

黄土高原植被变化与恢复潜力预测

赵广举^{1,2}, 穆兴民^{1,2}, 田鹏³, 高鹏^{1,2}, 孙文义^{1,2}, 许文龙^{1,2}

(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.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;3.西北农林科技大学资源与环境学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:采用 GIS 技术与地统计方法,基于黄土高原 2000—2018 年的 MODIS 遥感影像,选取归一化植被指数探讨研究区植被时空变化特征,采用相似生境法预测黄土高原植被恢复潜力。结果表明:黄土高原 2000—2018 年低植被盖度区域面积减少,高植被盖度面积不断增加。黄河中游头道拐至龙门区间植被变化最为显著,平均增长速率为 0.015~0.050/a,其中,延河上游、清涧河及秃尾河流域的植被盖度增长速率最高,均超过了 0.015/a。受城市化影响,汾渭平原的下游干流区植被盖度显著降低。相似生境法预测黄土高原未来植被恢复潜力的空间差异性显著,东南部地区植被盖度接近或达到最大恢复潜力,无恢复空间;在丘陵沟壑区和风沙区的交错地带部分地区植被盖度较现状仍有 25%~50% 的提升潜力。由于黄土高原植被受退耕还林草工程影响,人工植被干扰强烈,受到该区降雨与水分承载力限制,未来植被恢复需调整植被类型、优化植被结构与格局,提升区域生态系统功能。本研究结果可为黄土高原未来植被恢复与水土保持规划与布局提供理论与方法支撑。

关键词: 归一化指标指数; 时空变化; 植被恢复潜力; 相似生境法; 黄土高原

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)01-0205-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2021.01.030

Prediction of Vegetation Variation and Vegetation Restoration Potential in the Loess Plateau

ZHAO Guangju^{1,2}, MU Xingmin^{1,2}, TIAN Peng³, GAO Peng^{1,2}, SUN Wenyi^{1,2}, XU Wenlong²

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

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.Institute of Soil and Water

Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100;

3.College of Natural Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: This study employed GIS and geostatistics technology to explore the spatiotemporal variations of vegetation from 2000—2018 by using the normalized vegetation index (NDVI) from MODIS images. The potential of vegetation restoration in the Loess Plateau was predicted by similar habitat method. The results showed that during 2000—2008, the area with low vegetation coverage decreased, while the area with high vegetation coverage increased in the Loess Plateau. The vegetation cover showed evident increasing rate (0.015 ~ 0.050/year) in the region between Toudaoguai and Longmen, and significant increasing (over 0.015/year) in vegetation cover were examined in the Yanhe, Qingjian and Tuwei River basin. A significant decreasing in the vegetation cover was observed in the downstream of Wei-Fen plain due to rapid urbanization. Similar habitat method indicated that the spatial difference of future vegetation restoration potential was significant, and the vegetation cover in the southeastern Loess Plateau had reached its maximum recovery potential, therefore there was no restoration space. There was still 25% ~ 50% potential for vegetation cover increasing in the cross areas of hilly gully and windy sandy areas. Due to the influence of the project of returning farmland to forest and grassland, the artificial vegetation had strong interference, and considering the limitation of the rainfall and water carrying capacity of the this region, we proposed that future vegetation restoration should focus on selecting local plant species, optimizing vegetation structure to improve ecological service functions. The results of this study could provide theoretical and methodological support for

收稿日期: 2020-05-27

资助项目: 国家自然科学基金项目(41671279); 国家重点研发计划项目(2016YFC0402401); 中国科学院“西部之光”项目(XAB2017A03)

第一作者: 赵广举(1980—), 男, 河南驻马店人, 研究员, 博士, 主要从事流域水土过程研究。E-mail: gjzhao@ms.iswc.ac.cn

通信作者: 穆兴民(1961—), 男, 陕西渭南人, 研究员, 博士, 主要从事生态水文研究。E-mail: xmmu@ms.iswc.ac.cn

future vegetation restoration and soil and water conservation in the Loess Plateau.

Keywords: normalized vegetation index; spatiotemporal variation; vegetation restoration potential; similar habitat method; Loess Plateau

植被在全球生态系统的物质和能量循环过程中起到了重要的调节作用,是生态环境变化过程的有效指示指标。归一化植被指数是目前应用最为广泛、且可通过遥感影像直接获取的反映大尺度地表植被状况与变化的指数。该指数采用遥感影像的近红外波段和红外波段反射率的比值计算,反映了植被覆盖、生物量以及叶面积指数等情况。近年来,已有研究^[1-2]通过多个数据源的 NDVI 数据分析不同区域植被变化特征,探讨其与气候变化响应,揭示其对地表水热过程、侵蚀产沙、物质循环等过程的影响。明确区域植被的时空变化特征,预测未来植被变化,是开展区域生态保护、满足国家生态文明建设重大需求的基础,对深入理解陆地生态系统演变过程、提高全球地表生态系统服务功能具有重要意义^[3]。

