to environmental change, it is of great significance to study the changes of grassland cover and ecosystem service function. Based on the remote sensing data and InVEST model, we taken the Shiyang River basin as the research area in this paper, and quantitatively estimated the service functions of grassland cover change, water yield, soil conservation and carbon sequestration service since 2000, and discussed the effects of grassland cover change on ecosystem service. The research results showed that the degradation of grassland cover in the Shiyang River basin was obvious during 2000–2015; the water yield of grassland was decreased first and then increased, and the service of soil conservation and carbon sequestration were decreased. There was a significant negative correlation between grassland coverage and water yield in the middle reaches of the river basin, and a negative ($P < 0.001$) correlation with the downstream soil retention while there was a significant ($P < 0.001$) positive correlation between the grassland coverage and other ecosystem services; the obvious vegetation degradation in the upper reaches of the Shiyang River basin gave rise to the decline of grassland ecosystem service capacity, so improve the quality of grassland ecosystem in the upper reaches have a great significance to advance the ecosystem service of the whole watershed.

Keywords: grassland vegetation cover; grassland ecosystem services function; water yield; soil conservation; carbon sequestration; Shiyang River

Corresponding author: ZHAO Jun E-mail: zhaojun@nwnu.edu.cn

收稿日期: 2018-01-17 接受日期: 2018-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于 GIS 的石羊河流域生态系统服务与权衡研究”(41661084)

第一作者: 高超 (1994-), 男, 甘肃金塔人, 在读硕士生, 主要从事生态系统服务 GIS 研究。E-mail: 271929349@qq.com

通信作者: 赵军 (1960-), 男, 山西河津人, 教授, 博导, 博士, 主要从事生态遥感与 GIS 应用研究。E-mail: zhaojun@nwnu.edu.cn

气候变化和人类开发等多因素影响,可能导致草地生态环境退化,直接影响区域生态、经济和社会的可持续发展^[1-2]。分析草地较长时间序列的生长情况,并对同期草地提供的生态系统服务进行评估,探索草地覆盖状况对生态系统服务的影响,可为认识草地生态系统服务规律、提升生态系统科学管理能力提供理论参考^[3]。

目前,生态系统服务是学术界的研究热点之一^[4-5],前人从不同角度针对植被展开研究,但已有研究多基于特定时间段来分析植被变化的空间格局,或以较短时序分析植被的变化过程和特征,也有学者从生态恢复与生态效益方面进行探讨^[6-9]。植被作为生态系统服务产生和传递的重要基础,气候变化和人为扰动的影响结果直接体现在植被上。因此,植被的生长状况势必对区域内生态系统服务产生重要影响,在分析生态系统服务变化时,有必要明确植被变化对其产生的影响和趋势^[10]。

石羊河流域是干旱区内陆河流域,是中国西北生态安全屏障的重要组成部分,水资源、水土保持及植被恢复与保护等问题是区域生态和社会经济发展的重要指标。然而石羊河流域生态问题严重,水土资源作为区域的生态基础至关重要,水土资源不足引起的草地生态环境退化势必影响草地的固碳服务,进而加重人工固碳或减少排放的任务量。因此,本研究选择草地的产水量、土壤保持、固碳服务等主要生态系统服务功能,探讨草地植被覆盖变化对生态系统服务的影响,以期对石羊河流域草地植被生态系统保护和科学管理提供参考。

1 数据来源与评估方法

1.1 研究区概况

石羊河流域地理位置为 101°41′–104°16′ E、36°29′–39°27′ N,总面积 $4.16 \times 10^4 \text{ km}^2$,平均海拔约 2 000 m,属于典型的大陆温带干旱气候,其上、中、下游的气候特征具有明显分异:上游祁连山高寒半干旱湿润区,年均气温约 0 °C,常年平均降水量为 300~600 mm,年蒸发量为 700~1 200 mm,是流域主要水源供给地,该区草地主要为高山和亚高山草甸,植被茂密,水土保持及碳固定能力较强;中游走廊平原干旱区,是流域内的主要灌

溉农业区,年均温不足 7.8 °C,年降水量 150~300 mm,年蒸发量 1 300~2 000 mm,干旱程度明显大于上游区域,且为流域的主要耗水区,该区草地主要为荒漠草原,水土保持能力较差;下游温暖干旱区,主要为民勤绿洲和荒漠,多年平均气温为 7.6 °C,年均降水量不足 150 mm,年蒸发量 2 000~2 600 mm,区域降水少且蒸发强,属于重度缺水区,成为生态环境问题最为突出的区域。综合来看,中下游草地均属荒漠草原和干草原植被类型。

1.2 数据来源

植被覆盖度 (fractional vegetation cover, FVC) 以 MODIS-NDVI 产品数据计算获得,归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 产品空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d,以最大值合成法得到年数据。固碳服务以 MODIS-NPP 产品数据获得,NPP 产品空间分辨率为 1 000 m,时间分辨率为 1 a。以上 MODIS 数据均来自 <https://modis.gsfc.nasa.gov/>。产水服务与土壤服务采用 InVEST 模型计算,所使用的基础数据如表 1 所列,对获得的原始数据进行处理和计算得到模型的输入参数。

1.3 评估方法

本研究以 NDVI 计算植被覆盖度,基于 InVEST 模型的产水量模块、土壤侵蚀模块,基于植物光合作用方程,定量评估石羊河流域草地生态系统的产水服务、土壤保持服务和固碳服务的时空变化特征。

