

DOI: 10.5846/stxb202101310341

郎燕, 刘宁, 刘世荣. 气候和土地利用变化影响下生态屏障带水土流失趋势研究. 生态学报, 2021, 41(13): 5106-5117.

Lang Y, Liu N, Liu S R. Changes in soil erosion and its driving factors under climate change and land use scenarios in Sichuan-Yunnan-Loess Plateau region and the Southern Hilly Mountain Belt, China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5106-5117.

气候和土地利用变化影响下生态屏障带水土流失趋势研究

郎 燕¹, 刘 宁^{1,2}, 刘世荣^{1,*}

1 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

2 Department of Forest Resources, University of Minnesota, St. Paul, MN, USA 55108

摘要:受气候和地形等诸多因素影响,我国“两屏三带”国家生态屏障带中的川滇-黄土高原区域和南方丘陵带水土流失十分严重,自然灾害频发。但是,针对川滇-黄土高原区域和南方丘陵带水土流失时空格局变化,特别是未来气候变化和土地利用变化影响下水土流失变化趋势的研究很少。因此,本研究以川滇-黄土高原区域和南方丘陵带为研究对象,利用修正土壤流失方程(RUSLE)定量分析了该区在2000—2015年水土流失的时空变化规律及其影响因素,并预测了在RCP2.6和RCP4.5的未来气候情景下及土地利用变化条件下水土流失的变化趋势。研究结果表明:(1)黄土高原地区在植被恢复的积极作用下,水土流失显著缓解;(2)川滇地区的西南部因植被盖度的增长和降雨的减少水土流失显著缓解,但四川省境内人口密集区农田面积增加以及降水增加造成水土流失大幅度加剧;(3)南方丘陵带受降水增加影响导致了部分区域的水土流失恶化;(4)在未来气候变化情景下,由于大部分地区降雨将减少使土壤侵蚀趋于缓解,但四川、黄土高原和南方丘陵带大部分地区仍然面临未来农田面积增加带来的水土侵蚀压力。考虑到未来气候变化情景下降雨减少的趋势,建议在黄土高原地区提高草地在土地利用类型中的占比,在减少耗水量的同时维持地表盖度,缓解水土侵蚀;此外,各区域仍需控制农田面积,而且需通过加强坡耕地上保水保土耕作措施降低农田区域的土壤侵蚀压力。

关键词:水土流失;修正通用土壤流失方程;土地利用变化;气候变化

Changes in soil erosion and its driving factors under climate change and land use scenarios in Sichuan-Yunnan-Loess Plateau region and the Southern Hilly Mountain Belt, China

LANG Yan¹, LIU Ning^{1,2}, LIU Shirong^{1,*}

1 Research Institute of Forestry Ecology, Environment and Protection, Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, China's National Forestry and Grassland Administration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Department of Forest Resources, University of Minnesota, St. Paul 55108, USA

Abstract: Under the influence of climate, tectonics, and topography, soil erosion is most severe in the Loess Plateau and the Southern Hilly Mountain of China, which causes ecological degradation, frequent natural disasters, and other potential dangers. At present, there are few research on the spatio-temporal changes of soil erosion on the Loess Plateau and the Southern Hilly Mountain of China and its underlying mechanism, in particular, tendency projections on soil erosion under climate change and land use scenarios. Therefore, in this study, the Sichuan-Yunnan-Loess Plateau region and the Southern Hilly Mountain belt were selected as the target area to explore the soil erosion change in 2000—2015 using Revised

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0507305-2);中国生态学会创新与发展项目“天然林资源保护工程生态系统服务功能评估”

收稿日期:2021-01-31; **修订日期:**2021-07-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liusr@caf.ac.cn

Universal Soil Loss Equation (RUSLE). At the same time, we also predicted the future trend of soil erosion under the combined impacts of climate change (scenarios RCP2.6 and RCP4.5) and land use change. The results show that: (1) soil erosion has been significantly alleviated under the positive effects of vegetation restoration in the Loess Plateau. (2) Soil erosion in the southwestern Sichuan-Yunnan-Loess Plateau region has been significantly alleviated due to the increase in vegetation coverage accompanied by the decrease in rainfall. However, in Sichuan Province, the increased soil erosion occurred due to the increasing farmland in the densely populated areas along with the greatly increased precipitation. (3) The deterioration of soil erosion in some areas took place due to the increasing precipitation in the Southern Hilly Zone. (4) Under future climate change scenarios, rainfall in most parts of the study area will be likely to decrease, which will help alleviate soil erosion. However, most areas of Sichuan, the Loess Plateau and the Southern Hilly Mountain of China will face the pressure of soil erosion due to an increasing farmland. Considering the reduced rainfall under future climate change, it is recommended to increase the proportion of grassland on the Loess Plateau in order to reduce water consumption, while to maintain surface cover to alleviate water and soil erosion at the same time; in addition, each region still needs to control farmland expansion and takes appropriate measures to manage slope farmland and to reduce soil and water erosion in farmland areas.

Key Words: soil erosion; Revised Universal Soil Loss Equation; land use change; climate change

水土流失作为全球最严重的环境问题之一,直接威胁区域生态安全以及经济社会可持续发展。我国是世界上水土流失相对严重的国家之一。据 2018 年全国水土流失动态监测结果表明,我国水土流失总面积达 273.69 万 km²,占全国国土面积的 28.6%(统计数据中尚不含我国港澳台地区)。在各区域中,我国黄土高原地区和西部地区水土流失最为严重,占全国总水土流失面积的 83.67%^[1]。在我国 2020 年 6 月 11 日发布的《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)》中,黄河重点生态区(含黄土高原生态屏障)、长江重点生态区(含川滇生态屏障)和南方丘陵山地带等区域被划定为七大重点生态功能区,实施九大生态保护和修复重大工程。其中,川滇-黄土高原生态屏障区域水土流失严重。南方石质山区地形陡峭,海拔高,多暴雨,伴随石漠化带来的水土流失问题十分严峻。

水土流失的主要影响因素包括以降雨模式、土壤属性、坡度坡长等地形因素为主的自然因素,及以气候变化和土地利用变化等为主的人为因素。气候变化可通过改变降雨量,降雨强度和降雨空间分布直接影响土壤侵蚀过程。气候变化带来的气温升高、季节性干旱还将改变植被盖度和土壤湿度,从而间接影响土壤侵蚀程度。而土地利用的变化则改变土壤物理性质,从而改变覆盖区产汇流形成机制,最终影响水土流失。此外,地表植被的变化一方面受人为因素的直接影响,另一方面也在全球气候变化的作用下发生变化。在全球气候变化的背景下,深入研究气候变化和土地利用变化对水土流失的影响对科学预测评估区域水土流失的变化趋势,采取适应性的防控措施具有重要指导意义。因此,近年来国内外开展了许多气候变化^[2-5]和植被覆盖变化^[6-8]对水土流失的影响研究。Yan^[9]与 Feng 等^[10]分别采用了修正的通用土壤流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)模型和 WATEM/SEDEM 模型估算了黄土高原地区和典型流域内土地利用变化对水土流失的影响,两研究结果均表明 1990—2000 年间土地利用的变化使黄土高原地区水土流失显著减少。Zhang 等^[11]采用 GeoWEPP 模型模拟了不同土地利用和坡度条件下我国南方山区土壤侵蚀的变化,从而得出实际土地利用条件与森林、草地、农田和休耕地利用条件下土壤侵蚀的差异。

