

# 西安至延安高速铁路沿线黄土区植被的承载力评价

钟泽华<sup>1</sup>, 杜鹤强<sup>2</sup>, 范亚伟<sup>2,3</sup>

(1. 中铁二十一局集团有限公司, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院, 干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** [目的] 精准评价西安市至延安市高速铁路(西延高铁)植被承载力, 为研究区生态修复和西延高铁建设沿线边坡防护提供理论依据和数据支撑。[方法] 以西延高铁沿线黄土区为研究对象, 综合考虑研究区气候条件、土壤质地、植被类型、坡度和坡向对承载力的影响, 利用植被与土壤含水量的关系, 量化了研究区当前的植被承载力。[结果] ① 尽管区域植被覆盖整体呈改善趋势(显著上升区域占 73.6%), 西延高铁沿线却以稳定和显著退化区为主, 突显了工程建设对局部生态的潜在压力; ② 全区植被承载力上界为 18.60%~100.00%, 下界为 4.40%~100.00%, 约 77% 的区域超出承载力阈值。中西部黄土梁峁沟壑区与北部子午岭低中山区普遍超载, 需实施以水土保持和现状维持为导向的低干扰策略; 南部渭河平原、黄土台塬及部分北部区域仍低于承载力下限, 建议采取工程避让与植被补植相结合的措施。[结论] 在西延高铁沿线进行护坡植被建设时, 应以当地植被承载力为约束条件, 合理控制植被密度。

**关键词:** 西延高铁; 黄土区; 边坡生态防护; 土壤水分; 植被承载力

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2025)06-0369-11

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 钟泽华, 杜鹤强, 范亚伟. 西安至延安高速铁路沿线黄土区植被的承载力评价[J]. 水土保持通报, 2025, 45(6): 369-379. Zhong Zehua, Du Heqiang, Fan Yawei. Evaluation of vegetation carrying capacity in loess regions along Xi'an-Yan'an high-speed railway [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(6): 369-379.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.037

CSTR: 32312.14.stbctb.2025.06.037

## Evaluation of vegetation carrying capacity in loess regions along Xi'an-Yan'an high-speed railway

Zhong Zehua<sup>1</sup>, Du Heqiang<sup>2</sup>, Fan Yawei<sup>2,3</sup>

(1. China Railway 21st Bureau Group Co. LTD, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. State Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** [Objective] The vegetation carrying capacity of Xi'an-Yan'an high-speed railway (abbreviated as 'XiYan HSR') corridor was accurately evaluated, in order to provide a theoretical basis and data support for overall ecological restoration and slope protection along the construction route of this railway. [Methods] The loess regions along the XiYan HSR corridor were taken as study areas. The current vegetation carrying capacity were quantified by integrating the effects of climate, soil texture, vegetation type, slope gradient, and aspect, with particular emphasis on the relationship between vegetation growth and soil water content. [Results] ① Although regional vegetation coverage showed an overall improving trend (with 73.6% of the area experiencing significant increases), the area in the vicinity of the XiYan HSR was found to be dominated by stable or substantially degraded zones, thereby highlighting the potential ecological pressure induced by railway construction. ② The upper and lower bounds of vegetation carrying capacity across the region range from 18.60% to 100.00% and 4.40% to 100.00%, respectively. Moreover, approximately 77% of the area was found to exceed the carrying-capacity threshold. Specifically, the loess ridge-gully region in the central-west and the

收稿日期: 2025-07-03

修回日期: 2025-08-31

采用日期: 2025-09-02

资助项目: 西延高铁工程科技研究课题“西延高铁黄土路基边坡绿色生态防护关键技术研究”(西延高铁合(2021)31号)

第一作者: 钟泽华(1992—), 男(汉族), 内蒙古自治区包头市人, 学士, 工程师, 主要从事高速公路铁路建设与生态恢复方面等工作。Email: 1615580830@qq.com。

通信作者: 杜鹤强(1982—), 男(汉族), 河北省深泽县人, 博士, 研究员, 主要从事荒漠化地表过程研究。Email: dilikexue119@163.com。

Ziwuling low-mid-mountain areas in the north were generally overloaded, necessitating low-intervention strategies focused on soil conservation and maintenance of the current state. In contrast, the southern Weihe Plain, parts of the northern loess tableland, and some northern areas remain below the lower bound, for which measures such as engineering avoidance and supplemental planting are recommended. [Conclusion] To rationally regulate vegetation density, the planting of vegetation on slopes along the XiYan HSR should be constrained by the local carrying capacity.

