

黄土高原潜在自然植被空间格局及其生境适宜性

韩庆功¹, 彭守璋²

(1.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100;
2.西北农林科技大学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)

摘要: 植被生态系统的恢复越来越多地受到全球各界关注,潜在自然植被(potential natural vegetation, PNV)和生境适宜性概念应纳入植被规划,作为植被恢复的参考依据。基于高空间分辨率气候数据,使用动态植被模型(LPJ-GUESS),揭示黄土高原 2001—2020 年 PNV 空间格局及其生境适宜性的动态演变,并界定了植被优先恢复区。结果表明:黄土高原的 PNV 以草地和森林为主,潜在草地主要集中在北部、西北部地区(约占 73.23%),潜在森林主要分布在南部地区(约占 26.16%),极少的裸地主要分布在西部高海拔山区;在潜在森林中,温带落叶阔叶林、寒温带常绿针叶林、温带常绿针叶林占比分别为 22.28%,3.88%,0.01%;随着气候变化的推进,潜在森林面积有所下降,而潜在草地面积有些许增加。PNV 的生境适宜性呈现西北低、南部及东南高的分布,其中,分布在黄土高原南部平原地带的潜在温带落叶阔叶林其生境适宜性较高,而分布在北部及东北部的潜在草地其生境适宜性较低;并且,对于每种 PNV 类型,其最高生境适宜性所占据的地理空间及优先恢复区有较大差异。研究结果可为黄土高原植被恢复重建提供科学依据。

关键词: 植被恢复; 潜在自然植被; 生境适宜性; LPJ-GUESS 模型; 黄土高原

中图分类号: S157.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)05-0188-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.05.026

Spatial Pattern and Habitat Suitability of Potential Natural Vegetation in the Loess Plateau

HAN Qinggong¹, PENG Shouzhang²

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Global concern about the restoration and reconstruction of vegetation ecosystems has increased, thus the concepts of potential natural vegetation (PNV) and habitat suitability should be integrated into revegetation programs to achieve sustainable ecosystems. Based on high spatial resolution climate data, this study revealed the dynamic evolution of spatial pattern and habitat suitability of PNV during 2001—2020 in the Loess Plateau (LP) using a dynamic vegetation model (LPJ-GUESS), and identified the vegetation priority restoration area. The results showed that the main PNV in the LP were grassland and forest, and potential grassland was mainly distributed in the north and northwest regions (about 73.23% of LP area), while potential forest was mainly located in the south (about 26.16% of LP area), and very few barren ground was mainly distributed in the western high-altitude mountains. Among the potential forests, temperate deciduous broad-leaved trees, cold temperate evergreen coniferous forest and temperate evergreen coniferous trees accounted for about 22.28%, 3.88% and 0.01%, respectively. With the advance of climate change, the area of potential forest had decreased, while the area of potential grassland had increased slightly. The habitat suitability of PNV was low in the northwest, high in the south and southeast. The potential temperate deciduous broad-leaved trees distributed in the southern plain of the LP had higher habitat suitability, while the potential grassland distributed in the northern and northeastern LP had lower habitat suitability. For each kind of PNV, the geographical space and priority restoration area occupied by its highest habitat suitability were sig-

收稿日期: 2021-04-10
资助项目: 国家自然科学基金项目(42077451); 中国工程院重大战略咨询研究项目(2020NXZD7); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2020BCF01001)
第一作者: 韩庆功(1996—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事植被生态恢复与环境保护研究。E-mail: qingdaohqg@163.com
通信作者: 彭守璋(1986—), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事区域气候变化及恢复生态研究。E-mail: szp@nwsuaf.edu.cn

nificantly different. These reaserch results could provide a scientific basis for vegetation restoration and re-construction in the Loess Plateau.

Keywords: vegetation restoration; potential natural vegetation; habitat suitability; LPJ—GUESS model; the Loess Plateau

植被建设是区域生态安全 and 高质量发展的重要保障^[1]。自 1999 年国家退耕还林(草)工程实施以来,我国植被覆盖面积显著增加^[2]。然而,植被建设往往采用单一物种,且过度追求植被覆盖面积的增加,形成规模较大的密度高、结构简单、生产力低的植被体系^[3],并造成土壤干燥化现象和水资源短缺^[4],尤其在干旱半干旱地区,严重阻碍了植被体系生态功能的永续发挥。因此,中国植被建设不能再局限于植被覆盖面积的增加,而需要构建与环境相适应的植被体系。