气象数据等实测数据和土地利用等产品数据均满足本研究要求(表 1)。植物蒸散系数、土壤保持措施因子及植被覆盖和管理因子等经验参数,以相近研究区、模型参数可借鉴性、文献的新近性为原则,通过分析大量文献获得。Zhang 系数、汇水累计阈值和坡度阈值需多次模拟,使其与研究区实际情况相符。多次模拟后分别取 9.433、800 和 25。

1.3.1 草地覆盖变化分析

植被覆盖度基于 NDVI 数据、以像元二分模型计算获得,公式如下:

$$FVC = (NDVI - NDVI_{\text{soil}}) / (NDVI_{\text{veg}} - NDVI_{\text{soil}}) \quad (1)$$

式中: FVC 为植被覆盖度, $NDVI_{\text{soil}}$ 和 $NDVI_{\text{veg}}$ 分

表 1 InVEST 模型参数来源说明
Table 1 InVEST data source

参数 Parameter	来源 Source
降水量 (8个气象站点克里金插值) Precipitation (Kriging)	中国气象数据网 http://data.cma.cn/China Meteorological Data Sharing Network
潜在蒸散量 Potential evapotranspiration	西部数据中心 http://westdc.westgis.ac.cn/Western Data Center HWSD Dataset
彭曼公式 ^[11] Penman formula	西部数据中心 http://westdc.westgis.ac.cn/Western Data Center HWSD Dataset
土壤深度 Soil depth	西部数据中心 http://westdc.westgis.ac.cn/Western Data Center HWSD Dataset
DEM/(90 m × 90 m)	西部数据中心 http://westdc.westgis.ac.cn/Western Data Center HWSD Dataset
土壤饱和导水率 Soil saturated hydraulic conductivity	西部数据中心 http://westdc.westgis.ac.cn/Western Data Center HWSD Dataset
集水区 Watersheds	西部数据中心 http://westdc.westgis.ac.cn/Western Data Center HWSD Dataset
坡度坡长 Slope length	田间持水量和永久萎蔫系数之差 ^[12] Difference between field capacity and permanent wilting coefficient
植物可利用含水率 Plant available water fraction	参考 FAO 的灌溉和园艺手册及 Allen ^[13] Reference FAO irrigation and gardening manuals and Allen
蒸散系数 Kc Evaporation coefficient	中国科学院资源环境科学数据中心《全国土地利用/覆被数据集》 http://www.resdc.cn/National Land Use/Coverage Dataset of the Chinese Academy of Sciences Resource and Environmental Science Data Center
子流域 Sub-Watersheds	SWAT 模型计算 SWAT model calculation
Zhang 系数 Zhang constant	多次模拟取最优值 9.433 Multiple simulations take optimal value 9.433
降水侵蚀力因子 Erosivity (R)	参考文献[14] Reference [14]
植被覆盖因子 Vegetation cover factor (C)	参考文献[15] Reference [15]
水土保持因子 Soil and water conservation factor (P)	参考文献[16] Reference [16]
土壤可蚀性因子 Erodibility (K)	EPIC 公式计算后参考文献[17-18] 修正 EPIC Formula Calculated After Reference [17-18]

别为纯裸土和纯植被对应的 *NDVI* 值，结合前人研究和具体情况，取生长季内植被 *NDVI* 最小值 0.076 和最大值 0.818 代替 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ ^[19]。

对 2000–2015 年草地覆盖变化进行分级，结合已有研究及研究区实地考察，将草地现状分为 5 类^[20]。其中，植被覆盖度之差 < -20% 为明显退化，在 -20% ~ -5% 为较明显退化，在 -5% ~ 5% 为无变化，在 5% ~ 15% 为轻微改善，植被覆盖度之差 > 15% 为较明显改善。

1.3.2 生态系统服务评估

1) 产水服务

产水量模块基于 Budyko 水热耦合平衡假设 (1974 年) 和年平均降水量数据，以水量平衡法计算产水量。公式如下：

$$y(x) = \left[1 - \frac{AET(x)}{P(x)} \right] \times P(x) \quad (2)$$

式中： $AET(x)$ 表示栅格单元 x 的年实际蒸散量，

$P(x)$ 表示栅格单元 x 的年降水量。

水量平衡公式中，植被蒸散发 (实际蒸散量与降水的比值) 采用 Budyko 水热耦合平衡假设公式：

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{PET(x)}{P(x)} \right)^\omega \right]^{1/\omega} \quad (3)$$

式中： $PET(x)$ 表示潜在蒸散量、 $\omega(x)$ 表示自然气候-土壤性质的非物理参数，其中 $PET(x)$ 定义为：

$$PET(x) = K_c(l_x) \times ET_0(x) \quad (4)$$

式中： $ET_0(x)$ 表示栅格单元 x 的参考作物蒸散， $K_c(l_x)$ 为栅格单元植物蒸散系数。

$$\omega(x) = Z \times \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1.25 \quad (5)$$

式中： $AWC(x)$ 为植物可利用含水量 (mm)，由土壤质地和土壤有效深度决定， Z 为经验常数，反映区域降水分布及其他水文地质特征。

2) 土壤保持服务

土壤保持服务以土壤侵蚀和土壤保持量为指

标, 土壤保持量定义为裸地条件下的土壤侵蚀量 $RKLS$ 与植被覆盖情况下的土壤侵蚀量 $USLE$ 之差。公式如下:

$$RKLS = R \times K \times LS; \tag{6}$$

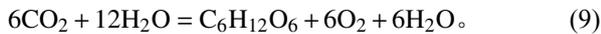
$$USLE = R \times K \times LS \times C \times P; \tag{7}$$

$$SD = RKLS - USLE. \tag{8}$$

式中: $USLE$ 为实际土壤侵蚀, $RKLS$ 为潜在土壤侵蚀, R 为降水可蚀量因子, K 为土壤可蚀性因子, LS 为坡度坡长因子, C 为作物/植被和管理因子, P 为土壤保持措施因子, SD 为土壤保持量。