**Keywords: XiYan HSR; loess region; slope ecological protection; soil moisture; vegetation carrying capacity**

黄土高原地质与生态环境脆弱,水土流失严重,滑坡、崩塌灾害频发,给当地的工农业生产以及人民的生活、财产带来巨大的威胁<sup>[1-4]</sup>。据统计,全国近1/3的滑坡发生在黄土地区<sup>[5]</sup>。因此黄土地区边坡防护一直是黄土高原工程建设中备受关注的问题<sup>[2]</sup>。进入21世纪,随着中国经济建设快速发展,以及国家“一带一路”倡议的推进,黄土高原地区工程建设,尤其在道路交通方面,进入了高速发展与建设阶段。在带动地区经济快速发展的同时,也为交通沿线的生态环境带来了巨大压力,公路和铁路建设产生的工程创面对沿线的自然景观和生态环境产生了严重的破坏,如不能对施工创面加以及时的生态修复治理,会导致不可逆的生态破坏,对交通线路的安全运营带来严重的影响<sup>[6]</sup>。因此,探索兼顾工程安全与生态可持续的边坡防护技术尤为迫切。

植被护坡是重要的生态修复和边坡防护手段之一,由于能够兼顾防护功能和生态可持续性,逐渐成为当前的主流方案<sup>[7-8]</sup>。其机理在于通过种植植物对裸露边坡固定和修复,利用根系与岩土的相互作用(根系锚固作用)对边坡表层进行防护与加固,并利用植物的冠层对雨水的截留作用,减少降雨对边坡的溅蚀,使之既能稳定边坡,又能修复生态环境<sup>[9-10]</sup>。植被由于自身的可更新性,对边坡的防护效果比传统的护坡工程更为持久和有效。此外,植被护坡具有成本低、稳定性好及可持续性强等优势<sup>[11]</sup>,高度契合国家“大力推进生态文明建设”的战略导向。然而,该技术的应用高度依赖植被承载力阈值和土壤水分条件的精准把控,尤其是在水分条件较差的干旱与半干旱地区<sup>[12-14]</sup>。

黄土高原地跨中国干旱、半干旱以及半湿润地区,其中大部分地区土壤水分条件是制约黄土区植被恢复的主要因素<sup>[15]</sup>。为了改善黄土高原生态环境,我国开展了大面积植树种草和退耕还林工作,森林覆盖率得到显著提高<sup>[16-17]</sup>。然而,粗放的造林工作,违背了林木需水分异规律,在不注重结合当地植被承载力的前提下进行植被密度调控,导致黄土高原造林存在成活率低、保存率低和效益低等“三低”

问题<sup>[18]</sup>。因此,在黄土高原生态修复和边坡防护中,应综合考虑当地的土壤水分条件与植被承载力,合理调控植被密度,实现水分-植被动态平衡。

新建西安市至延安市高速铁路(简称“西延高铁”)位于陕西关中及陕北地区,该线路跨越渭河冲积平原区、黄土台塬区、黄土梁峁沟壑区及子午岭低中山区4个地貌单元。沿线气候条件、地貌环境、土壤类型和植被条件存在较大差异,使得铁路沿线的植被承载力也呈现较大差异<sup>[19]</sup>。因此,在植被承载力范围内合理调控植被密度是制定边坡防护策略的关键。此外,虽然传统边坡生态修复研究多聚焦于高铁沿线的直接影响区,但西延高铁位于地表类型空间异质性较强的黄土区,若仅分析局部沿线区域,可能忽略土壤水分动态变化对植被承载力的影响。基于此,本研究拟选择西延高铁黄土区全域为研究区,在考虑气候、土壤、植被和地形差异的基础上,研究其植被承载力,旨在解决以下关键问题:①计算植被承载能力,得到全域植被承载力的空间分异规律;②揭示黄土区内部不同地貌—气候单元中土壤水分与植被的耦合关系;③制定超出植被承载力上限和低于下限的生态修复策略。以期为研究区全域生态修复和西延高铁建设沿线边坡防护提供理论依据和数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