黄土高原水土流失严重,生态环境脆弱^[4-5]。近年来,经过大规模的水土保持治理与退耕还林草等工程治理,黄土高原下垫面尤其是植被覆盖发生了显著的变化^[6-8],由此引起黄土高原侵蚀产沙与黄河径流量与输沙量急剧锐减^[9-10]。已有研究^[11]表明,黄土高原水土保持工程措施(如梯田、淤地坝等)与植被恢复是减少坡面土壤侵蚀,拦蓄沟道泥沙,减少泥沙入黄的主要原因。尤其是 21 世纪以来,植被恢复在控制水土流失、减少入黄泥沙等方面起到了非常显著的作用^[12]。黄土高原“由黄变绿”已得到大家的公认,但该区域未来植被恢复仍是政府决策部门关心的焦点,也是黄土高原水土保持的依据。目前,已有大量研究分析黄土高原植被的历史变化,但对未来植被恢复潜力研究较少。传统的植被变化预测方法主要包括生物地球物理/化学模型和生物地理模型。较为经典的生物地球物理/化学模型包括 CENTURY、Biome-BGC、SiB、LEAF 等^[13],该类模型从植物生理学的角度出发,模拟植被与外界物质、能量等交换过程。生物地理模型多从植物地理学角度模拟气候因子对植被分布的影响,如 Biome、Doly 等模型^[14]。进入上世纪 90 年代,动态植被模型成为研究热点,国际上应用较为广泛的包括 LPJ、IBIS 等模型,这些模型大多适用于全球尺度或较大区域自然植被演替及其区域气候的适应变化,并不能很好地刻画人工植被影响强烈的生态系统^[14],同时也难以用于指导区域水土保持。本文考虑黄土高原自身特点,通过长序列遥感影像分析该区植被时空变化,采用相似生境法预测未来植被恢复最大潜力,评估不同区域植被恢复的可能性,期为黄土高原未来植被建设与水土流失治理提供科

学依据,也为黄河水沙调控提供有力支撑。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

黄土高原地处黄河上中游地区,西至青海省日月山、东至太行山、南至秦岭、北至长城,区域总面积约 62.4 万 km²(图 1)。黄土高原属于典型的温带大陆性季风气候,自南向北地跨暖温带和中温带,属半湿润半干旱地区。大部分地区年降水量介于 300~600 mm,由南部向北部逐渐递减,全年降雨少且集中,多以短历时、高强度的暴雨为主。黄土质地疏松、具有湿陷性,经人为扰动后,更易发生风力和水力侵蚀。经过长期的流水侵蚀,黄土高原逐渐形成千沟万壑、地形支离破碎的自然景观^[15]。受区域土壤、植被、降雨及地形地貌影响,加之不合理的人为开垦利用,黄土高原植被总体覆盖度较低,水土流失十分严重,是该区主要的生态环境问题之一,也是黄河下游河道淤积的主要原因。

黄土高原地处半湿润、半干旱过渡地带,随着降水量由东南向西北的减少,植被由森林向草原、荒漠逐渐过渡,具有明显的地带性规律分布。南部林区主要分布有辽东栎(*Quercus wutaishansea* Mary)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)及早生灌丛,北部以沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、白羊草(*Bosphriochloa ischaemum*)、柠条(*Caragana korshinskii* Kom)、铁杆蒿(*A. gmelinii*)等为主。

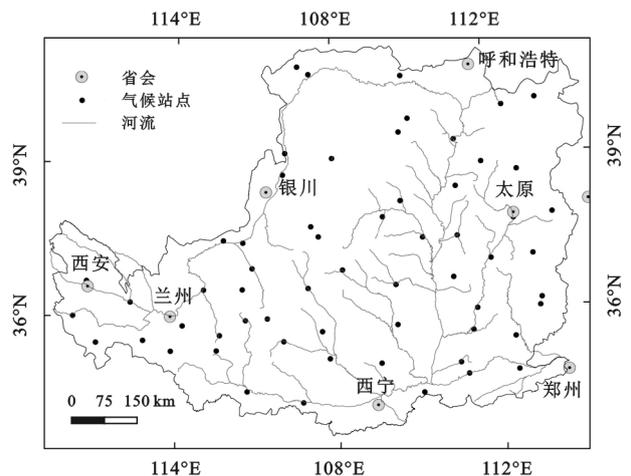


图 1 研究区地理位置

1.2 数据来源与处理

本文所采用的数据包括 3 个来源:(1)黄土高原的土地利用与土壤类型分布数据来源于黄土高原科学数据中心、气象数据包括区域内 57 个国家气象站

的降雨、气温、日照时间、风速、湿度及气压等来源于中国气象数据网;(2)黄土高原梯田与淤地坝的空间分布数据采用 Google Earth 遥感影像(2017—2018 年)的人工目视解译,并结合无人机航拍及野外实际调查验证;(3)归一化植被指数数据来源于美国宇航局(<http://ladsweb.nascom.nasa.gov>)(表 1)。

黄土高原归一化植被指数(NDVI)采用 2000—2018 年 MODIS 月最大合成数据产品(MOD13A3),其空间分辨率为 500 m。经过几何纠正、辐射校正、大气校正等进行图像预处理。采用黄土高原边界图对 NDVI 的栅格

影像剪裁,获取研究时段的月 NDVI 序列,并采用 BFAST 方法研究其变化的多组分特征^[16]。对 NDVI 月数据进行最大值合成获取年最大值,并采用线性回归模型量化研究区植被覆盖的年际变化趋势。

植被恢复潜力预测的基础数据包括黄土高原边界、研究区土地利用、侵蚀地貌分区、土壤类型空间分布、气候和植被变化。其中黄土高原地貌、植被地理分区、土壤类型空间分布图均来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据共享服务平台—黄土高原科学数据中心(<http://loess.geodata.cn>)。

表 1 研究区数据来源

指标	分辨率	时段	来源	获取地址
土地利用	30 m	2018 年	黄土高原数据科学中心	http://loess.geodata.cn/
土壤类型	1:50 万		黄土高原数据科学中心	http://loess.geodata.cn/
梯田、淤地坝	2 m	2017 年	Google Earth	
植被指数	500 m	2000—2018 年	美国宇航局	http://ladsweb.nascom.nasa.gov
植被分区	1:50 万		黄土高原数据科学中心	http://loess.geodata.cn/
DEM	30 m		美国地质调查局	https://earthexplorer.usgs.gov/
气候数据	57 站点	2000—2018 年	国家气候中心	http://data.cma.cn