3) 固碳服务

植被吸收空气中的二氧化碳, 通过光合作用产生有机物并释放氧气, 化学反应方程式为:



根据上式计算得出: 植物干物质生产与 CO_2 消耗比例为 1 : 1.62, 因此固碳量为:

$$Vc = NPP \times 1.62. \tag{10}$$

2 结果与分析

2.1 石羊河流域草地覆盖度的时空特征

2000–2015 年期间石羊河流域草地覆盖度最大值不断减小, 最小值却呈现增加趋势, 平均值呈现先增加后减少趋势 (表 2)。结合 2000–2015 年土地利用数据的草地面积变化统计, 造成这种情况的原因是草地面积在不断减少, 尤其是低覆盖度草地的不断消失, 使得植被覆盖度的最小值在不断增加。植被覆盖度的均值先增加后减少, 2005–2015 年草地覆盖度整体开始减小 (最大值减小, 最小值增加, 均值减小), 2010–2015 年减小最为严重。

表 2 2000–2015 年石羊河流域草地面积及植被覆盖度变化
Table 2 Changes of the grassland area and FVC in Shiyang River basin in 2000–2015

年份 Year	面积 Area/hm ²	植被覆盖度 FVC/%		
		最大值 Max	最小值 Min	均值 Mean
2000	1 110 400	98.4	18.9	50.3
2005	1 106 800	98.3	23.5	52.3
2010	1 107 900	97.8	27.4	51.5
2015	1 093 700	92.3	26.9	50.6

重。上述结果表明: 石羊河流域草地生态系统质量下降。

从草地覆盖变化趋势看, 石羊河流域草地覆盖有显著减小, 且主要集中在上游 (图 1)。石羊河上游地区, 西南区域显著减小, 所属子流域为西大河流域和东大河流域, 以及西营河流域西部; 中部靠南也有显著减小, 北部却有较显著改善; 杂木河流域、黄羊河流域及古浪河流域也呈较显著或显著减小; 东南部大靖河流域呈轻微改善或较显著改善。石羊河流域中游, 西部以减小趋势为主, 中部及东部呈改善趋势。石羊河流域下游, 草地覆盖无明显变化。

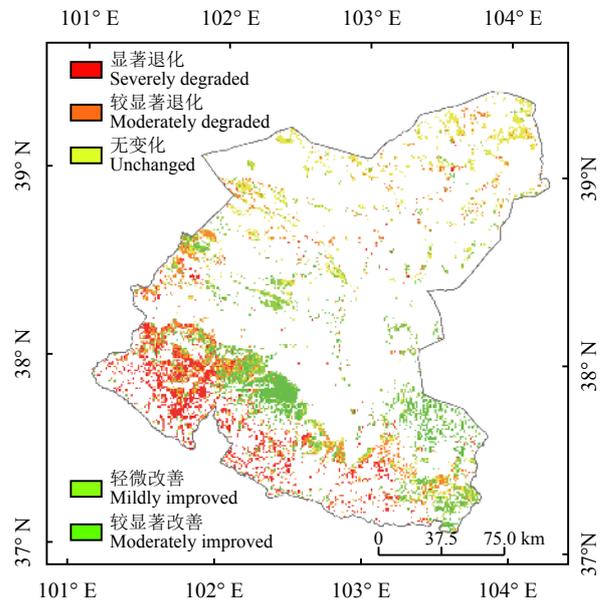


图 1 2000–2015 年草地覆盖变化趋势

Figure 1 Change trend of FVC in 2000–2015 grassland

2.2 石羊河流域草地生态系统服务的时空特征

2.2.1 产水量的时空特征

在 2000–2015 年, 石羊河流域草地产水量总体呈上升趋势。从流域尺度年际变化来看, 产水量呈先减少后增加趋势, 在 2010 年达到最低 $766.93 \text{ mm} \cdot \text{hm}^{-2}$, 在 2015 年达到最高值 $926.71 \text{ mm} \cdot \text{hm}^{-2}$, 多年平均值为 $853.79 \text{ mm} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。子流域产水量的变化趋势大致与流域类似, 均呈先减少后增加趋势。

从空间分布上来看, 草地覆盖茂密的中上游区域差异较大。其中产水量较高的子流域为古浪河、杂木河及黄羊河流域, 均达到 $110 \text{ mm} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上; 金塔河、西大河、大靖河及中下游流域产水

较少，产水量在 $70\sim 110\text{ mm}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，其中金塔河流域产水量最小，低于下游流域的产水量。

从产水量的变化速率空间分布来看，2000–2015 年研究区各时间段内有明显变化，大部分区域呈小幅度减少，但增加区域有较大幅度增长(图 2)。2000–2005 年，石羊河西部区域产水量有明显增加，流域中心明显减少。2005–2010 年，部分区域

呈小幅度上涨，涨幅最大的区域与前期减幅最大的区域相同，减少最严重的区域位于流域西部边界(图 2b)。2010–2015 年，变化幅度最大。区域年均最大涨幅为 40%；年均最大减幅达到 10%。从整个时间序列来看，仅大靖河东部及中下游西北部涨幅明显；东大河流域下游及其西部接壤处减幅明显，其余区域均呈小范围浮动变化。