西延高铁自西安北站北端引出,向北经西安市灞桥区、临潼区、高陵区、阎良区,渭南市富平县,铜川市耀州区、王益区、印台区、宜君县,延安市黄陵县、洛川县、富县、甘泉县和宝塔区,引入既有包西线延安站(图1),全长304.32 km。

西延高铁沿线地势由南至北逐渐升高,可划分为4大地貌单元:渭河冲积平原区、黄土台塬区、黄土梁峁沟壑区和子午岭低中山区<sup>[20-21]</sup>。其中黄土梁峁沟壑区地形起伏较大,沟壑纵横成为边坡防护工作的重点区域。铁路沿线年降水量400~650 mm,主要集中在6—9月;年均气温10~15℃。年降水量和年均

气温均自南向北递减。主要土地利用类型为农田、灌木林地和草地,植被覆盖度 10%~70%<sup>[22]</sup>。

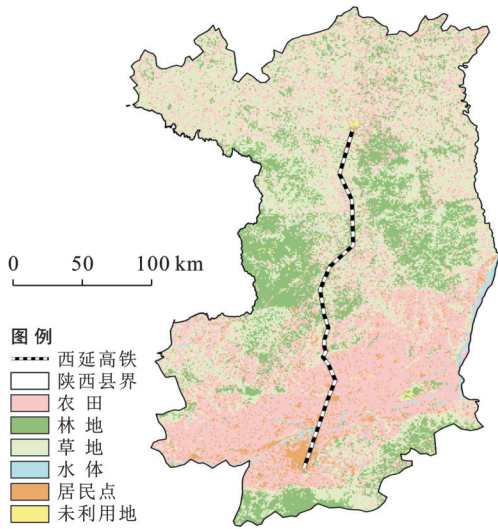


图 1 西延高铁沿线土地利用类型

Fig.1 Land use types along Xi'an-Yan'an high-speed railway

1.2 研究方法

利用统计分析方法,建立不同气候带、土壤、地形和植被类型的植被覆盖度与土壤水分含量之间的拟合函数,结合 2000—2023 年西延铁路沿线土壤水

分含量变化,研究西延高铁沿线区域植被承载力阈值(图 2)。

1.2.1 植被覆盖度计算

采用中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)的 NDVI(normalized difference vegetation index)产品(MOD13Q1)计算研究区的植被覆盖度。

下载 2000—2023 年覆盖整个研究区的 MOD13Q1-NDVI 产品,该产品时间分辨率为 16 d,空间分辨率为 250 m。采用像元二分法计算植被覆盖度,其计算公式为

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{bare}}{NDVI_{veg} - NDVI_{bare}} \quad (1)$$

式中:FVC 为植被覆盖度,其取值范围为 0~1;NDVI 表示计算像元中的 NDVI 值;NDVI<sub>veg</sub> 为植被覆盖度为 1 时的 NDVI 值;NDVI<sub>bare</sub> 表示裸土地的 NDVI 值。两参数的取值参照杨旭超等<sup>[23]</sup>的计算方法,采用给定置信区间的上下限阈值分别近似代表。NDVI<sub>veg</sub> 选取累计频率为 95% 对应的 NDVI 像元值,NDVI<sub>bare</sub> 选取累计频率为 5% 对应的 NDVI 像元值。基于计算结果,对 16 d 一期的植被覆盖度数据进行年最大值合成,获得 2000—2023 年逐年植被覆盖度数据集。