然而,以上研究及其他当前研究大多只考虑了气候变化或土地利用变化单一因素对土壤流失的影响,且以分析过去时间段上土壤流失的变化为主。同时考虑气候变化和植被变化条件对水土流失影响的研究,尤其是对未来水土流失趋势的预测则甚少^[12-13]。因此,本研究选取了我国水土流失的典型区域,也是国家七大重点生态功能区中的川滇-黄土高原区域和南方丘陵带为研究对象,采用 RUSLE 模型分析了研究区在 2000—2015 年水土流失的变化情况及其主导因素,预测了未来不同气候和土地利用情景下水土流失的变化趋势。

1 研究方法

1.1 研究区概况

川滇-黄土高原生态屏障区主要涉及云南、四川、甘肃、陕西、山西等5个省(区)(图1)。其中,川滇生态屏障区大部分属典型的亚热带季风湿润气候,年均降水量500—1400mm。该区域土壤以红壤、黄壤、黄棕壤和黄褐土为主,区域内林草植被整体质量不高,水土流失、石漠化问题突出,泥石流等自然灾害频发。黄土高原生态屏障区属大陆性季风气候,年均降水量在150—750mm,降水时间和空间分异很大。该区域土壤以黄土为主,区域内植被覆盖率低,天然次生林和天然草地面积少。南方丘陵山地主要涉及福建、江西、湖南、贵州、云南、广东、广西等7个省(区)。该区域属于热带、亚热带季风气候,雨热同季,年平均降水量1000—2500mm,土壤主要有红壤、砖红壤。本区森林覆盖率高,天然植被以常绿阔叶树占优势,高海拔区域分布有常绿阔叶林与落叶阔叶林的混交林、灌丛和草甸。

1.2 土壤侵蚀量的估算

本文采用了RUSLE对水土流失量作了估算。该方程是由美国农业部农业研究局于1992年推出的经验统计模型。该模型综合考虑了降水、坡度、坡长、植被、土壤质地及人类活动干扰等因素,计算潜在土壤流失量。该模型在我国,尤其是黄土高原地区和西南地区已有非常广泛的应用^[9,14]。由于该模型部分参数的取值并没用统一的标准,本文在参数的计算和赋值方面广泛参考了其他学者在国内的相关研究。

土壤流失方程的表达式为:

$$A = R \times LS \times K \times C \times P \quad (1)$$

式中, A 为土壤流失量($t \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$); R 为降雨侵蚀因子($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$); LS 为坡长与坡度因子; K 为土壤可蚀性因子($t \text{ hm}^2 \text{ h MJ}^{-1} \text{ hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$); C 为作物覆盖与经营因子; P 为水土保持措施因子。

土壤侵蚀等级按中华人民共和国水利部土壤侵蚀分类分级标准(SL190—207)基于土壤侵蚀模数($t \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)分为微度<10;轻度10—25;中度25—50;强烈50—80;极强烈80—150;剧烈>150。

1.2.1 降雨侵蚀力(R)

降雨侵蚀力(R)是降雨引起土壤侵蚀的潜在能力,它是降雨量、降雨强度、雨型和雨滴动能的函数。国内外一些学者根据降雨观测资料,提出了降雨侵蚀力简易算法,以估算侵蚀力^[15],即,

$$R = \sum_{i=1}^{12} 0.0125 P^{1.6295} \quad (2)$$

式中, P 为月降水。

1.2.2 坡长与坡度因子(LS)

坡长与坡度因子(LS)为开始发生地表径流,到泥沙开始沉积或径流开始汇聚的这段距离,直接反映了地形对土壤侵蚀的作用。实际上,土壤侵蚀量的大小并不取决于坡面距离,而在于每单位等高线长度上的上坡来水面积。本研究采用Wischmeier和Smith提出的坡长(L)因子计算,即

$$L = (\lambda/22.1) \alpha \quad (3)$$

$$\alpha = \beta/(\beta + 1) \quad (4)$$

$$\beta = (\sin\theta/0.0896)/(3.0\sin0.8\theta + 0.56) \quad (5)$$

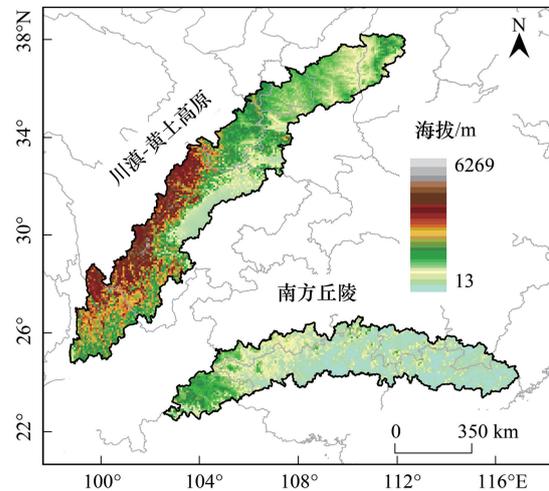


图1 研究区的位置

Fig.1 Location of the study area

式中, L 为坡长因子; λ 为由 DEM 提取的坡长 (m), 22.1m 为标准小区坡长; α 为坡度坡长指数; θ 为由 DEM 提取的坡度 ($^{\circ}$); β 为坡度修正值。坡度 (S) 因子采用 Nearing 根据坡度因子计算公式基础资料基础上, 利用一个对数方程, 拟合出单一连续的方程^[16], 即

$$S = -1.5 + \frac{17}{1 + e^{(2.3 - 6.1 \sin \theta)}} \quad (6)$$

1.2.3 土壤可蚀性因子 (K)

土壤可蚀性因子 (K) 是评价土壤被降雨侵蚀、分离、冲蚀和搬运难易程度的指标。它受土壤结构、有机质含量和土壤剖面渗透性的影响, 尤其与土壤机械组成和土壤有机质含量的相关性较高。本文采用改进的柯克比的查表法计算 K 值, 计算中需要的土壤质地和有机质含量数据源于土壤水力和热力参数地表模型模拟结果^[16-17]。

1.2.4 作物覆盖与经营因子 (C)

作物覆盖与经营因子作为反映地表植被特征的因子, 主要体现地表植被对土壤侵蚀的阻挡作用。本文对历史和未来的 C 值利用不同的方法进行估算。

(1) 2000—2015 年 C 的估算

在分析 2000—2015 年水土流失的过程中, 本文利用 C 与植被覆盖 (N) 之间的回归方程计算 C 值^[16]。

$$C = 0.6508 - 0.3436 \lg N \quad (7)$$

式中, $C=0$ 时不产生土壤流失, 此时 $N = 78.3\%$, 从而确定当 $N \geq 78.3\%$ 时, $C=0$, 不产生土壤流失; 而当 $N = 0.1\%$ 时, $C=1$, 由于此时 N 值很小, 可视为 $N=0$, 从而得到研究区的作物覆盖与经营因子。