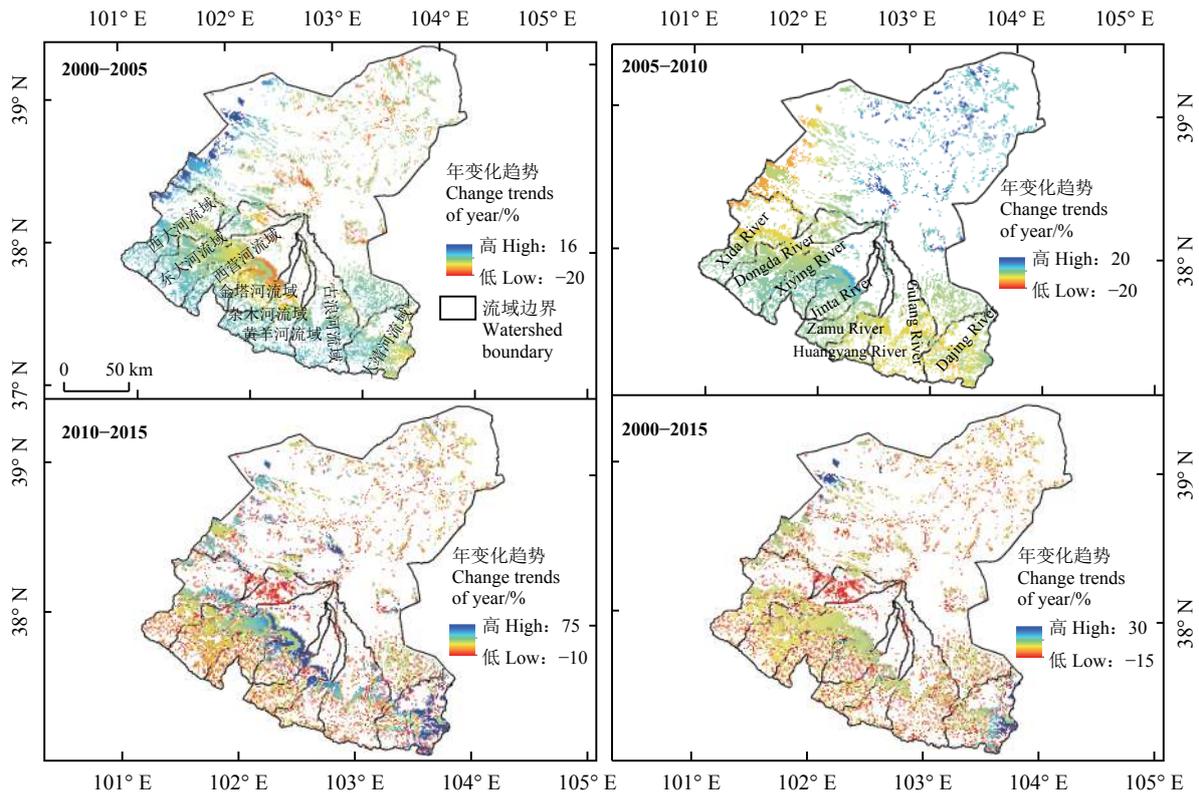


图 2 产水量变化速率空间分布
Figure 2 Spatial distribution of change rate of water yield

2.2.2 土壤保持时空特征

在 2000–2015 年，石羊河流域草地土壤保持总体呈波动减少趋势。从流域尺度年际变化来看，土壤保持 2015 年达到最低 $115.77\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，2000 年达到最高值 $200.81\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，多年平均值为 $150.64\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。从子流域尺度来看，黄羊河流域、古浪河流域、下游流域及大靖河流域呈不同幅度持续减少，其余子流域呈不同程度的波动减少，其中下游流域因其土壤保持量小，变化不明显。2000–2005 年，各子流域土壤保持均大幅减少，其中黄羊河流域、金塔河流域、杂木河流域及西营河流域减幅最大，古浪河流域与大靖河流域减幅较小。2005–2010 年，杂木河流域、西营河流域及东大河

流域均有明显涨幅，黄羊河流域、金塔河流域及大靖河流域有小幅度减少。2010–2015 年，除古浪河流域及中下游有小幅度减少、大靖河流域有小幅度增加外，其余子流域均呈大幅度减少趋势。

从空间分布来看，除中下游流域草地覆被较少，土壤保持量极低外，石羊河上游各子流域之间土壤保持差异明显。从土壤保持变化速率空间分布来看，2000–2015 年各时段均有明显变化但总体呈减少趋势(图 3)。2000–2005 年，石羊河流域北部土壤保持有小幅度增加，南部及东南部有不同程度减少，西大河流域、东大河流域、西营河流域及金塔河流域的中部区域减幅明显，东大河流域、西大河流域的下游及其与下游流域接壤处