潜在自然植被 (potential natural vegetation, PNV) 作为无人类活动干扰状态下植被在立地环境中完成全部演替序列所形成的自然植被^[5],可作为植被建设的参照依据,对生态环境修复与自然保护区规划有指导作用^[6]。现有研究^[7]更多偏向对 PNV 空间格局的探索,并以此为植被建设提供参照。然而,从植被恢复成本和恢复成效的角度出发,在给定的 PNV 分布区内,哪些地方对植被生长更适宜,在植被恢复后可以收获高的成效? 并且,在成本有限条件下恢复植被时,哪些地方可以划分为优先恢复区? 这些实际问题往往被忽略。因此,有必要开展 PNV 生境适宜性及优先恢复区方面研究,这对区域植被建设策略的制定具有重要参考价值。

目前,研究 PNV 的方法可分为基于数理统计的物种分布模型和基于机理过程的动态植被模型。物种分布模型先是构建自然植被信息与环境变量(如地形、气候、土壤等)之间的数学关系,然后将该关系映射到地理空间上,以此获得 PNV 的空间分布^[8]。相比物种分布模型,动态植被模型可模拟出与自然环境相符的自然植被,可合理预测 PNV 对自然环境变化的动态响应^[9]。另外,除了 PNV 的空间格局,动态植被模型还可模拟出 PNV 的生产力,而植被生产力是气候、土壤和 CO₂ 浓度共同作用的结果,因此,可将模型模拟的潜在生产力作为代用指标量化 PNV 的生境适宜性。其中,LPJ—GUESS 模型既考虑了大尺度植被动态的机理过程,又引入了林窗模型和斑块概念细化植被动态,可在物种和植物功能型 2 个水平上模拟分析 PNV 动态^[10]。

黄土高原地区由于缺乏对林草种类选择及其结构配置的科学论证,尽管该区林草覆盖率显著增加,但已恢复植被逐渐暴露出衰败、功能低下等问题,影响了该区生态安全。已有不少研究^[11-12]对该区 PNV 空间分布及其对气候变化响应进行了分析。然而,这

些研究仅停留在 PNV 的空间格局上,未对 PNV 的生境适宜性做深入研究。基于此,本研究使用 LPJ—GUESS 模型在黄土高原开展 PNV 空间格局及其生境适宜性的研究,界定植被优先恢复区,为该区提供适应气候变化的植被恢复依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于中国北部(图 1),该区植被破坏严重,自然植被仅存于干扰较少或保护封禁的立地环境。该区属内陆干旱和半干旱气候条件,年均降水量为 96~1 466 mm,年均气温 4~12 ℃;该区年降水量在西部地区以 0.24~3.52 mm/10 a 的速率显著增加,年均温在整个地区以 0.1 ℃/10 a 的速率显著上升^[13]。从东南到西北,该区植被分布依次为森林带、森林草原过渡带、草原带;并且,由于西部的海拔落差大,植被分布在海拔梯度上表现出明显的地带性规律。因而,该区有着丰富的植被类型,分布较广的植被类型有温带落叶阔叶林(如辽东栎、栓皮栎、山杨、白桦、杨树、刺槐)、温带常绿针叶林(如侧柏、油松)、寒温性常绿针叶林(如青杆、青海云杉、祁连圆柏)、寒温性常绿灌木(如头花杜鹃)以及草本植物(如白羊草、黄背草、苔草)。

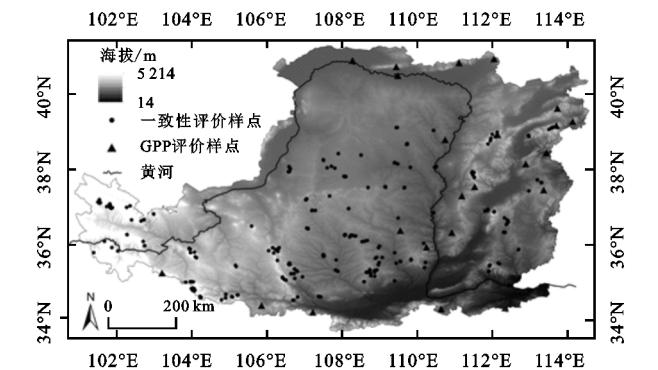


图 1 黄土高原地理位置及样地分布

1.2 数据收集

LPJ—GUESS 模型在模拟 PNV 时需要月尺度的均温、降水和云量气候数据、年尺度的大气 CO₂ 浓度以及土壤质地作为输入^[10]。其中,气候数据来自黄土高原科学数据中心(<http://loess.data.ac.cn>),时间范围是 2001—2020 年,空间分辨率为 1 km^[14];年大气 CO₂ 浓度数据将从夏威夷 Mauna Loa 站(<http://co2now.org>)获取,数据时间段为 2001—2020 年;研究区 1 km 分辨率的土壤质地数据将从全球土