本研究采用 MODIS 归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 空间分布数据集 (1km×1km), 基于元二分模型^[18]进行了植被覆盖的估算:

$$N = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}}{\text{NDVI}_{\text{veg}} + \text{NDVI}_{\text{soil}}} \quad (8)$$

式中, N 表示植被盖度; NDVI 表示混合像元的 NDVI 值; NDVI_{veg} 为纯植被像元的 NDVI 值; $\text{NDVI}_{\text{soil}}$ 为纯非植被像元的 NDVI 值。同时, 分别采用 5%、95% 置信度 (单期数据中 NDVI 值对应像元数量的累计百分比) 分别代表土壤和植被。

(2) 未来场景下 C 的取值

在估算未来土壤侵蚀的不同场景中, C 因子的估算受土地利用类型、植被覆盖度、气候因素等多重因素的影响, 给合理估算 C 值带来挑战。因此, 本文选取了赋值法根据不同土地利用类型对 C 因子进行赋值。赋值法在世界范围内有广泛使用。它虽无法考虑同一土地利用类型的时空异质性, 但充分考虑了土地利用类型的变化, 达到了本研究中预测未来不同土地利用类型场景下水土流失变化趋势的目的。本研究对 C 值的具体取值参考了斯坦福大学的 InVEST 模型参数数据库^[19], 详见表 1。

表 1 未来场景下不同土地类型作物覆盖与经营因子 (C) 的赋值

Table 1 Cover management factor (C) value of different land use types

土地利用类型 Land use types	作物覆盖与经营因子 (C) Cover management factor	土地利用类型 Land use types	作物覆盖与经营因子 (C) Cover management factor
森林 Forest	0.001	湿地 Wetland	0.001
草地 Grassland	0.034	其他 Other land use	0.99
耕地 Cropland	0.412		

1.2.5 水土保持措施因子 (P)

水土保持措施主要是通过人为调整水流形态、斜坡坡度和表面汇流方向, 减少径流量, 降低径流速率等, 以达到减轻土壤侵蚀的效果^[20]。 P 因子值越接近 0 表明水土保持措施效果越好; 因子值越接近 1, 表明水土

保持措施产生的效果越小。本研究根据有关学者的研究成果^[21-22]确定了不同土地利用类型的 P 值,如表 2 所示。

表 2 不同土地利用类型水土保持措施因子(P)值

Table 2 Conservation support practice factor (P) value of different land use types

土地利用类型 Land use types	水土保持措施因子 (P) Conservation support practice factor	土地利用类型 Land use types	水土保持措施因子 (P) Conservation support practice factor
森林 Forest	1	湿地 Wetland	1
草地 Grassland	1	其他 Other land use	1
耕地 Cropland	0.4		

1.3 数据来源

1.3.1 降水数据 2000—2015

本研究使用了 2000—2015 年间年均气温、年降水量空间插值数据集^[23]。该数据集是基于全国 2400 多个气象站点日观测数据,通过整理、计算和 ANUSPLIN^[24]空间插值处理生成。该数据的空间分辨率为 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 。

1.3.2 植被类型 2000—2015

本研究采用 2000—2015 年中国土地覆被数据集^[25]。该数据集以国产环境灾害卫星(HJ-1A/B)和美国陆地卫星(Landsat)数据为信息源,以及面向对象的多尺度分割与变化检测分类方法。基于研究需要,将原始的土地覆被类型重新划分为 5 个主要类型:森林、草地、耕地、湿地和其他类型(建筑用地、裸石、裸地和冰雪)。该数据的空间分辨率为 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 。

1.3.3 未来气候变化情景

本研究选用世界气象数据库^[26]获取的未来气候数据集。该数据集通过全球范围内大量气象站点的气象信息(1950—2000 年),整合插值生成 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 分辨率的全球气候栅格数据。该数据集提供到 2100 年,在不同全球气候模式(Global climate model, GCMs)和不同典型浓度路径下预测的气候数据。这包括第五次国际耦合模式比较计划(Climate Model Intercomparison Project, CMIP-5)中 5 个我国参与的全球气候模式,在典型浓度路径(Representative Concentration Pathway, RCP)(RCP2.6 和 RCP4.5)下气候预估结果。其中,本研究选取了 BCC-CSM1-1 模型 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下的气候数据。该模型是中国国家气候影响评估报告所选的模型之一,具有高可信度和稳健性。

1.3.4 未来土地利用变化情景

本研究采用了南京师范大学曹敏等 2019 年模拟获得的未来土地利用变化空间数据(空间分辨率 $1\text{km} \times 1\text{km}$)^[27]。该数据集基于全球气候变化评估情景(RCP2.6 和 RCP4.5)利用元胞自动机的方法,考虑全球地缘政治、经济社会因素和农业生态区域差异后获得的未来土地利用变化数据。曹敏等^[27]采用了 2010 年实际土地利用数据与该数据集模拟出的 2000—2010 年土地变化数据进行对比验证,表明了该数据集计算方法和结果的可靠性。

1.4 降水和植被对土壤侵蚀的贡献率

贡献率的计算是通过在模拟过程中控制降水和植被因子情景获得,具体的情景包括仅有降水变化或者仅有植被变化,然后通过以下公式计算出降水或者植被的贡献率(%)。贡献率的正值代表加剧土壤侵蚀,负值代表缓解土壤侵蚀。

$$\text{贡献率}_{\text{降水}} = 100 \times \frac{\text{土壤侵蚀变化}_{\text{降水}}}{|\text{土壤侵蚀变化}_{\text{降水}}| + |\text{土壤侵蚀变化}_{\text{植被}}|} \quad (9)$$

$$\text{贡献率}_{\text{植被}} = 100 \times \frac{\text{土壤侵蚀变化}_{\text{植被}}}{|\text{土壤侵蚀变化}_{\text{降水}}| + |\text{土壤侵蚀变化}_{\text{植被}}|} \quad (10)$$

土壤侵蚀变化_{降水}和土壤侵蚀变化_{植被}分别表示由降水和植被变化引起的土壤侵蚀变化量。

2 结果与分析

2.1 2000—2015 年研究区水土流失变化及其主导因素

2.1.1 水土流失多年平均及变化趋势

由图 2 可见,我国南方丘陵带的土壤侵蚀在两时段整体均低于川滇-黄土高原区域。但就 2000—2015 年的变化趋势而言,南方丘陵带比川滇-黄土高原区域呈现土壤侵蚀恶化的趋势。仅南方丘陵带而言,2000 年绝大部分区域呈微度侵蚀,仅西部局部区域呈轻度侵蚀。2015 年南方丘陵带呈现东部恶化、西部缓解的趋势;其中全区域 60% 的区域侵蚀增加超过 20%,主要分布在湖南省和江西省境内;此外,有 15% 的区域土壤侵蚀降低小于 50%,另有 18% 降低程度超过 50%,主要分布在中西部地区。整体上,2015 年南方丘陵大部分区域仍呈微度侵蚀状态。就川滇-黄土高原地区而言,2000 年全区中部大部分地区为微度侵蚀,黄土高原地区和川滇南部呈轻度和中度侵蚀。2015 年川滇-黄土高原的土壤侵蚀较 2000 年有约 65% 的区域呈现缓解趋势;其中 42% 的区域土壤侵蚀降低超过 50%,主要分布在黄土高原地区,以及川滇地区的西南角;此外,土壤侵蚀恶化的地区大部分分布在四川盆地范围内,升高幅度在 25% 以上。整体上,川滇南部和黄土高原地区在 2015 年土壤侵蚀得到明显改善,使川滇-黄土高原大部分区域呈微度侵蚀,仅在北部和南部少量区域呈现轻度、中度、强度侵蚀。