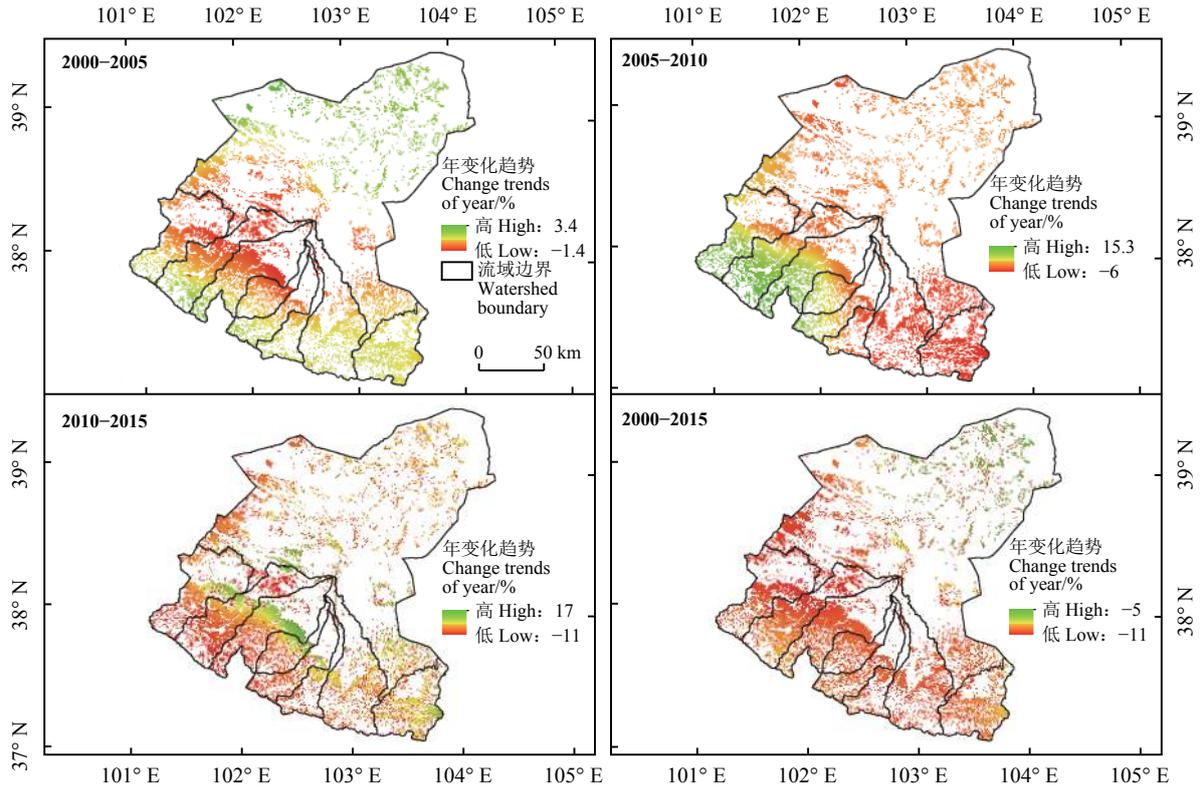


图 3 土壤保持变化速率空间分布

Figure 3 Spatial distribution of change rate of soil conservation

也有较大减幅。2005–2010 年，整个流域土壤保持变化量分区明显，流域西南区域的 5 个子流域上游均明显增长，流域东南区域明显减少，下游流域小幅度减少。2010–2015 年，流域西南部区域与前期变化相反，流域东南区域无明显分异但总体减少，下游流域与前期变化相仿。

2.2.3 固碳服务时空特征

2000–2015 年，石羊河流域草地固碳量总体呈减少趋势。从流域尺度年际变化来看，固碳量在 2000 年达到最高值 $194.25 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，2010 年达到最低值 $139.01 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ，多年平均值为 $155.92 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。从子流域角度看，各子流域固碳量均呈减少趋势且在 2000–2005 年显著减少。

从空间分布来看，石羊河流域草地固碳量呈整体退化趋势，在空间上退化程度并无太大的分异特征 (图 4)。这说明影响草地固碳能力的扰动因子持续影响全域草地，并无局部扰动。从固碳能力上看，上游高固碳量区域不断减小，且单位面积固碳能力也在不断减小；中游与下游交界处也有部分区域固碳能力从中等向低等退化。对比同期植被覆盖度分布情况，上游草地固碳能力的退化

趋势与草地植被覆盖度变化趋势大致相同：2005 年以前东南部地区草地固碳功能退化最强烈，2005 年以后西南部地区草地固碳功能退化超过东南部。

2.3 石羊河流域草地覆盖变化对生态系统服务的影响

为了更好地分析草地覆盖变化对各项生态系统服务的影响，以 Pearson 相关系数分别分析草地覆盖度与各项生态系统服务的相关性，并分上、中、下游分析草地覆盖度与各项生态系统服务的相关性，探索石羊河流域不同流域段草地覆盖对各项生态系统服务的影响差异。最后综合分析草地植被对草地生态系统服务的综合影响。

2.3.1 草地植被与产水量

草地植被与全流域和上游的产水量之间存在显著 ($P < 0.001$) 正相关，且全流域和上游的相关性强于中下游流域 (表 3)。从 InVEST 模型产水量输入参数来看，降水是影响产水量的主要因素，这与吴健等^[21] 研究结果相符。降水同样影响植被覆盖，石羊河流域降水量与草地分布均呈由西南向东北递减。在石羊河流域上游，水源充沛，水资