1.3 植被恢复潜力预测

关于植被恢复潜力的预测,除了应用广泛的植被生长过程预测模型,研究人员^[13,17]提出多因子综合评价方法,其基本理论是考虑植被恢复目标,选取多个能够反映植被生长的指标,进行筛选,确定每个指标的权重,最终形成一个复合指标用于绘制植被恢复空间分布图。如 Bisson 等^[17]选取了土壤类型、植被盖度、坡度、地形与地质因子进行计算。考虑到植被生长的主控因素,部分研究人员^[18-20]认为,在局地气候、地貌等生境相似区,植被最终恢复形成的景观具有相似性,这种方法也被称为“相似生境法”。Zhang 等^[18]与高海东等^[20]采用相似的方法在黄土高原的局部地区开展研究,但其并未删除土地利用中耕地、梯田、城镇用地的影响。本文根据黄土高原地理、植被、土壤、地形和气候 5 大类因素进行叠加分区,每个分区均具有相似的环境要素,该分区理应能够达到相同的植被覆盖程度。在每个分区内统计该分区植被覆盖数据的平均值、90%分位数值、95%分位数值和最大值。为避免统计误差,本研究认为某一分区 95%的分位数即为该区的恢复潜力。在此基础上结合土地利用数据,评估林草分布区的植被恢复潜力。

黄土高原的地理分区主要依据其地貌特征,将其分为冲积平原区、黄土高原区、盖沙黄土丘陵区、黄土崬状丘陵区、黄土梁状丘陵区、黄土宽谷丘陵区、山间盆地黄土丘陵区、风沙丘陵区、土石丘陵区、石质山地区共 10 个分区(图 2a)。根据黄土高原植被分布将其划分为暖温带南部落叶栎林亚区、暖温带北部落叶栎林亚区、温带森林草原亚区、温带典型草原亚区、温

带荒漠草原亚区、温带草原化荒漠亚区 6 个区域。地形因素分别考虑坡度(图 2b)和坡向(图 2b),将坡度划分为 0~3°,3°~8°,8°~15°,15°~25°,25°~35°,35°~45°共 6 级(图 2c)。将坡向分为平地、阴坡、半阴坡、半阳坡和阳坡共 5 类。受搜集到的黄土高原土壤类型数据的限制,本研究在土壤类型分区中考虑了区域的土纲:新成土、雏形土、人为土、均腐土、潜育土、盐成土、淋溶土、干旱土、有机土、变性土、火山灰土共 11 大类(图 2d)。考虑植被生长受水分条件限制,采用蒸发与降水的比值作为区域干旱指数,潜在蒸发量采用 FAO 修订的 Penman-Monteith 模型,将每个站点的蒸发与降雨比值采用克里金插值获取区域干旱指数,并对其进行分区(图 2e)。

通过上述数据源获取黄土高原 NDVI,对月数据采用最大值合成法得到 2000—2018 年的 NDVI 数据,植被盖度可由下式计算:

$$VC = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (1)$$

式中:VC 为植被覆盖度;NDVI 为像元的植被指数;NDVI_{max}和 NDVI_{min}分别为研究区内 NDVI 的最大值和最小值。

将上述黄土高原的 5 类要素图层进行 GIS 地理叠加分区,获取 9 978 个分区,在每个区域内统计该区植被覆盖度数据的平均值、90%分位数、95%分位数和最大值,为避免统计误差将 95%分位数值作为该区域的植被潜力值。由此,根据现状植被盖度 VC 和植被可恢复的潜力盖度值 VC_{pvc},即可计算区域植被恢复潜力指数:

$$\text{Index} = \frac{VC_{pvc} - VC_{current}}{VC_{pvc}} \quad (2)$$

为有效计算区域的植被状况,本研究结合土地利

用数据,将耕地、水域和建筑用地等土地利用方式剔除,认为其植被覆盖度不发生变化,不计算上述 3 类区域的植被覆盖度最终获取黄土高原植被恢复潜力。

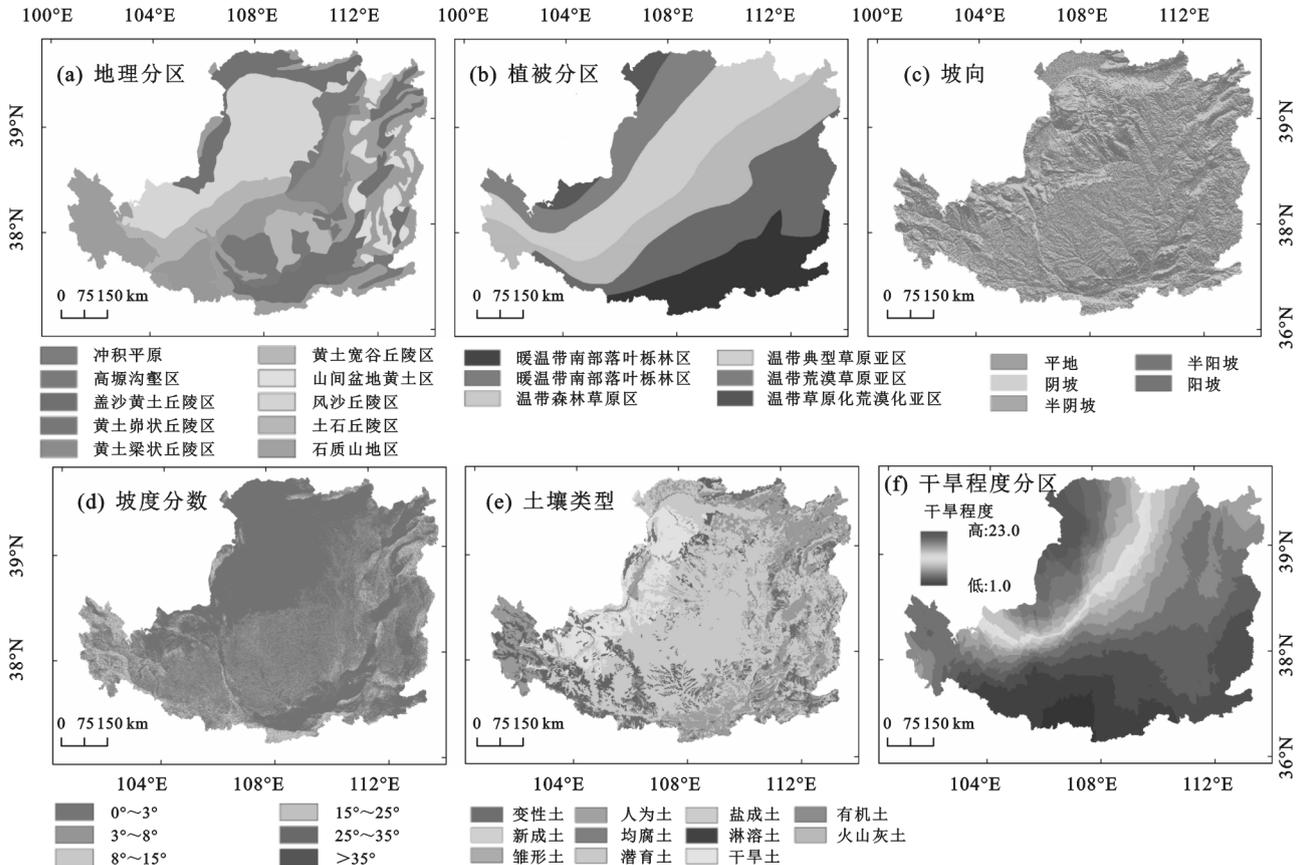


图 2 黄土高原不同要素特征分区

2 结果与分析

2.1 黄土高原植被覆盖变化

针对黄土高原 2000—2018 年 NDVI 进行最大合成,计算区域植被盖度的年际变化。由图 3a 可知,区域植被整体向好,植被盖度以年均 0.007 的速率升高($R^2 = 0.84$, $P < 0.01$)。黄土高原的年最大植

被盖度由 2000 年 46% 增长至 2018 年的 63% (图 3a)。针对 2000—2018 年的各月植被盖度进行 BFAST 分解(图 3b),结果表明,植被盖度的季节性组分并未发生明显的突变,趋势性组分与年值变化趋势一致,均呈显著增加,表明黄土高原近年来植被恢复十分显著。

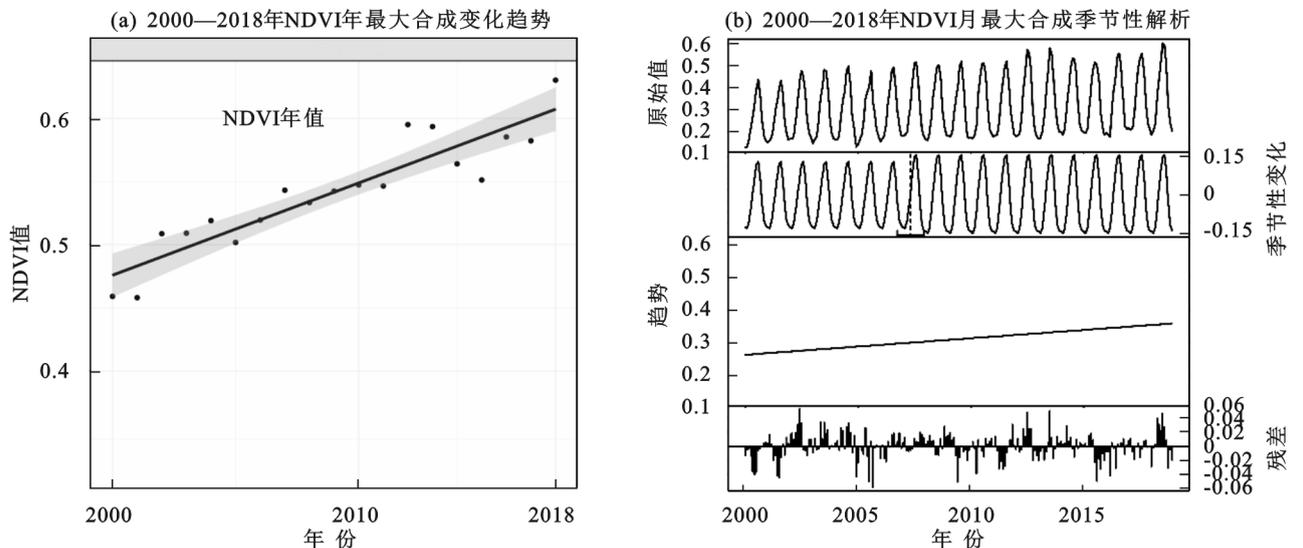


图 3 2000—2018 年黄土高原植被盖度变化特征

图 4a 为黄土高原地区 2000—2018 年植被盖度

的年变化趋势。整体而言,黄土高原植被向好的区域

集中在黄河中游河口镇至龙门区间及渭河、泾河与北洛河的上游。特别是河龙区间各支流的下游区域,植被盖度年均增长速率介于 $0.015 \sim 0.050/a$ 。采用地统计方法计算可知,河龙区间植被盖度年均增长速率为 $0.011/a$,其中延河上游、清涧河及秃尾河流域的植被盖度增长速率最高均超过了 $0.015/a$ 。比较而言,植被盖度降低的区域主要分布在汾渭平原的下游干流区,这与该地区的快速城市化密切相关。