壤数据中心(<http://soilgrids.org>)获取。

1.3 模型运行与评价

模型模拟将在 1 km 分辨率的网格上逐一进行。在每个地理网格上,LPJ-GUESS 模型将循环使用 CO₂ 浓度和气候数据从裸地开始模拟,模型首次运行了 300 年,驱使植被与土壤的碳库和氮库都达到动态平衡的状态。然后,将此状态下的碳氮数值作为网格的起始条件,结合其余 CO₂ 浓度和气候数据,连续模拟每种 PNV 类型的碳生物量和总初级生产力(GPP),时间尺度为年。在每个地理网格上,将会呈现适合该网格环境条件的多个植物功能型及每个植物功能型相应的模拟值。PNV 空间格局的确定采用 Wolf 等^[15]的分类标准,具体分类细节见表 1。

尽管 LPJ-GUESS 模型在模拟植被格局及其生产力对气候变化的响应方面具有较高的可靠性^[10,15],但为了提高模型在黄土高原地区的模拟精度,本研究确定了决定植被分布的生物气候学参数以及一些生态生理参数。生物气候学参数的确定是将植被分布和生物气候数据进行空间叠置分析,进而提取每个植被类型的生物气候学参数,如最冷月的最低

生存温度与最高生存温度、最暖月的最低生存温度参数以及>5℃的积温参数;黄土高原植被分布数据和生物气候学变量分别来自黄土高原科学数据中心(<http://loess.geodata.cn>)与国家生态科学数据中心(<http://www.cnern.org.cn>)。确定的生态生理参数包括最大树冠面积、木材密度、细根和边材 C/N,它们是通过实地调查获取植被样本,并在实验室分析获得。其余生态生理参数参考了以往研究中相同或类似植物功能型的模型参数^[11,16]。

为进一步评价 LPJ-GUESS 模型在黄土高原模拟 PNV 格局及植被生产力的精度,本研究通过野外调查获取了该区典型植被(如温带落叶阔叶林、寒温性常绿针叶林、草地)样点 323 个,样点内植被均为人类活动干扰较少的自然植被。样点上的植被类型将与模拟的 PNV 图进行空间叠置,使用 Kappa 系数来评价两者间的空间一致性。另外,选取了 23 个封育的林草样点,根据其地理位置在 MODIS 的 GPP 产品(<https://modis.gsfc.nasa.gov/>)中,提取了 2001—2020 年 GPP 数据,用于评价模型在模拟植被生产力方面的精度,评价指标采用相关系数和纳什系数。

表 1 LPJ-GUESS 模型的植物功能型分类

植物功能型	模型分类	主要物种
寒温性常绿针叶林	>85%的碳生物量由木本植物组成且木本植物中碳生物量>75%	青海云杉,青杆,祁连圆柏
温带常绿针叶林	>85%的碳生物量由木本植物组成且木本植物中碳生物量>75%	油松,侧柏
温带落叶阔叶林	>85%的碳生物量由木本植物组成且木本植物中碳生物量>75%	辽东栎,栓皮栎,山杨,白桦
寒温性常绿灌木	碳生物量>50%	头花杜鹃
C3 草地	>50%的碳生物量由草本植物组成	白羊草,黄背草,苔草
裸地	碳总生物量<0.02 kg C/m ²	

1.4 生境适宜性及优先恢复区界定

本研究采用植被生产力即 GPP 量化 PNV 生境适宜性,具体是统计模型模拟的 2001—2020 年 GPP 的平均值 GPP_{avg},对 GPP_{avg} 进行归一化处理,作为植被生境适宜性指数(IHS),表达式为:

$$IHS = \frac{GPP_{avg} - \min(GPP_{avg})}{\max(GPP_{avg}) - \min(GPP_{avg})} \quad (1)$$

式中: max(GPP_{avg}) 和 min(GPP_{avg}) 分别为潜在植被分布区内最大和最小的 GPP_{avg} (kg C/m²)。IHS 的范围为 0~1,数值越大表示环境因素(如气候、大气 CO₂ 浓度及土壤)越有利于植物生长。

在界定植被优先恢复区时,首先利用实际调查的 323 个点位提取 PNV 的 IHS,并对这些点上的 IHS 值做平均,以此表示黄土高原地区植被生长的平均状态;然后以此平均状态值作为临界值,在 PNV 的 IHS 空间图上识别高于临界值的区域,即植被优先恢复区,并且对该区域内的 IHS 进行自然断点划分,界定出低度、中度、高度植被优先恢复区。

2 结果与分析

2.1 模型模拟精度评价

将黄土高原典型植被样点与模拟的 PNV 图进行空间叠置,计算的 Kappa 系数为 0.63(表 2),表明模拟结果与实测点植被类型有着高度的一致性^[17],说明 LPJ-GUESS 模型在模拟黄土高原 PNV 空间格局方面性能较好。由表 3 可知,在模拟温带落叶阔叶林、温带常绿针叶林、寒温性常绿针叶林、C3 草地样地上,模型模拟与遥感观测的 GPP 之间具有很好的统计结果,如各植被类型上纳什系数平均值分别为 0.69,0.67,0.59,0.48,且相关系数平均值均在 0.8 以上,说明 LPJ-GUESS 模型在模拟黄土高原植被生产力方面具有较高的精度^[18]。