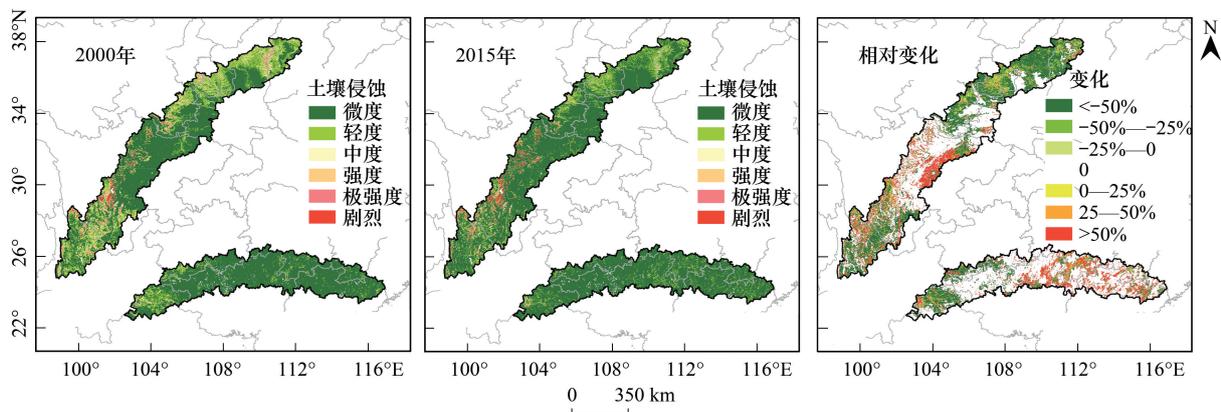


图 2 2000—2015 年土壤侵蚀分布与变化

Fig.2 Changes and distribution of soil erosion from 2000 to 2015

2.1.2 降水与植被覆盖变化对水土流失的影响

(1) 2000—2015 年降水量的变化

由图 3 可见,2000—2015 年,南方丘陵带年降雨整体呈增加趋势,且较川滇-黄土高原带增加趋势明显。其中,南方丘陵带 58% 区域降雨增幅在 0%—10% 之间,42% 区域年降水增加达 10%—20%,主要分布在南方丘陵带西部。川滇-黄土高原地区降雨变化分布不均,63% 区域降水升高,以升高 0%—10% 为主,主要分布在黄土高原和川滇屏障区北部。全区降水减少的区域主要分布在黄土高原中部地区和川滇屏障区南部。

(2) 2000—2015 年植被盖度的变化

由图 4 可见,南方丘陵区植被盖度整体高于川滇-黄土高原区,两区域 2015 年较 2000 年相比,植被盖度整体有显著提升。2015 年南方丘陵 68% 区域植被盖度增加,其中 24% 的区域植被盖度增加超过 10%,主要分布在西部区域;东部则以植被盖度降低为主,部分区域植被盖度降低幅度超过 10%。川滇-黄土高原 74% 的区域植被盖度增加,其中 46% 的区域增加超过 10%,主要分布在黄土高原区;植被盖度降低主要见于川滇屏障区,其中四川省境内降雨量最高的耕地和建筑区域植被盖度降低程度最高。

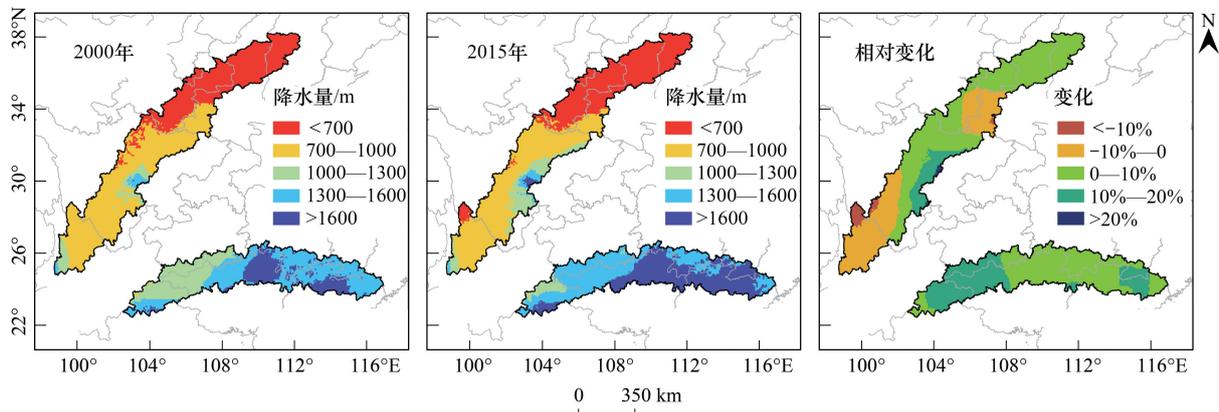


图3 2000—2015年降水量变化

Fig.3 Changes in precipitation from 2000 to 2015

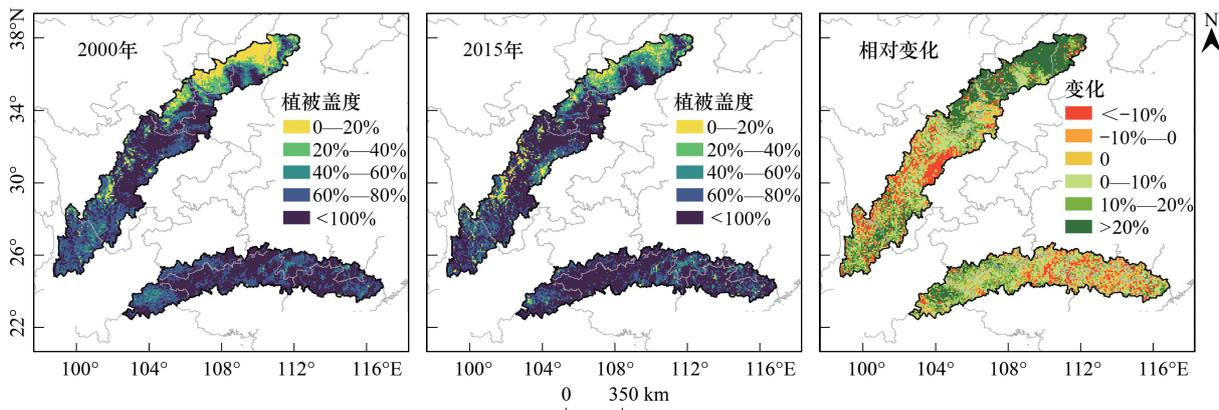


图4 2000—2015年植被盖度变化

Fig.4 Changes in vegetation coverage from 2000 to 2015

(3) 降水及植被盖度对土壤侵蚀变化的贡献率

由图5可见,植被变化对减缓黄土高原地区水土流失的贡献率高达50%—75%,而降雨的贡献率仅为0%—25%之间。川滇地区北部植被的恢复有助于缓解水土流失,贡献率达到0%—25%;而降雨带来的负面影响高于50%,导致了川滇北部水土流失的加重。川滇地区南部在植被和降水变化的共同积极作用下,水土流失缓解,其中降水的贡献率达到50%—75%,植被变化的贡献率在0%—25%之间。