对比黄土高原 2000 年和 2018 年 2 个不同年份的植被盖度空间分布可以看出,植被盖度变化的空间差异显著,黄土高原植被状况由东南向西北降低的格局未发生变化。

比较而言,子午岭林区、黄龙山林区及崆峒山植被增加明显。据统计,2000 年植被盖度 $>50\%$ 的区域占整个黄土高原的 42.9% ,至 2018 年,该值增加到了 75.8% 。在黄河中游的 20 余个入黄一级支流中,仕望川、云岩河、延河、北洛河流域因地处林区加之坡耕地退耕还林草实施力度大平均植被盖度最高,流域平均植被覆盖度均超过了 70% 。从黄土高原侵蚀类型区看,东部和南部的水蚀区植被覆盖增长较快,风蚀区受水分、人为干预等原因,增长相对缓慢。植被盖度的变化与 1999 年以来退耕还林(草)政策的实施密切相关,同时也与该地区社会经济发展、快速城市化等有关。

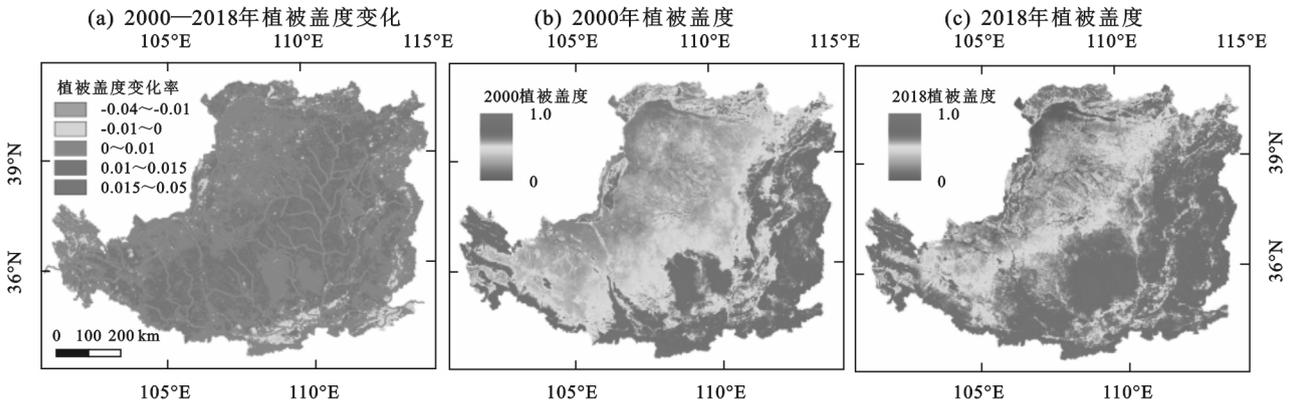


图 4 2000—2018 年黄土高原植被盖度空间变化

2.2 黄土高原植被恢复潜力变化

采用“相似生境法”预测未来黄土高原植被变化的潜力,图 5 分别为分区内不同恢复潜力(均值,90%,95%及最大值)的预测结果。整体而言,未来黄土高原植被东南高、西北低的空间分布格局仍未改变,且不同潜力值预测结果均显示林区植被盖度最高。图 5a 为恢复潜力为均值条件下植被的状况,统计发现,在此状况下,黄土高原盖度低于 50% 的区域主要分布在西北部,面积约占整个区域的 35% ,而盖度在 90% 以上的区域主要集中在子午岭与黄龙山林区。对比而言,以 90% 百分位和以 95% 百分位预测的植被空间差异较小,以最大值预测的结果显示黄土高原东南部地区植被盖度可达到 80% 以上,植被盖度 $>50\%$ 的区域约占整个黄土高原总面积的 91% 。为避免预测结果的误差,并考虑植被恢复的水分限制,本研究选取 95% 百分位作为研究区植被恢复的最大盖度潜力值。

在预测未来植被恢复潜力时,需剔除耕地、梯田、水域、建设用地等对结果的影响。因此,本文通过 2017 年 Google Earth 的遥感影像勾绘黄土高原梯田的空间分布(图 6a),并随机选取 15 个小流域采用无人机进行实地验证。通过谷歌影像勾画的梯田面积与无人机获取的数据基本一致,各个小流域梯田面积

误差均小于 5% 。由图 6a 可知,黄土高原梯田总面积为 4.73 万 km^2 ,主要分布在渭河、汾河、祖厉河、泾河、洮河、湟水等流域,面积分别为 $12\ 800, 4\ 893.5, 3\ 225.8, 3\ 159.7, 3\ 063.2, 2\ 881.7$ km^2 。其中渭河干流梯田面积所占比例最高,占到整个黄土高原梯田总面积的 27.1% 。在黄河上中游主要一级支流中,祖厉河和渭河干流梯田面积占流域面积比例最高,分别为 30.1% 和 21.9% ,其他流域均在 15% 以下。

图 6b 为 2015 年黄土高原土地利用的空间分布。据统计,黄土高原耕地、林地、草地面积分别为 $19.47, 13.14, 26.41$ 万 km^2 ,分别占全区面积的 $31.0\%, 20.9\%, 42.1\%$ 。耕地主要分布在渭河、汾河、北洛河及泾河下游平原区域,林地主要分布在子午岭、崆峒山、黄陵、吕梁等丘陵山地。