2.2 黄土高原潜在自然植被时空格局

2001—2020 年,黄土高原潜在森林覆盖率为 26.16%,其中潜在寒温性常绿针叶林主要分布在祁连山东段边缘区、宁夏南部的六盘山地区、山西西部的吕梁山及东北部的五台山地区,海拔在 1 024~

3 861 m;潜在温带落叶阔叶林主要分布在黄土高原南部大部分地区,海拔在 57~2 692 m;潜在草地主要分布在黄土高原中北部,占 73.23%,海拔范围在 79~4 525 m。潜在温带常绿针叶林、潜在寒温性常绿灌木以及裸地等其他类型,占研究区面积的 0.61% (图 2)。各植被类型的空间分布和面积反映了黄土高原土地覆盖的适宜格局。另外,本研究在年尺度上统计了各 PNV 面积占比的变化(图 3),2001—2020 年潜在森林面积从 27.17%下降到了 26.17%,其中潜在温带落叶阔叶林减少的面积比例最大,而潜在草地面积占比由 71.98%增加到了 73.50%。

表 2 LPJ-GUESS 模型模拟 PNV 空间格局的精度

模型模拟	实际调查			总计
	温带落叶阔叶林	寒温性常绿针叶林	草地	
温带落叶阔叶林	70	6	28	104
寒温性常绿针叶林	7	71	23	101
草地	8	7	103	118

表 3 LPJ-GUESS 模型模拟各植物功能型 GPP 的精度

植物功能型	纳什系数	相关系数
温带落叶阔叶林	0.69±0.03	0.88
温带常绿针叶林	0.67±0.02	0.90
寒温性常绿针叶林	0.59±0.06	0.89
C3 草地	0.48±0.06	0.84

注:表中数据为平均值±标准差。

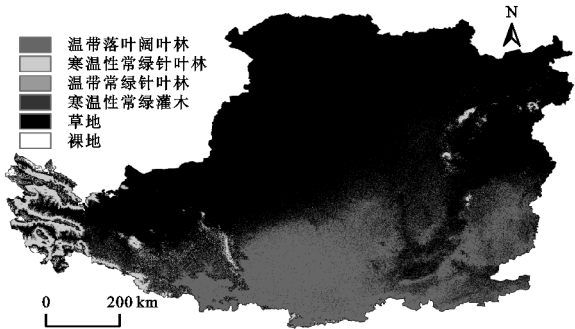


图 2 2001—2020 年黄土高原潜在自然植被空间格局

2.3 黄土高原潜在自然植被生境适宜性

生境适宜性指数在 0.8~1.0 范围内的高生境适宜性区域主要分布在研究区南部,对应 PNV 主要为潜在温带落叶阔叶林;生境适宜性指数在 0.6~0.7, 0.7~0.8 的区域主要集中在黄土高原西部、南部以及东南部大部分区域,对应 PNV 主要为潜在温带落叶

阔叶林和潜在寒温性常绿针叶林;生境适宜性指数在 0.5~0.6 范围内的区域主要分布在潜在草地和潜在温带落叶阔叶林的植被过渡带;在 0~0.1, 0.1~0.5 范围内的低生境适宜性区域主要分布在祁连山东段边缘区和黄土高原北部及东北部地区,对应的主要 PNV 分别为裸地和潜在草地(图 4)。