南方丘陵带整体植被变化有缓解水土流失的作用,积极贡献率在0%—25%之间;但其东南区域伴有植被变化带来的水土流失恶化。而南方丘陵带除中部地区外,大部分区域降雨的变化加剧了水土流失,其负面贡献率在50%以上,从而导致南方丘陵带很大区域的水土流失恶化。整体而言,除四川盆地人口密集区外,两个研究区域植被变化均为缓解水土流失产生了积极作用,其中,黄土高原地区贡献率突出高达50%以上;而降雨的变化则成为四川境内、南方丘陵部分地区水土流失恶化的主要因素。

2.2 不同未来气候场景下2050年研究区水土流失变化趋势

2.2.1 不同未来气候情景下的研究区在2050年的降雨量变化

图6可见,在RCP2.6和RCP4.5的气候情景下,2050年两个研究区域均以降水量减少为主,仅少部分区域出现上升趋势,且上升幅度均小于10%。两个研究区在RCP4.5场景下降雨减幅整体均大于RCP2.6的降雨减幅,且整体空间分布规律大致相似。川滇-黄土高原区域在RCP2.6场景下,58%的地区降雨减幅在0%—

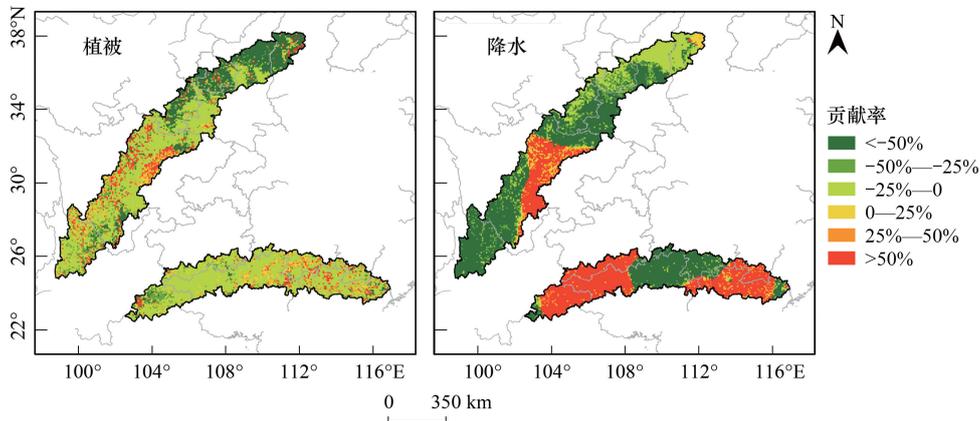


图 5 降水及植被盖度对土壤侵蚀变化的贡献率

Fig.5 The contribution of precipitation and vegetation to soil erosion change from 2000 to 2015

10%之间,主要分布在山西和四川省境内;32%区域降雨增加 0%—10%之间,主要分布在川滇-黄土高原带的北部、中部和南部;全区仅 1%区域降雨减幅达到 10%—20%,分布在四川盆地范围内。在 RCP4.5 的场景下,61%区域减幅在 0%—10%之间,11%区域减幅达到 10%—20%,28%区域为降雨增长区域,其主要分布趋势与 RCP2.6 场景相似。南方丘陵带在 RCP2.6 情景下,全区 86%的区域降雨降幅在 0%—10%,14%降幅为 10%—20%,主要分布在研究带的南部。在 RCP4.5 情景下,南方丘陵带东部有 5%区域降雨上升 0%—10%之间,其他地区呈下降趋势。

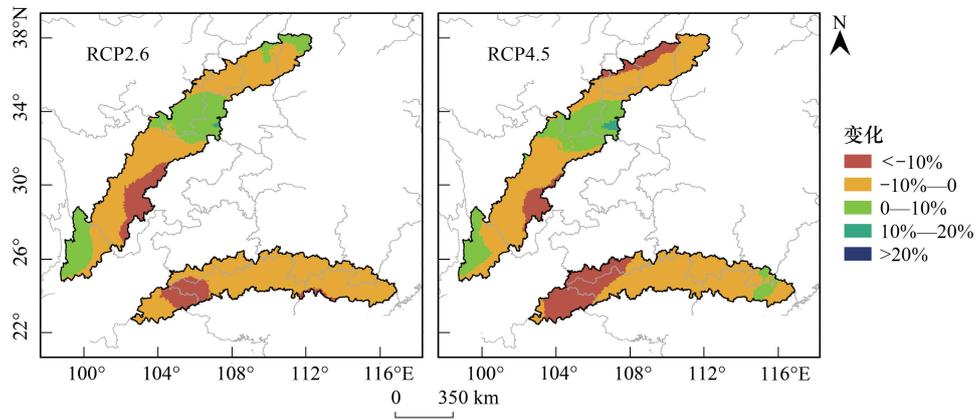


图 6 RCP2.6 和 RCP4.5 气候变化情景下 2050 年降雨量较 2015 年的变化

Fig.6 Changes in precipitation from 2015 to 2050 under RCP2.6 and RCP4.5 climate change scenarios

2.2.2 不同未来气候情景下的研究区在 2050 年的土地利用变化趋势

由表 3 可见,在不同未来情景下,南方丘陵均有森林、草地和湿地向耕地转化的趋势。其中,RCP4.5 情景下,预计将有更多的森林、草地和湿地转变为耕地,但整体上仍以森林、耕地为主要土地利用方式。川滇-黄土高原地区在不同场景则均有草地面积大幅度减小,并向耕地和森林转化的趋势。

2.2.3 未来气候变化条件下研究区水土流失的变化

由图 7 可见,在未来气候条件下,研究区水土流失的变化存在较大的空间异质性。不同气候情景下,南方丘陵带 2050 年土壤侵蚀均较 2015 年有所缓解,其中,RCP4.5 情景下,土壤侵蚀缓解程度更高。南方丘陵带在 RCP2.6 气候情景下有 37%区域土壤侵蚀缓解 0—10%之间,62%区域缓解 10%—20%;在 RCP4.5 情景下,

36%区域缓解 0%—10%,43%区域缓解 10%—20%,16%区域缓解 20%—30%。川滇-黄土高原区在不同气候情景下,2050 年均出现大部分地区土壤流失缓解,伴有部分地区土壤流失恶化的趋势,且 RCP4.5 情景下,水土流失缓解程度相对更高。在 RCP2.6 情景下,64%的区域侵蚀缓解,分别为 26%区域缓解 0%—10%,17%区域缓解 10%—20%,11%区域缓解 20%—30%,主要分布在四川省境内。在 RCP4.5 情景下,72%区域侵蚀缓解,分别为 35%区域缓解 0%—10%,32%区域缓解 10%—20%,5%区域缓解 20%—30%,主要分布在四川省和黄土高原区域。