在剔除耕地、梯田、水域及建设用地的基础上,根据植被覆盖度现状与植被恢复潜力的比值,计算可得植被恢复潜力指数(图 7)。植被恢复潜力指数越接近于 1 表明现状植被盖度较低,未来植被恢复空间越大,而指数越接近于 0 则表明区域植被恢复已接近植被恢复上限。由图 7a 可知,黄土高原东部及东南部的植被覆盖已经接近或达到最大恢复潜力,潜力指数介于 $0 \sim 0.1$,这表明该区域植被已无恢复空间。黄土高原的西北部黄河沿岸(如宁蒙河段及河套平原区)的部分地区植被恢复潜

力指数较高(0.75~1.00,图 7a),该地区受引黄治沙影响植被盖度较高,因此在人工植被建设影响下,该区域仍具有较高潜力。在丘陵沟壑区和风沙区,仍有部分区域具有一定的植被恢复潜力,潜力指数介于 0.25~0.50。图 7b、c 为黄土高原 400,300 mm 雨量线由北向南的植被恢复潜力指数剖面图。对比而言,400 mm 雨量线的恢复潜力指数剖面图表明该样带植被恢复状况

较好,同时植被恢复潜力相对较低,大部分区域已经接近该区域较高的植被盖度。在 300 mm 雨量线剖面图中可以发现,北部和中部地区植被仍有一定的恢复空间,这表明该部分区域的植被状况距本计算单元的最好植被盖度仍有 25%~50%的上升空间。同时可以发现,该剖面线的南部地区由于分布着大量的梯田,属于非林草地区,无植被恢复潜力。