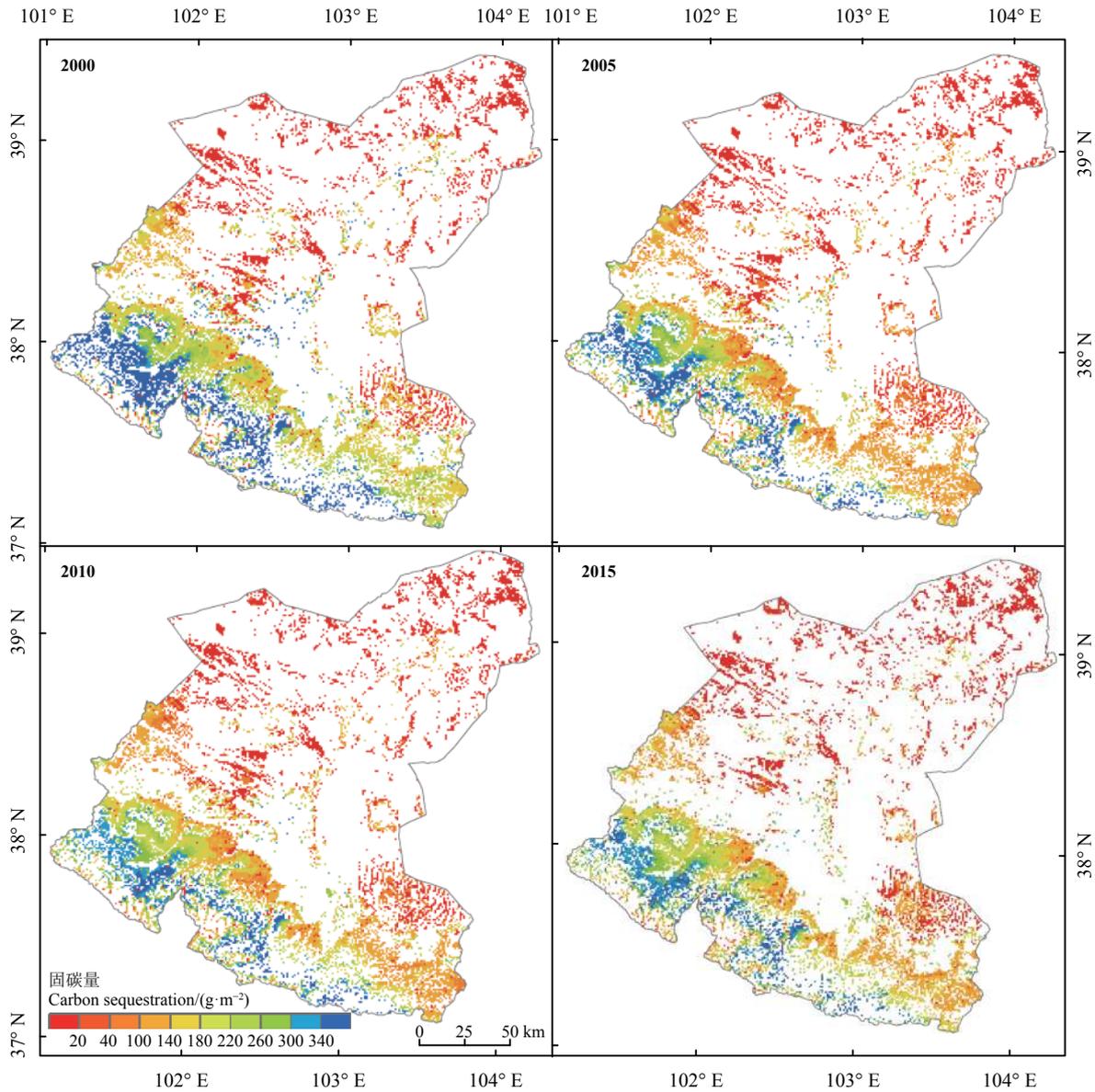


图 4 固碳量空间分布

Figure 4 Spatial distribution of carbon sequestration

表 3 草地植被覆盖度与产水量相关系数

Table 3 FVC and water yield correlation coefficient fractional

年份 Year	全流域 Basin	上游 Upper	中游 Middle	下游 Lower
2000	0.278 1**	0.259 6**	0.004 3*	0.063 6
2005	0.262 3**	0.216 3**	-0.005 7*	0.022 6*
2010	0.285 0**	0.272 5**	-0.004 5*	0.010 0*
2015	0.175 5**	0.107 8**	0.046 1*	0.007 4*

**为通过 $\alpha = 0.001$ 显著性水平检验；*为通过 $\alpha = 0.05$ 显著性水平检验，其余为未通过 $\alpha = 0.1$ 显著性水平检验。下同。

** For passing $\alpha = 0.001$ significance level Test; * For passing the $\alpha = 0.05$ significance level test, the rest as pass over $\alpha = 0.1$ significant level test; similarly for the following tables.

源的消耗在区域环境的承受范围内；石羊河下游重度缺水且草地稀少，多为耐旱性草本植物，因此石羊河流域下游草地植被与产水量的相关性比中游更好。从植被恢复的角度来看，中游水资源的合理利用对全流域更为重要。

2.3.2 草地植被与土壤保持

草地植被与土壤保持在全流域、上游及中游存在显著 ($P < 0.001$) 正相关，在下游存在显著 ($P < 0.001$) 负相关 (表 4)。在 InVEST 土壤保持模块输入参数中，降水侵蚀力、土壤可蚀性、坡度坡长因子在一定时间内基本保持稳定，对于草地也无土

表 4 草地植被覆盖度与土壤保持相关系数
Table 4 FVC and SDR correlation coefficient fractional

年份 Year	全流域 Basin	上游 Upper	中游 Middle	下游 Lower
2000	0.378 9**	0.206 0**	0.048 3**	-0.134 0**
2005	0.347 5**	0.210 6**	0.100 5**	-0.109 9**
2010	0.351 6**	0.245 1**	0.099 6**	-0.114 8**
2015	0.344 6**	0.164 1**	0.071 9**	-0.114 4**

壤保持措施, 因此植被覆盖因子和经营管理因子易受人类活动干扰, 从而影响流域的土壤保持。石羊河流域上游西部, 草地覆盖减小显著, 上游中部及东部部分区域有较显著改善, 对比流域土壤保持变化速率发现, 流域上游西部可能为植被覆盖因子和经营管理因子共同影响; 流域上游中部及东部区域为经营管理因子影响土壤保持量。石羊河流域中游, 西部草地覆盖与土壤保持变化均呈减小趋势; 中部及东部变化趋势相反, 说明经营管理因子主要影响土壤保持。石羊河流域下游, 草地覆盖与土壤保持变化趋势相反, 草地分布细碎, 经营管理效果微弱, 因此影响因子主要为草地覆盖。