表 3 2015 和 2050 年土地利用类型百分比的变化

Table 3 Percentage of different land use types in 2015 and 2050

区域 Region	时间/气候场景 Time/climate scenario	森林 Forest	草地 Grassland	耕地 Cropland	湿地 Wetland	其他 Other land use
南方丘陵 Southern Hilly Mountain region	2015 年	77.35	5.06	14.96	1.01	1.57
	RCP2.6 2050 年	71.11	1.4	25.56	0.77	0.71
	RCP4.5 2050 年	69.19	0.95	27.93	0.77	0.71
川滇-黄土高原 Sichuan-Yunnan-Loess Plateau region	2015 年	61.08	18.77	16.57	0.53	3.02
	RCP2.6 2050 年	65.61	3.36	29.01	0.47	1.26
	RCP4.5 2050 年	65.21	2.38	30.29	0.47	1.34

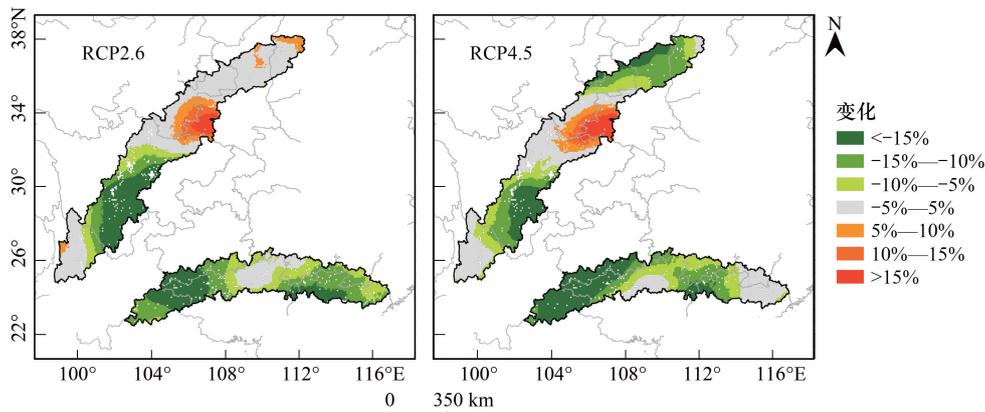


图 7 RCP2.6 和 RCP4.5 气候变化情景下 2050 年土壤侵蚀较 2015 年的变化

Fig.7 Changes in soil erosion from 2015 to 2050 under RCP2.6 and RCP4.5 climate change scenarios

2.2.4 未来土地利用变化和气候变化共同作用下研究区水土流失的变化

由图 8 可见,在土地利用和气候变化的双重影响下,两个研究区在不同气候情景下,2050 年土壤侵蚀程度较 2015 年整体以缓解为主,伴有局部地区恶化(黄土高原地区);且在 RCP4.5 情景下,两个研究区的土壤侵蚀缓解程度均更高。南方丘陵带在 RCP2.6 气候情景下,26%区域土壤侵蚀缓解 0%—10%之间,42%区域缓解 10%—20%;在 RCP4.5 情景下,26%区域缓解 0%—10%,29%区域缓解 10%—20%,9%区域缓解 20%—30%。川滇-黄土高原区在 RCP2.6 情景下,36%的区域侵蚀缓解,分别为 17%区域缓解 0%—10%,12%区域缓解 10%—20%,7%区域缓解 20%—30%,主要分布在四川省境内;此外,28%地区土壤侵蚀恶化 0%—20%间,主要分布在黄土高原地区。在 RCP4.5 情景下,57%区域侵蚀缓解,分别为 23%区域缓解 0%—10%,16%区域缓解 10%—20%,3%区域缓解 20%—30%;此外,全区 42%区域侵蚀恶化,主要分布在黄土高原地区。

3 讨论

3.1 黄土高原植被恢复是缓解土壤侵蚀的主要驱动力

黄土高原地区的植被恢复促使 2015 年较 2000 年相比土壤侵蚀明显改善,这与黄土高原地区已有相关研

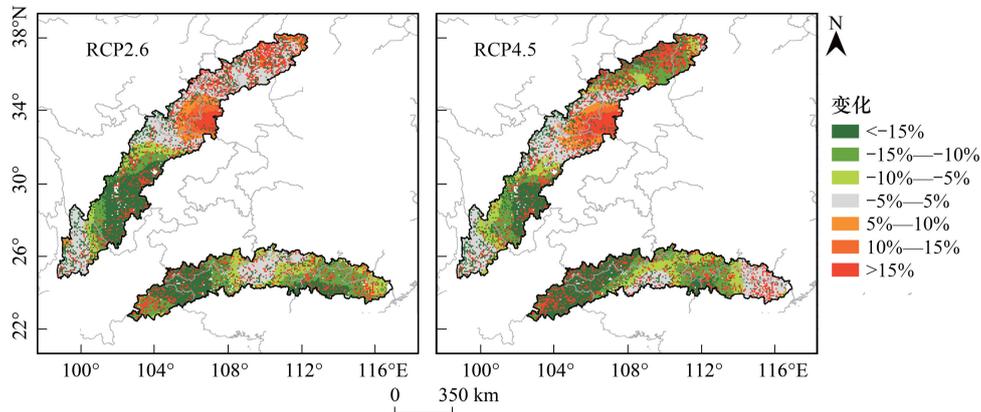


图8 土地利用及 RCP2.6 和 RCP4.5 气候变化情景下 2050 年土壤侵蚀较 2015 年的变化

Fig.8 Changes in soil erosion from 2015 to 2050 under RCP2.6 and RCP4.5 climate change scenarios combined with land use change scenario

究^[28-33]结果一致。该地区植被盖度显著升高(大于 20%),从而大幅度降低了作物覆盖与经营因子,整体共同提高了植被盖度对缓解降雨侵蚀的贡献(50%—75%)。2000—2015 年间,该区域降雨量虽稍有增加,但并未引起较程度的水土流失。此外,黄土高原大部分地区植被盖度升高达 20%以上,显著高于同一时段其他研究区植被盖度的提升比例,说明黄土高原人为植被恢复工程为水土流失的改善带来了重要动力。在未来气候场景下,降雨量降低将继续缓解土壤侵蚀的作用。然而,考虑到土地利用变化的复合作用后,草地面积大比例向农田转换将有可能导致土壤侵蚀的恶化。因此,在未来黄土高原的水土流失防控过程中,应注意维持森林和草地在黄土高原的覆盖面积,维持植被盖度的稳定增长,籍以维持或缓解目前的水土流失状况。同时也应该意识到,当该区域的植被覆盖度普遍高于 40%之后,植被覆盖度增加对水土保持的边际效果会显著减少^[34],反而会显著增加区域的水资源消耗^[35]。伴随植被的恢复,尽管没有明显的降水减少,黄土高原在 2000—2010 年期间出现(2.4±0.9) mm/a 的土壤水分损失和(0.5±0.3) mm/a 的径流损失^[36]。另外,有些流域的地下水位也呈现显著的下降趋势。假如这种干旱趋势持续下去,现行的人工灌溉成本将显著增加,必将影响区域的水资源安全,进而威胁植被恢复的可持续性。因此,在未来降雨减少的情况下,可适当通过提高草地的比例,既发挥维持地表盖度对缓解水土流失的作用,也减少该地区的生态用水,维护水资源安全。