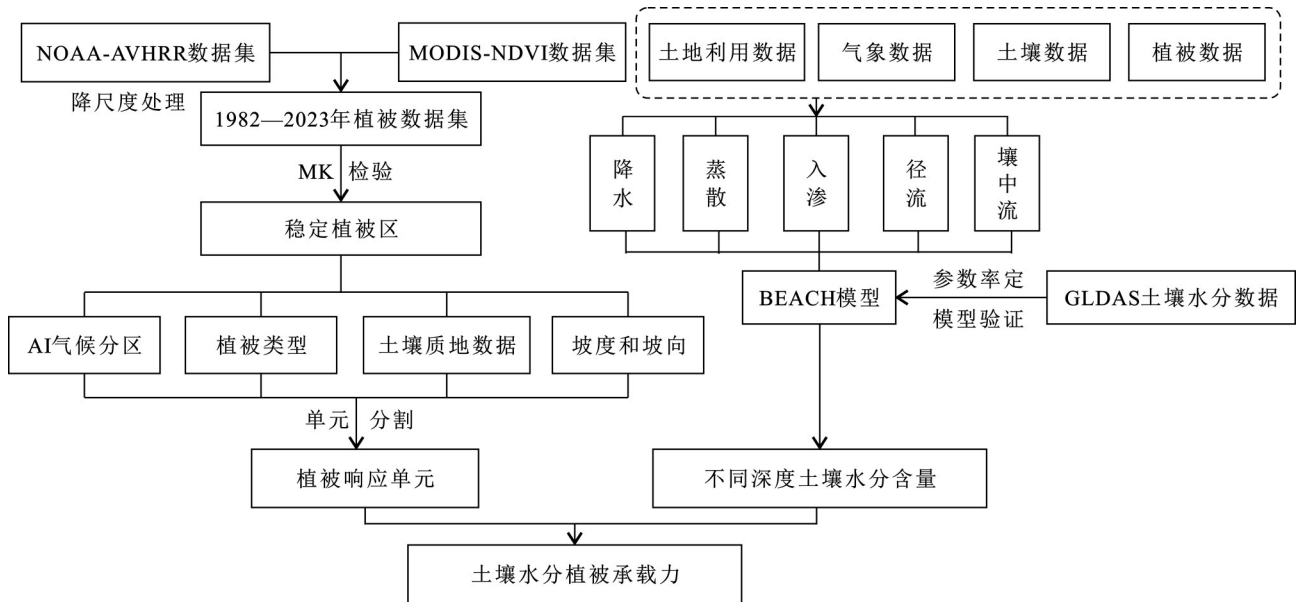


图 2 西延高铁沿线植被承载力计算流程图

Fig.2 Flowchart of vegetation carrying capacity along Xi'an-Yan'an high-speed railway

1.2.2 土壤水分模拟

利用 Sheikh 等<sup>[24]</sup>提出的 BEACH(bridge event and continuous hydrological)土壤水分模型,模拟研究区 2000—2023 年的土壤水分含量。该模型结合气象、土壤性质、植被覆盖等因素,能够有效反映土壤水分的动态变化,适用于大范围地区的长期土壤水

分变化模拟,满足研究区的土壤水分时空分布特征分析需求。

护坡植被一般为草本和灌木,因此本研究设定 3 层(0—10, 10—40, 40—100 cm)土壤水分含量进行模拟,3 层土壤水分分别代表草本植物、小灌木和灌木的根系深度。该模型基于水量平衡方程计算土壤

水分含量,计算公式为

$$D \frac{d\theta}{dt} = P - R - R_{\text{lat}} - E_a - T_a - DP \quad (2)$$

式中: $D$ 为土壤水分的模拟深度(mm); $\theta$ 为土壤水分含量( $\text{mm}^3/\text{mm}^3$ ); $dt$ 为模型的时间步长(d); $P$ 为降雨量(mm); $R$ 为地表径流量(mm); $R_{\text{lat}}$ 为壤中流的流出量(mm); $E_a$ 为实际蒸发量(mm); $T_a$ 为蒸腾量(mm); $DP$ 为下渗量(mm)。