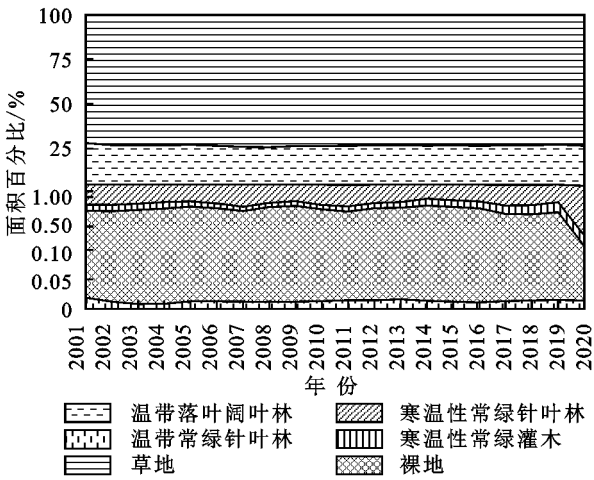


图 3 2001—2020 年各潜在自然植被类型逐年面积占比

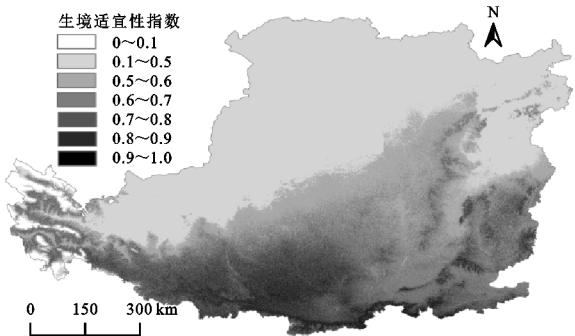


图 4 2001—2020 年黄土高原潜在自然植被生境适宜性空间格局

由表 4 可知,潜在温带落叶阔叶林在 0.7~0.8 范围内所占面积比例最大,占比为 39.73%,在 0.6~0.7 范围内所占面积比例次之,占比为 32.73%;潜在寒温性常绿针叶林在 0.5~0.6, 0.6~0.7, 0.7~0.8 范围内所占面比例分别为 20.63%, 42.06%, 27.26%;潜在草地主要在 0.1~0.5, 0.5~0.6, 0.6~0.7 范围内分布,所占面积比例分别为 61.84%, 21.31%, 11.04%;潜在温带常绿针叶林主要在 0.6~0.7, 0.7~0.8 范围内分布,而潜在寒温性常绿灌木主要在低生境适宜性指数(0~0.1, 0.1~0.5)范围内分布。

表 4 植物功能型在各生境适宜性级别下所占面积比例

单位: %

植物功能型	0~0.1	0.1~0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.8	0.8~0.9	0.9~1.0
温带落叶阔叶林	0	0.01	4.62	32.73	39.73	21.60	1.31
寒温性常绿针叶林	0	4.52	20.63	42.06	27.26	5.37	0.16
温带常绿针叶林	0	0	0	20.69	72.41	6.90	0
寒温性常绿灌木	21.20	78.80	0	0	0	0	0
草地	1.16	61.84	21.31	11.04	3.80	0.83	0.02

2.4 黄土高原植被优先恢复区

在黄土高原地区,潜在寒温性常绿针叶林、潜在温带落叶阔叶林和潜在草地所占面积较大,根据公式(1)计算 3 种植物功能型的生境适宜性指数(图 5)。其中,潜在寒温性常绿针叶林在中高海拔地区生境适宜性较高,而在低海拔地区则低;潜在温带落叶阔叶林生境适宜性较高的区域分布在黄土高原南部,而在植被过渡带区域生境适宜性较低;潜在草地由北至南生境适宜性逐渐升高,且在黄土高原西部和西南部及西北部生境适宜性较低。

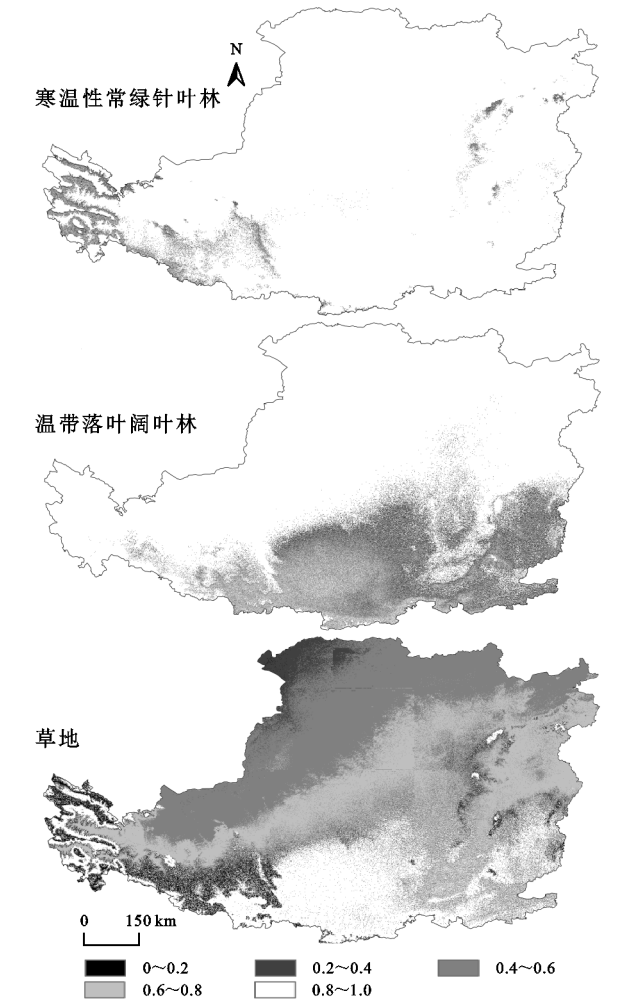


图 5 2001—2020 年主要植物功能型生境适宜性空间格局

按照植被优先恢复区划分(图 6 和表 5),潜在寒温性常绿针叶林优先恢复区主要分布在祁连山东段边缘区以及六盘山的高海拔地区,其低度、中度、高度优先恢复区面积占比分别为 18.22%,15.29%,7.31%。潜在温带落叶阔叶林优先恢复区主要集中在黄土高原南部的较低海拔地区,其低度、中度、高度优先恢复区面积占比分别为 21.16%,19.46%,11.46%。草地的低度优先恢复区主要分布在黄土高原的植被过渡带,面积占比约为 13.78%;中度优先恢复区分布在植被过渡带的南部地区,面积占比约为 9.79%;高度优先恢复区主要分布