3.2 加强川滇地区和南方丘陵带农田水土保持措施

与 2000 年相比,2015 年川滇地区云南省土壤侵蚀有所改善,但人口和耕地密集的四川省北部侵蚀大幅度恶化(大于 50%),川西南土壤侵蚀有很大改善,此结果与已有相关研究结果基本一致^[37]。降雨和植被盖度的双重作用导致了该区域土壤侵蚀的恶化(大于 50%)。研究时段内,该土壤侵蚀恶化区域内降雨升高达到 10%—20%,增加了降雨侵蚀力,同时很多地区植被盖度降低,从而共同导致了水土流失的恶化。该区域与降雨丰富的耕地、建筑用地重合,而坡耕地又是四川等紫色土区土壤侵蚀的主要来源^[38-39],这表明耕作等人因素应当是加剧该地区水土流失的重要因素之一。在未来气候情景下,该区域降水增幅变小,且南部有降雨减少的趋势,有助于缓解土壤侵蚀。但土地利用的变化可能使该区域部分地区的土壤侵蚀继续恶化。

与 2000 年相比,2015 年南方丘陵带的湖南省和江西省境内土壤侵蚀加剧,南方丘陵带西部土壤侵蚀有所缓解,这与此前陈思旭和叶馨等学者对湖南、江西等省份的相关研究结果相似^[37,40]。其中土壤侵蚀恶化的主要成因是降水增加对水土流失带来的负面贡献(50%—75%)大于植被盖度增高带来的正面贡献(0%—25%)所导致。在不同未来气候场景下,南方丘陵的降水以降低趋势为主,这将大大减小南方丘陵带的主要水土流失动力。此外,为防止水土流失的恶化,应防止该地区土地由森林、草地和湿地向耕地转化。

针对川滇和南方丘陵带,建议通过巩固退耕还林还草工程的成果,继续保持植被盖度的稳定增长,以缓解

未来由地表覆盖因素带来的土壤侵蚀;并通过提高坡耕地整治和坡面水系配套为主的小流域综合治理及分区优化治理,加强流域上游区域的水源涵养能力。

3.3 模拟结果的不确定性

尽管 RUSLE 已经在国内广泛使用,我们也必须认识到方法和数据的局限性。首先,本研究主要关注每个单元格由于气候或植被引起的潜在土壤侵蚀变化,并未从水文连通性的角度考虑单元格之间的相互影响,更没有考虑沟谷侵蚀,河岸侵蚀和重力侵蚀等^[41]。因此本研究的土壤侵蚀量一定程度上会远远大于实际的泥沙观测值,进而不适于直接利用站点的泥沙观测数据进行验证。尽管已经有基于水文过程空间联系过程概念构建的模型,然而这些模型的经验参数较为敏感,需要大量的观测数据进行率定以获得可靠的模拟结果^[42]。其次,RUSLE 各因子的计算,尤其是降水侵蚀因子和人为因素相关的因子的计算并没有统一的方法,可能造成研究结果较大的不确定性。降水侵蚀因子作为土壤侵蚀的主要动力,其准确性对模拟的结果至关重要,然而在川滇高海拔地区由于观测困难,空间插值的降水数据一定程度上并不能反映这些区域的实际情况^[43]。本研究中 P 因子和未来的 C 因子基于土地类型进行赋值。这种简化处理可能会使有些地区的模拟结果与其他研究存在较大的差异。例如,本研究并没有对不同的农田类型进行划分,而有些研究基于不同的坡度对不同的农田类型进行了更加详细的划分,从而仅从 P 的赋值上就会引起 20%—40% 的模拟结果差异^[20]。此外,在未来土地利用数据的选用上,虽然曹敏等^[27]利用 2010 年实际土地利用数据对 GCAM-CA 复合模型进行了验证,保障了其结果的准确性。但未来气候变化和政策上的复杂性会使不同研究方法获得的土地利用结果存在差异,进而影响本研究的结果。因此,未来的研究中可以考虑使用不同模型的土地利用模拟结果来减少不确定性。尽管研究结果对具体某一时间点实际水土流失状况的估算存在不确定性,本研究在模拟潜在土壤侵蚀量时间尺度上的变化上具有很大的可信度。未来相关研究可考虑提高参数的计算精度,探讨大尺度考虑水文过程空间联系的模型检验可行性等方向提高水土流失模拟的精度。

4 结论

本文分析了 2000—2015 年川滇-黄土高原、南方丘陵带水土流失时空变化格局及其驱动力,预测了在不同未来气候变化和土地利用变化情景下 2050 年水土流失的变化趋势。研究发现:黄土高原地区在降雨、植被覆盖和土地利用的多重因素综合作用下,水土流失显著缓解。未来气候变化带来的降雨减少有助于土壤侵蚀的持续缓解,但需要预防未来干旱趋势对现有植被恢复可持续性和水资源安全的影响,以及农田面积增加带来的土壤侵蚀压力。建议适当提高草地在土地利用类型中的占比并且加强坡耕地整治等措施。川滇地区的西南部在植被盖度增加和降水减少的共同作用下水土流失缓解最为显著,但四川省境内人口密集区农田面积的增加以及降水的增加造成水土流失大幅度加剧。南方丘陵带因降雨驱动部分区域水土流失恶化。未来气候情景下川滇地区和南方丘陵带土壤侵蚀以缓解趋势为主,但需要通过维持地表盖度、加强坡耕地保水保土耕作法等措施缓解土地利用带来的水土流失压力。

参考文献 (References):

- [1] 林祚顶,李智广. 2018 年度全国水土流失动态监测成果及其启示. 中国水土保持, 2019, (12): 1-4.
- [2] Pruski F F, Nearing M A. Climate-induced changes in erosion during the 21st century for eight U.S. locations. *Water Resources Research*, 2002, 38(12): 34-1-34-11.
- [3] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, Lugato E, Ballabio C, Alewell C, Meusburger K, Modugno S, Schütt B, Ferro V, Bagarello V, Van Oost K, Montanarella L, Panagos P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 2017, 8: 2013.
- [4] Nearing M A, Pruski F F, O'neal M R. Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 59(1): 43-50.
- [5] Li Z Y, Fang H Y. Impacts of climate change on water erosion: a review. *Earth-Science Reviews*, 2016, 163: 94-117.
- [6] 崔可. 南方丘陵地区不同植被覆盖模式下水土保持效益的对比分析. *水土保持应用技术*, 2019, (4): 19-22.
- [7] 孙见伟. 基于 InVEST 模型的都昌县土地利用/覆被变化产水效应研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2018.