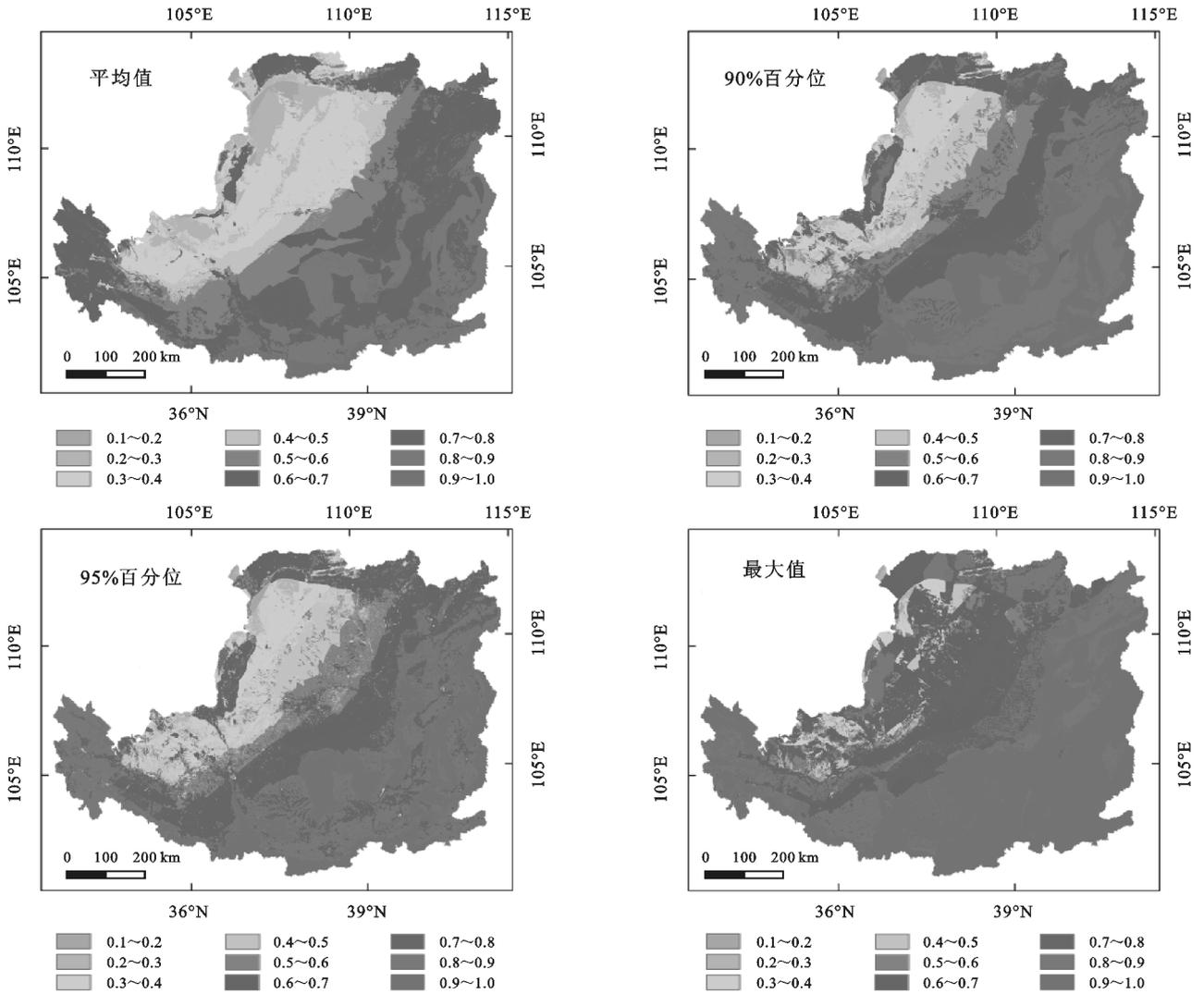


图 5 黄土高原植被恢复潜力盖度分区统计

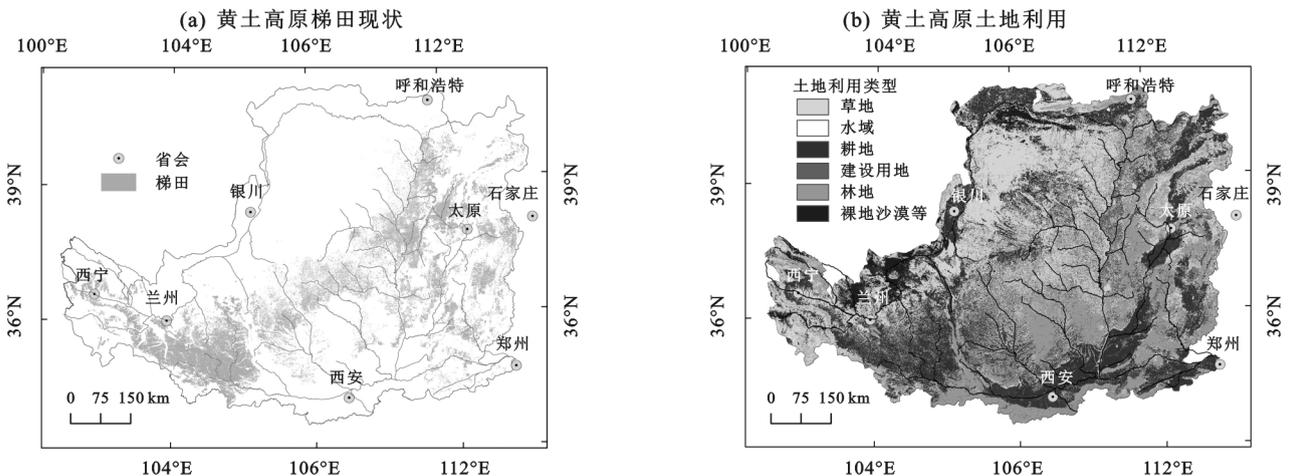


图 6 黄土高原梯田与土地利用分布情况

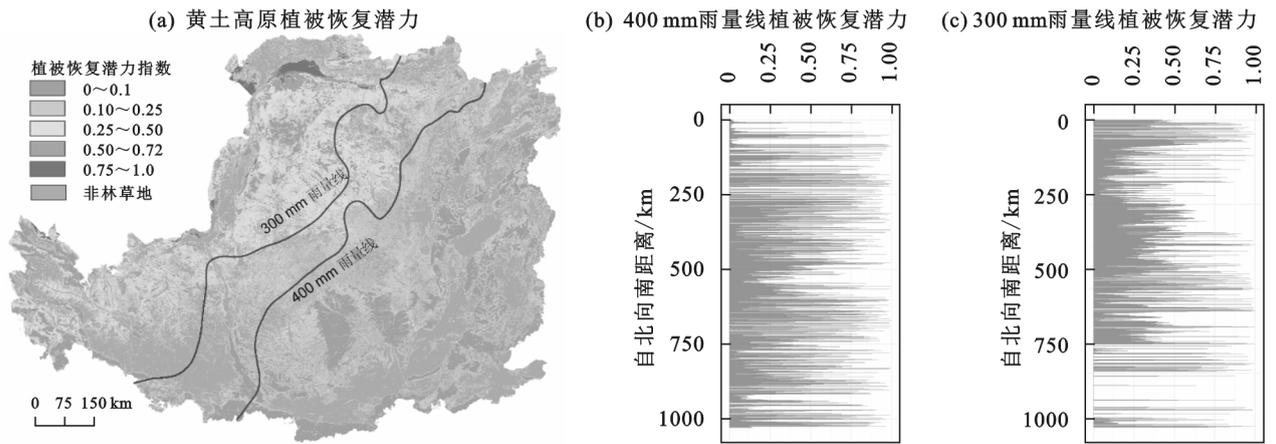


图 7 黄土高原植被恢复潜力

3 讨论

自 1999 年以来,黄土高原实施了大规模的退耕还林(草)工程,加之经济快速发展,农村人口向城镇转移,土地弃耕、撂荒面积不断增加,区域植被盖度显著增加。黄土高原大面积的人工植被恢复有效的缓解了该地区的水土流失状况,提升水土保持功能^[21]。然而,土壤水分是植被生长的直接水分来源,目前的植被恢复与布局方式可能导致土壤水分过度消耗,部分地区人工植被对土壤水分的长期消耗超出了降水的补给,土壤干层加剧。Feng 等^[1]计算了黄土高原植被恢复对河川径流、地表蒸散发的影响,结果发现,大规模的植树造林引起静初级生产力与蒸散发显著升高,受降雨与水分限制,黄土高原的部分地区已接近水资源可持续利用的上限。本研究在预测植被潜力时选择了相似生境区 95% 的百分位数进行估算,尽管该值可能超过水分承载的上限,但由于黄土高原植被受人工干预十分强烈,因此大部分地区在退耕还林草政策的持续下,通过人工干预与植被自然演替,植被盖度仍可达到预测值。预测结果发现,黄土高原东南部、中部地区植被已经达到可恢复的最大潜力,在有恢复潜力的地区,未来植被恢复应注重“分区分类、因地制宜”,明确适宜当地气候条件且水资源消耗较低的乡土物种,通过改善区域植被功能结构,优化植被格局,提升区域生态系统服务功能。

目前,针对未来植被变化预测的模型,已有研究^[14]提出了许多未来植被变化预测的方法,其中应用较为广泛为全球动态植被预测模型(DGVM),然而受到模型分辨率和建模理论的限制,模型在地形破碎的黄土高原地区的研究结果不能清晰地分辨建设用地、耕地、水域等的影响,同时预测结果只能分辨出植被类型,而对植被恢复的盖度预测能力不足^[22]。Zhang 等^[18]和高海东等^[20]采用空间分析与滑动窗口等 GIS 技术,结合遥感植被指数产品数据,评估植被