在东南部的低海拔地区,在西南部和东部的高海拔地区有较少分布,面积占比约为 2.59%。

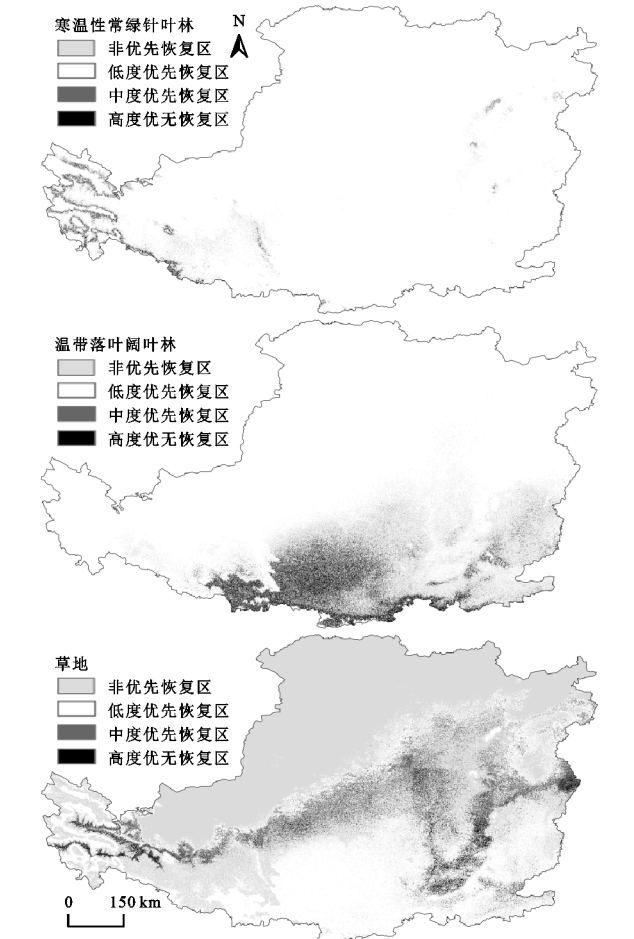


图 6 2001—2020 年主要植物功能型优先恢复区

表 5 主要植物功能型优先恢复区占各自潜在分布区面积比例

植物功能型	单位: %		
	低度优先恢复区	中度优先恢复区	高度优先恢复区
寒温性常绿针叶林	18.22	15.29	7.31
温带落叶阔叶林	21.16	19.46	11.46
草地	13.78	9.79	2.59

3 讨论

黄土高原横跨湿润、半湿润、半干旱、干旱地区,降水与气温由东南向西北逐渐减少,从而导致该区水热条件具有明显的地带性分布规律^[19],近 30 年,黄土高原大部分地区年均温呈上升趋势,且干旱程度与干旱频率也呈上升趋势。本研究模拟出的 PNV 格局与黄土高原的水热条件具有较好一致性(图 2)。Li 等^[20]模拟的 1950—2000 年黄土高原植被类型的空间格局表明,草地主要分布在黄土高原中北部大部分地区,寒温性树种主要分布在祁连山区东段边缘、六盘山、吕梁山、五台山等高海拔地区及黄土高原东南部,温带树种主要分布在黄土高原南部地区,无植被生长的区域主要集中在西北部及祁连山区东段边

缘。这与本文的研究结果相近,但各植物功能型及其空间格局有一定差异,这是由于研究所采用的模型、驱动模型的气候数据、分类标准及研究时段不同导致的。Peng 等^[21]模拟的 1981—2014 年黄土高原各 PNV 类型逐年面积占比表明,潜在森林面积占比下降,且潜在温带落叶阔叶林减少面积比例最大,潜在草地面积占比增加,这与本文研究结果相吻合;其 PNV 空间格局显示,除裸地外共有 6 种植物功能型,本研究没有模拟出温带落叶灌木,且各植物功能型的空间格局与面积占比也有些许不同,这与研究时段不同以及模型首次运行所采用的 CO₂ 浓度和气候数据的时间段不同有关。