2.3.3 草地植被与固碳服务

草地覆盖与固碳服务之间除 2000 年的中游外其余年份的流域均存在显著 ($P < 0.001$) 正相关关系, 且相关系数远高于草地覆盖与产水量和土壤保持 (表 5)。草地覆盖度的计算与固碳服务的计算中均用到 NDVI 指数, 草地覆盖与固碳服务之间存在共线性。因此, 石羊河流域草地植被与固碳服务的

表 5 草地植被覆盖度与固碳服务相关系数
Table 5 FVC and carbon sequestration correlation coefficient fractional

年份 Year	全流域 Basin	上游 Upper	中游 Middle	下游 Lower
2000	0.894 6**	0.861 2**	0.736 8*	0.773 3**
2005	0.907 1**	0.877 3**	0.749 5**	0.760 9**
2010	0.903 8**	0.868 1**	0.736 8**	0.729 9**
2015	0.889 9**	0.837 2**	0.727 4**	0.717 4**

相关系数均较大。对比 2000—2015 年石羊河流域草地覆盖与固碳服务的变化趋势, 西营河流域和金塔河流域部分区域呈相反变化趋势, 草地覆盖有所改善, 但固碳服务量仍呈减少趋势。从 CASA 模型的参数分析, 温度和水分可能会影响 NPP 量, 由于产水量的减少幅度不大, 温度可能是造成 NPP 减少的主要原因。

3 讨论与结论

对石羊河流域 2000、2005、2010、2015 年的草地覆盖、产水量、土壤保持、固碳能力进行评估, 并分析草地覆盖对生态系统服务的影响, 研究表明: 石羊河流域草地生态系统质量下降, 草地覆盖减小明显。西南部上游产水量、土壤保持及固碳能力较强, 东北部下流生态系统服务能力较弱。流域内产水量有先减少后增加趋势, 土壤保持和固碳能力均呈减少趋势。除草地覆盖度与流域上游产水量相关性呈显著 ($P < 0.001$) 正相关关系。石羊河流域上游草地植被覆盖减小显著, 引起草地生态系统服务能力下降。闫俊杰等^[22]在伊犁河谷的研究也指出, 草地覆盖度退化引起了生态服务价值的损失, 其中高覆盖度草地退化造成的影响最为严重, 与本研究的结论一致。改善上游的草地生态系统对于提高全流域草地生态系统服务至关重要。

本研究以 MOD-NDVI 产品数据分析石羊河流域草地植被覆盖变化, 以 InVEST 模型的产水量模块和土壤侵蚀模块分析研究区草地产水服务和土壤保持服务变化, 以 MOD-NPP 产品数据分析流域草地固碳服务。在生态系统服务评估上, InVEST 模型虽较其他方法有一定优势, 但已有的数据很难完全满足其要求。石羊河流域及周边的气象站点较少, 且土壤数据较难获得, 为保证精度, 土地利用数据仅使用了较权威的中国科学院数据 (每 5 年一期) 而没有自行解译更小时间间隔的数据。国内外均有研究认为, 生态系统服务之间的相互关系随时间变化且存在一定规律, 并表现出阶段性和差异性^[23-24]。因此, 若能缩小研究时间间隔, 或许能更好反映生态系统服务的时间变化。

参考文献 References:

- [1] 赵同谦, 欧阳志云, 贾良清, 郑华. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价. *生态学报*, 2004, 24(6): 1101-1110.