- [8] 闫夏娇. 植被盖度对水土保持功效的影响. 山西水土保持科技, 2019, (3): 9-10.
- [9] Yan R, Zhang X P, Yan S J, Chen H. Estimating soil erosion response to land use/cover change in a catchment of the Loess Plateau, China. *International Soil and Water Conservation Research*, 2018, 6(1): 13-22.
- [10] Feng X M, Wang Y F, Chen L D, Fu B J, Bai G S. Modeling soil erosion and its response to land-use change in hilly catchments of the Chinese Loess Plateau. *Geomorphology*, 2010, 118(3/4): 239-248.
- [11] Zhang Z Y, Sheng L T, Yang J, Chen X A, Kong L L, Wagan B. Effects of land use and slope gradient on soil erosion in a red soil hilly watershed of southern China. *Sustainability*, 2015, 7(10): 14309-14325.
- [12] Nearing M A, Jetten V, Baffaut C, Cerdan O, Couturier A, Hernandez M, Le Bissonnais Y, Nichols M H, Nunes J P, Renschler C S, Souchère V, van Oost K. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. *CATENA*, 2005, 61(2/3): 131-154.
- [13] Yang D W, Kanae S, Oki T, Koike T, Musiak K. Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes. *Hydrological Processes*, 2003, 17(14): 2913-2928.
- [14] 陈洪松, 冯腾, 李成志, 付智勇, 连晋姣, 王克林. 西南喀斯特地区土壤侵蚀特征研究现状与展望. 水土保持学报, 2018, 32(1): 10-16.
- [15] Dai Y J, Wei N, Yuan H, Zhang S P, Shangguan W, Liu S F, Lu X J, Xin Y F. Evaluation of soil thermal conductivity schemes for use in land surface modeling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2019, 11(11): 3454-3473.
- [16] 胡文敏, 周卫军, 余宇航, 包春红, 谢红霞. 基于 RS 和 USLE 的红壤丘陵区小流域水土流失量估算. 国土资源遥感, 2013, 25(3): 171-177.
- [17] 朱立安, 李定强, 魏秀国, 张会化. 广东省土壤可蚀性现状及影响因素分析. 亚热带水土保持, 2007, 19(4): 4-7, 16-16.
- [18] 赵舒怡, 宫兆宁, 刘旭颖. 2001—2013 年华北地区植被覆盖度与干旱条件的相关分析. 地理学报, 2015, 70(5): 717-729.
- [19] Stanford University. InVEST 模型参数数据集.[2021-01-20]. <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>.
- [20] 黄杰, 姚志宏, 查少翔, 肖培青, 王勃. USLE/RUSLE 中水土保持措施因子研究进展. 中国水土保持, 2020, (3): 37-39, 56-56.
- [21] Gao J B, Wang H, Zuo L Y. Spatial gradient and quantitative attribution of karst soil erosion in Southwest China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(12): 730.
- [22] Zeng C, Wang S J, Bai X Y, Li Y B, Tian Y C, Li Y, Wu L H, Luo G J. Soil erosion evolution and spatial correlation analysis in a typical karst geomorphology using RUSLE with GIS. *Solid Earth*, 2017, 8(4): 721-736.
- [23] 中国科学院地理科学与资源研究所. 中国 1980 年以来逐年降水量空间插值数据集. [2020-07-10]. <http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=229>.
- [24] Hutchinson M F. Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines-Part I: two dimensional smoothing of data with short range correlation. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1998, 2(2): 139-151.
- [25] 中华人民共和国土地覆被地图集编辑委员会. 中华人民共和国土地覆被地图集(1:1000000). 北京: 中国地图出版社, 2017.
- [26] WorldClim. Downscaled CMIP5 data, 30 second spatial resolution. [2020-07-10]. https://www.worldclim.org/data/v1.4/cmip5_30s.html.
- [27] Cao M, Zhu Y H, Quan J L, Zhou S, Lü G N, Chen M, Huang M X. Spatial sequential modeling and predication of global land use and land cover changes by integrating a global change assessment model and cellular automata. *Earth's Future*, 2019, 7(9): 1102-1116.
- [28] 黄婷婷, 史扬子, 曹琦, 王丽娟, 杨扬, 刘宝元. 黄土高原六道沟小流域近 30 年来土壤侵蚀变化评价. 中国水土保持科学, 2020, 18(01): 8-17.
- [29] 董蕊, 任小丽, 盖艾鸿, 何洪林, 张黎, 李沛. 基于中国生态系统研究网络的典型森林生态系统土壤保持功能分析. 生态学报, 2020, 40(7): 2310—2320.
- [30] Jiang C, Zhang H Y, Zhang Z D, Wang D W. Model-based assessment soil loss by wind and water erosion in China's Loess Plateau: dynamic change, conservation effectiveness, and strategies for sustainable restoration. *Global and Planetary Change*, 2019, 172: 396-413.
- [31] Zhao G J, Gao P, Tian P, Sun W Y, Hu J F, Mu X M. Assessing sediment connectivity and soil erosion by water in a representative catchment on the Loess Plateau, China. *CATENA*, 2020, 185: 104284.
- [32] 唐丽霞. 黄土高原清水河流域土地利用/气候变异对径流泥沙的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [33] 张琨, 吕一河, 傅伯杰, 尹礼唱, 于丹丹. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值. 地理学报, 2020, 75(05): 949-960.
- [34] Chen J, Xiao H B, Li Z W, Liu C, Wang D Y, Wang L X, Tang C J. Threshold effects of vegetation coverage on soil erosion control in small watersheds of the red soil hilly region in China. *Ecological Engineering*, 2019, 132: 109-114.
- [35] Han Z M, Huang S Z, Huang Q, Bai Q J, Leng G Y, Wang H, Zhao J, Wei X T, Zheng X D. Effects of vegetation restoration on groundwater drought in the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2020, 591: 125566.
- [36] Li Z, Coles A E, Xiao J. Groundwater and streamflow sources in China's Loess Plateau on catchment scale. *CATENA*, 2019, 181: 104075.
- [37] 叶馨. 2000—2015 年西南山地土壤侵蚀时空格局研究. 中国资源综合利用, 2019, 37(11): 176-184, 196-196.
- [38] 何淑勤, 郑子成. 浅议四川盆地丘陵区的水土保持. 水土保持研究, 2005, 12(2): 101-102, 106-106.
- [39] 鲍玉海, 丛佩娟, 冯伟, 王海燕, 贺秀斌, 田凤霞. 西南紫色土区水土流失综合治理技术体系. 水土保持通报, 2018, 38(3): 143-150.
- [40] 陈思旭, 杨小唤, 肖林林, 蔡红艳. 基于 RUSLE 模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究. 资源科学, 2014, 36(6): 1288-1297.
- [41] Renard K G, Foster, G R, Weesies G A, Porter J P. RUSLE: Revised universal soil loss equation. *Journal of soil and Water Conservation*, 1991, 46(1): 30-33.
- [42] Zhou M M, Deng J S, Lin Y, Belete M, Wang K, Comber A, Huang L Y, Gan M Y. Identifying the effects of land use change on sediment export: integrating sediment source and sediment delivery in the Qiantang River Basin, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 686: 38-49.
- [43] Xie Y, Yin S Q, Liu B Y, Nearing M A, Zhao Y. Models for estimating daily rainfall erosivity in China. *Journal of Hydrology*, 2016, 535: 547-558.