植被生境适宜性的估算及优先恢复区的划分有很大的现实意义。Hirzel 等^[22]、Bean 等^[23]使用物种分布模型模拟 PNV 空间格局时,将物种的存在概率作为评价 PNV 生境适宜性的指标,但他们也指出,在短时间尺度和小范围下,其准确性有很大的不确定性;Peng 等^[24]通过构建生态位模型模拟了祁连山区青海云杉的潜在分布及生境适宜性,并对其划分了优先恢复区与保护区。然而,上述研究在量化生境适宜性时所采用的环境变量主要是气候因子,忽略了土壤与大气 CO₂ 浓度的影响,并且未考虑这些因子的协同作用及其对生境适宜性的动态影响。目前,对于黄土高原地区 PNV 生境适宜性估算及植被优先恢复区划分的研究相对缺乏。本研究采用 LPJ—GUESS 模型模拟的 GPP 量化了 PNV 的生境适宜性,并就模型在模拟植被生产力方面进行了评价(表 3),表明模型在模拟 GPP 时有较高的精度。此方法可较好地解决上述缺陷,而且不同植物功能型之间的 GPP 具有可比性,即不同植物功能型之间的生境适宜性具有可比性,那么该思路用于不同 PNV 类型生境适宜性的比较研究具有参考价值。

4 结论

潜在寒温性常绿针叶林主要在祁连山东段边缘区、六盘山、吕梁山及五台山等中高海拔地区分布,潜在温带落叶阔叶林主要分布在南部以及东南部地区,潜在草地主要分布在中北部及西北部地区。2001—2020 年,潜在森林面积占比从 27.17%下降至 26.17%,其中潜在温带落叶阔叶林减少的面积比例最大,潜在草地面积占比由 71.98%增加至 73.50%。

研究区西北部和西部高海拔地区生境适宜性低,南部及东南部相对较平缓的地区生境适宜性较高,潜在草地的生境适宜性较潜在森林的生境适宜性低。潜在寒温性常绿针叶林生境适宜性指数在 0.6~0.7 范围内所占面积比例最大,为 42.06%;潜在温带落叶阔叶林主要集中在 0.6~0.9 范围内,在

0.7~0.8 范围内所占比例最大,为 39.73%;潜在草地生境适宜性较低,在 0.1~0.5 范围内所占面积比最大,为 61.84%。

从植被恢复成本角度出发,在祁连山东段边缘区以及六盘山的高海拔地区进行植被恢复时可优先考虑寒温性常绿针叶林,其高度、中度、低度优先恢复区面积比例分别为 7.31%,15.29%,18.22%。在黄土高原南部的较低海拔地区进行植被恢复时可优先考虑温带落叶阔叶林,其高度、中度、低度优先恢复区面积比例分别为 11.46%,19.46%,21.16%。在黄土高原中部、西南部及东南部进行植被恢复时可考虑草地,其高度、中度、低度优先恢复区面积比例分别为 2.59%,9.79%,13.78%。

参考文献:

- [1] 沈国舫.植被建设是我国生态环境建设的主题:兼论黄土高原地区的植被建设[C]//中国林学会.西北地区生态环境建设研讨会.北京:中国林业出版社,2000:20-24.
- [2] Li J J, Peng S Z, Li Z. Detecting and attributing vegetation changes on China's Loess Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247: 260-270.
- [3] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, et al. Balancing green and grain trade[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 739-741.
- [4] 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.
- [5] Tüxen R. Die heutige potentielle natürliche Vegetation als Gegenstand der Vegetationskartierung [J]. *Berichte zur deutschen Landeskunde*, 1956, 19: 200-246.
- [6] 刘华民,吴绍洪,郑度,等.潜在自然植被研究与展望[J]. *地理科学进展*, 2004, 23(1): 62-70.
- [7] 赵传燕,冯兆东,南忠仁,等.黄土高原祖厉河流域潜在植被分布模拟研究[J]. *地理学报*, 2007, 62(1): 52-61.
- [8] 彭守璋,赵传燕,许仲林,等.黑河上游祁连山区青海云杉生长状况及其潜在分布区的模拟[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(6): 605-614.
- [9] 车明亮,陈报章,王瑛,等.全球植被动力学模型研究综述[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(1): 263-271.
- [10] Hickler T, Vohland K, Feehan J, et al. Projecting the future distribution of European potential natural vegetation zones with a generalized, tree species-based dynamic vegetation model[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2012, 21(1): 50-63.
- [11] Peng S Z, Yu K L, Li Z, et al. Integrating potential natural vegetation and habitat suitability into revegetation programs for sustainable ecosystems under future climate change[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 269: 270-284.

[10] Zeppel M J B, Murray B R, Barton C, et al. Seasonal responses of xylem sap velocity to VPD and solar radiation during drought in a stand of native trees in temperate Australia[J].Functional Plant Biology,2004,31(5):461-470.