恢复潜力,该方法能够最大程度地反映植被生长的环境适应性,可在更大尺度高效的评估植被恢复潜力。此外,由于黄土高原的人工植被所占比例较大,在进行预测时不仅需要结合自然地理要素,同时也需考虑政策及已恢复的现状,因此本研究基于目前植被盖度融合了高精度的梯田与土地利用信息,筛除了耕地、建设用地、水域等的影响,结果可为黄土高原未来植被恢复与水土保持规划提供理论与方法支撑。

4 结论

(1)黄土高原 2000—2018 年植被覆盖度整体表现为由西北至东南递增,且东南部变化更为显著。研究区低植被覆盖度区域面积不断减少,高植被覆盖度面积增加,黄土高原丘陵沟壑区受退耕还林草工程影响植被恢复成效显著。黄河中游头道拐至龙门区间植被变化增长率高于其他地区,平均增长速率介于 0.015~0.050/a。植被显著提升的流域主要分布在渭河上游、北洛河中上游、延河及无定河流域。比较而言,植被盖度降低的区域主要分布在汾渭平原的下游干流区,这与该地区的快速城市化密切相关。

(2)黄土高原未来植被恢复潜力的空间差异性显著,东南部地区植被盖度可达到 80% 以上,该区已基本接近最大恢复潜力,未来没有恢复空间;黄土高原植被恢复潜力较高的地区主要集中在丘陵沟壑区和风沙区的交错地带(300 mm 雨量线)的区域,该部分区域植被恢复仍有 25%~50% 的上升空间。

本研究基于黄土高原植被恢复现状,考虑区域植被生长的环境要素,结合人工干预,评估了未来植被恢复的最大潜力,研究结果对该地区植被恢复具有重要的理论意义。在指导实践的过程中不仅需考虑植被盖度,还需优化植被结构与生态功能,提高水资源利用效率,维持黄土高原生态系统平衡,在明确植被耗水规律、不加刷土壤干层化的条件下,构建因地制宜的植被恢复模式与空间配置格局。

参考文献:

- [1] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [2] Hao H G, Li Y Y, Zhang H Y, et al. Spatiotemporal variations of vegetation and its determinants in the National Key Ecological Function Area on Loess Plateau between 2000 and 2015 [J]. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(10): 5810-5820.
- [3] Song X P, Hansen M C, Stehman S V, et al. Global land change from 1982 to 2016 [J]. *Nature*, 2018, 560(7720): 639-643.
- [4] Zhao G J, Mu X M, Jiao J Y, et al. Evidence and causes of spatiotemporal changes in Runoff and Sediment Yield on the Chinese Loess Plateau [J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28: 579-590.
- [5] Zhang S L, Yang D W, Yang Y T, et al. Excessive afforestation and soil drying on China's Loess Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123(3): 923-935.
- [6] Guo W Q, Yang T B, Dai J G, et al. Vegetation cover changes and their relationship to climate variation in the source region of the Yellow River, China, 1990—2000 [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(7): 2085-2103.
- [7] Zhao A Z, Zhang A B, Lu C Y, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage before and after implementation of Grain for Green Program in Loess Plateau, China [J]. *Ecological Engineering*, 2017, 104: 13-22.
- [8] 刘晓燕, 杨胜天, 王富贵, 等. 黄土高原现状梯田和林草植被的减沙作用分析 [J]. *水利学报*, 2014, 45(11): 1293-1300.
- [9] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38-42.
- [10] Sun P C, Wu Y P, Gao J N, et al. Shifts of sediment transport regime caused by ecological restoration in the Middle Yellow River Basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 698: e134261.
- [11] 梁越, 焦菊英. 河龙区间退耕还林前后淤地坝拦沙特征分析 [J]. *生态学报*, 2019, 39(12): 4579-4586.
- [12] Fu B J, Liu Y, Lu Y H, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China [J]. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284-293.
- [13] Sitch S, Smith B, Prentice I C, et al. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model [J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 161-185.
- [14] 王旭峰, 马明国, 姚辉. 动态全球植被模型的研究进展 [J]. *遥感技术与应用*, 2009, 24(2): 246-251.
- [15] Zhao G J, Mu X M, Wen Z M, et al. Soil erosion, conservation, and eco-environment Changes in the Loess Plateau of China [J]. *Land Degradation & Development*, 2013, 24(5): 499-510.
- [16] Verbesselt J, Hyndman R, Newnham G, et al. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(1): 106-115.
- [17] Bisson M, Fornaciai A, Coli A, et al. The vegetation resilience after fire (VRAF) index: Development, implementation and an illustration from central Italy [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2008, 10(3): 312-329.
- [18] Zhang D J, Xu X, Yao S B, et al. A novel similar habitat potential model based on sliding-window technique for vegetation restoration potential mapping [J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31: 760-772.
- [19] Nauman T W, Duniway M C, Villarreal M L, et al. Disturbance automated reference toolset (DART): Assessing patterns in ecological recovery from energy development on the Colorado Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 584: 476-488.
- [20] 高海东, 庞国伟, 李占斌, 等. 黄土高原植被恢复潜力研究 [J]. *地理学报*, 2017, 72(5): 863-874.
- [21] Lü Y H, Fu B J, Feng X M, et al. A policy-driven large scale ecological restoration: Quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China [J]. *PLoS One*, 2012, 7(2): e31782.
- [22] Peng S Z, Li Z. Incorporation of potential natural vegetation into revegetation programmes for sustainable land management [J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(10): 3503-3511.