- ZHAO T Q, OUYANG Z Y, JIA L Q, ZHENG H. Ecosystem services and their valuation of China grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(6): 1101-1110.
- [2] 刘兴元, 陈全功, 王永宁. 甘南草地退化对生态安全与经济的影响. *草业科学*, 2006, 23(12): 39-42.
LIU X Y, CHEN Q G, WANG Y N. Effects of grassland degradation on ecological security and economic development in Gannan. *Pratacultural Science*, 2006, 23(12): 39-42.
- [3] 李令, 贺慧丹, 未亚西, 杨永胜, 罗谨, 李红琴, 李英年, 周华坤. 三江源农牧交错区植被群落及土壤固碳持水能力对退耕还草措施响应. *草业科学*, 2017, 34(10): 1999-2008.
LI L, HE H D, WEI Y X, YANG Y S, LUO J, LI H Q, LI Y N, ZHOU H K. Response of vegetation community structure, soil carbon sequestration, and water-holding capacity in returning farmland to grassland plots, in the agro-pastoral transitional zone in the Three River Source Region. *Pratacultural Science*, 2017, 34(10): 1999-2008.
- [4] SHACKELFORD N, HOBBS R J, BURGAR J M, ERICKSON J B, LALIBERTÉ E, RAMALHO C E, PERRING M P, STANDISH R J. Primed for change: Developing ecological restoration for the 21st Century. *Restoration Ecology*, 2013, 21(3): 297.
- [5] 傅伯杰, 周国逸, 白永飞, 宋长春, 刘纪远, 张惠远, 吕河, 郑华, 谢高地. 中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全. *地球科学进展*, 2009, 24(6): 571-576.
FU B J, ZHOU G Y, BAI Y F, SONG C C, LIU J Y, ZHANG H Y, LYU H, ZHENG H, XIE G D. The main terrestrial ecosystem services and ecological security in China. *Advances In Earth Science*, 2009, 24(6): 571-576.
- [6] JIANG W G, YUAN L H, WANG W J, CAO R, ZHANG Y F, SHEN W M. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin. *Ecological Indicators*, 2015, 51: 117-126.
- [7] LYU Y H, FU B J, FENG X M, ZENG Y, LIU Y, CHANG R Y, SUN G, WU B F. A policy-driven large scale ecological restoration: Quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China. *Plos One*, 2012, 7(2): e31782.
- [8] ZHONG B X, LI S R, LU X X. Soil erosion control and sediment load reduction in the loess plateau: Policy perspectives. *International Journal of Water Resources Development*, 2012, 28(2): 325-341.
- [9] 张颖, 章超斌, 王钊齐, 杨悦, 李建龙. 三江源 1982-2012 年草地植被覆盖度动态及其对气候变化的响应. *草业科学*, 2017, 34(10): 1977-1990.
ZHANG Y, ZHANG C B, WANG Z Q, YANG Y, LI J L. Spatiotemporal dynamics of grassland coverage in response to climate change from 1982 to 2012 in the Three River Source Region, China. *Pratacultural Science*, 2017, 34(10): 1977-1990.
- [10] 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. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(1): 23-31.
ZHANG K, LYU Y H, FU B J. Vegetation restoration and its influences on ecosystem services in areas typical of the loess plateau. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(1): 23-31.
- [11] PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society*, 1948, 193: 120-145.
- [12] GUPTA S C, LARSON W E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. *Water Resources Research*, 1979, 15(6): 1633-1635.
- [13] ALLEN-WARDELL G, BERNHARDT P, BITNER R, BURQUEZ A, BUCHMANN S, CANE J, COX P A, DALTON V, FEINSINGER P, INGRAM M. The potential consequences of pollinator declines on the conservation of biodiversity and stability of food crop yields. *Conservation Biology*, 1998, 12(1): 8-17.
- [14] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究. *水土保持通报*, 1996(5): 1-20.
WANG W Z, JIAO J Y. Quantitative evaluation on factors influencing soil erosion in China. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1996(5): 1-20.
- [15] 蔡崇法, 丁树文. 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. *水土保持学报*, 2000, 14(2): 19-24.
CAI Z F, DING S W. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(2): 19-24.
- [16] 郑度, 姚檀栋. 青藏高原隆升与环境效应. 科学出版社, 2004.
ZHENG D, YAO T D. The uplifting and environmental effectivity in Qinghai-Tibet Plateau. Science Press, 2004.
- [17] WILLIAMS J R, RENARD K G, DYKE P T. EPIC-A new method for assessing erosion's effect on soil productivity. *Journal of Soil & Water Conservation*, 1983, 38(5): 381-383.

- [18] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算. 土壤学报, 2007, 44(1): 7-13.
ZHANG K L, PENG W Y, YANG H L. Soil erodibility and its estimation for agricultural soil in China. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(1): 7-13.
- [19] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 刚成诚, 周伟, 居为民. 2001-2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. 地理学报, 2012, 67(9): 1255-1268.
MU S J, LI J L, CHEN Y Z, GANG C C, ZHOU W, JU W M. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001-2010. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(9): 1255-1268.
- [20] 李海亮. 基于 MODIS 数据的石羊河流域植被覆盖时空变化研究. 兰州: 西北师范大学博士学位论文, 2009.
LI H L. Study on the temporal-spatial changes of vegetation cover in shiyang river basin based on MODIS data. PhD Thesis. Lanzhou: Northwest Normal University, 2009.
- [21] 吴健, 李英花, 黄利亚, 卢正茂, 于大炮, 周莉, 代力民. 东北地区产水量时空分布格局及其驱动因素. 生态学杂志, 2017, 36(11): 3216-3223.
WU J, LI Y H, HUANG L Y, LU Z M, YU D P, ZHOU L, DAI L M. Spatiotemporal variation of water yield and its driving factors in Northeast China. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(11): 3216-3223.
- [22] 闫俊杰, 黄辉, 崔东, 刘海军, 陈晨, 夏倩倩. 新疆伊犁河谷草地退化及其对生态服务价值的影响. 生态经济, 2018, 34(1): 191-196.
YAN J J, HUANG H, CUI D, LIU H J, CHEN C, XIA Q Q. The degradation of grassland and its impact on ecological service value in Ili river valley of Xinjiang. Ecological Economy, 2018, 34(1): 191-196.
- [23] RENARD D, RHEMTULLA J M, BENNETT E M. Historical dynamics in ecosystem service bundles. [Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America](#), 2015, 112(43): 13411.
- [24] WU J X, YAN Z, YU C Q, LUO L M, PAN Y. Land management influences trade-offs and the total supply of ecosystem services in alpine grassland in Tibet, China. *Journal of Environmental Management*, 2017, 193: 70-78.

(执行编辑 苟燕妮)

2019 年第 1 期《草业科学》审稿专家

安 渊	卜海燕	曹建军	曹阳春	曾 兵	常文环	常智慧	陈懂懂
陈先江	陈学林	陈 煜	董宽虎	董书伟	杜红梅	方强恩	方香玲
冯朝阳	傅 华	干友民	郭旭生	韩云华	何学青	侯扶江	胡龙兴
胡自治	焦 婷	李惠霞	李雪枫	李元恒	李志华	梁天刚	刘华梁
刘文献	刘颖慧	刘志鹏	娄燕宏	马西青	马向丽	潘竟虎	任战军
孙 娟	孙小琴	唐 增	王虎成	王梦芝	武高林	谢文刚	许立新
杨顺义	于应文	张 程	张德罡	张吉宇	张建全	赵桂琴	郑 琛
周立华							

承蒙以上专家对《草业科学》期刊稿件的审阅, 特此表示衷心的感谢!