[11] 罗紫东,关华德,章新平,等.亚热带樟树树干液流通量变化规律[J].热带地理,2016,36(4):658-665.

[12] 李景刚,李纪人,黄诗峰,等.基于 TRMM 数据和区域综合 Z 指数的洞庭湖流域近 10 年旱涝特征分析[J].资源科学,2010,32(6):1103-1110.

[13] 戴军杰,章新平,吕殿青,等.南方红壤丘陵区樟树林土壤水分动态变化[J].水土保持研究,2019,26(4):123-131.

[14] 戴军杰,章新平,罗紫东,等.长沙地区典型树木蒸腾对环境因子的响应及模拟[J].长江流域资源与环境,2021,30(3):699-711.

[15] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J].Tree Physiology,1987,3(4):309-320.

[16] Dingman S L. Physical hydrolog[M].Illinois: Waveland Press,2015:28-86.

[17] Oishi A C, Hawthorne D A, Oren R. Baseline: An open-source, interactive tool for processing sap flux data from thermal dissipation probes[J].SoftwareX,2016,18(5):139-143.

[18] Wang H L, Doerthe T, Chris S. Hysteretic response of sap flow in Scots pine (*Pinus sylvestris*) to meteorological forcing in a humid low-energy headwater catchment[J].Ecohydrology,2019,12(6):1-31.

[19] 陈琪,李远航,王琼琳,等.基于 Penman-Monteith 模型分时段模拟华北落叶松日蒸腾过程[J].中国水土保持科学,2019,17(5):54-64.

[20] 王尚涛.干旱绿洲区农田葡萄树蒸散耗水及水分利用策略研究[D].兰州:兰州大学,2019.

[21] Bai Y, Li X Y, Liu S M, et al. Modelling diurnal and seasonal hysteresis phenomena of canopy conductance in an oasis forest ecosystem[J].Agricultural and Forest Meteorology,2017,246:98-110.

[22] Chen L X, Zhang Z Q, Li Z D, et al. Biophysical control of whole tree transpiration under an urban environment in Northern China[J].Journal of Hydrology,2011,402(3/4):388-400.

[23] Bai Y, Zhu G F, Su Y H, et al. Hysteresis loops between canopy conductance of grapevines and meteorological variables in an oasis ecosystem[J].Agricultural and Forest Meteorology,2015,214/215:319-327.

[24] 姚增旺,褚建民,吴利禄,等.民勤绿洲荒漠过渡带梭梭树干液流的时滞特征[J].应用生态学报,2018,29(7):2339-2346.

[25] Xu S Q, Yu Z B. Environmental control on transpiration: A case study of a desert ecosystem in northwest China[J].Water,2020,12(4):1-16.

(上接第 193 页)

[12] Peng S Z, Li Z. Potential land use adjustment for future climate change adaptation in revegetated regions[J].Science of the Total Environment,2018,639:476-484.

[13] 任婧宇,彭守璋,曹扬,等.1901—2014 年黄土高原区域气候变化时空分布特征[J].自然资源学报,2018,33(4):621-633.

[14] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J].Earth System Science Data,2019,11(4):1931-1946.

[15] Wolf A, Callaghan T, Larson K. Future changes in vegetation and ecosystem function of the Barents Region[J].Climatic Change,2007,87:51-73.

[16] Smith B, Wårlind D, Arneth A, et al. Implications of incorporating N cycling and N limitations on primary production in an individual-based dynamic vegetation model[J].Biogeosciences,2014,11(7):2027-2054.

[17] 杨冰.基于不同分类方法土地利用/覆盖分类精度分析[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2008.

[18] 胡胜,曹明明,邱海军,等.CFSR 气象数据在流域水文模拟中的适用性评价:以灞河流域为例[J].地理学报,2016,71(9):1571-1586.

[19] 徐丽萍.黄土高原地区植被恢复对气候的影响及其互动效应[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2008.

[20] Li G Q, Wen Z M, Guo K, et al. Simulating the effect of climate change on vegetation zone distribution on the loess plateau, Northwest China: Forests[J].2015,6(6):2092-2108.

[21] Peng S Z, Li Z. Incorporation of potential natural vegetation into revegetation programmes for sustainable land management[J].Land Degradation and Development,2018,29(10):3503-3511.

[22] Hirzel A H, Le Lay G. Habitat suitability modelling and niche theory[J].Journal of Applied Ecology,2008,45(5):1372-1381.

[23] Bean W T, Prugh L R, Stafford R, et al. Species distribution models of an endangered rodent offer conflicting measures of habitat quality at multiple scales[J].Journal of Applied Ecology,2014,51(4):1116-1125.

[24] Peng S Z, Zhao C Y, Xu Z L, et al. Restoration and conservation potential of destroyed Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) forests in the Qilian Mountains of northwest China[J].Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,2016,21(2):153-165.