本研究径流量用SCS曲线方程进行计算,公式为

$$R = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad (3)$$

式中: $R$ 为地表汇流量或降雨径流量(mm); $P$ 为日降雨的深度(mm); $I_a$ 为初始吸收量,包括地面蓄水量、地表截留量和下渗量; $S$ 是一个恢复系数(mm),其值随土壤类型、土地利用方式、土地管理、坡度以及土壤水含量的变化而变化。

应用BUDGET模型中的方法模拟土壤水向深层渗漏,公式为

$$DP = D\phi(\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{fc}}) \frac{\exp(\theta - \theta_{\text{fc}}) - 1}{\exp(\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{fc}}) - 1} \quad (4)$$

式中: $DP$ 是向深层的渗漏量(mm); $D$ 为土壤层的深度(mm); $\theta$ 为实际土壤含水量( $\text{mm}^3/\text{mm}^3$ ); $\phi$ 为水流特征的无量纲参数,由饱和和渗透系数决定。

采用简化的Penman-Monteith<sup>[25]</sup>(FAO56)方法计算参考作物的潜在蒸散发( $ET_0$ ),计算公式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(H_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (5)$$

式中: $H_n$ 为冠层表面净辐射( $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ); $G$ 为地表热通量( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{d}$ ); $T$ 为平均气温( $^{\circ}\text{C}$ ); $U_2$ 为2 m高处的风速(m/s); $e_s$ 为饱和水汽压(kPa); $e_a$ 为实际水汽压(kPa); $\Delta$ 为饱和水汽压-温度曲线的斜率( $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ ); $\gamma$ 为湿度计常数( $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ )。当土壤水供应有限时,实际蒸散发( $ET_a$ )小于潜在蒸散发,在模拟过程中,将蒸散发分为植物蒸腾和地表蒸发两部分进行模拟,具体计算方法见参考文献[24]。

壤中流是有较高渗透系数并在浅层含有不透水层或半透水层土壤的特有土壤水运动方式。本研究采用Sloan P G等<sup>[26]</sup>提出的运动存储模型对壤中流进行计算。当土壤含水量大于田间持水量时,产生下渗和壤中流。1 d中每个单元格的壤中流流量( $R_{\text{lat}}$ )(mm)计算公式为

$$R_{\text{lat}} = 24 \times H_0 \times v_{\text{lat}} \quad (6)$$

式中: $H_0$ 表示经坡面出水口处厚度归一化处理后的饱和土壤层的厚度; $v_{\text{lat}}$ 表示壤中流在网格中的流速( $\text{mm}/\text{h}$ )。

### 1.2.3 植被响应单元划分

由于气候条件、土壤类型、植被类型、坡度和坡向均会影响植被与土壤水分的相互作用,进而影响植被的承载能力。本研究按照联合国环境规划署提出的干旱指数(AI)、土壤质地、植被类型、坡度和坡向对研究区划分植被响应单元,在每类植被响应单元内部,土壤含水量与植被覆盖度具有相同的函数关系。按照7位编码对植被响应单元(vegetation response units, VRUs)进行编码,第1位为干旱指数,第2—3位为土壤质地,第4—5位为三级植被类型,第6位为坡度,第7位为坡向。表1—5为研究区植被响应单元分类。

表1 植被响应单元第1位编码(干旱指数编码)

Table 1 First place of vegetation response unit (aridity index codes)

气候类型	干旱指数	编码
干燥亚湿润地区	0.50~0.65	4
湿润亚湿润地区	0.65~1.00	5
湿润地区	>1.00	6

表2 植被响应单元第2—3位编码(土壤质地编码)

Table 2 Second and third codes of vegetation response unit (soil texture codes)

土壤质地	编码
粉砂黏土	12
黏土	13
黏壤土	15
粉砂壤土	17
壤土	19
砂质黏壤土	20
砂壤土	21
壤沙土	22

### 1.2.4 植被稳定区提取

当一个地区的植被处于多年稳定状态时,认为其植被密度与土壤水分达到平衡的稳定状态,即当地的土壤水分能够支撑相应的植被密度。本研究利用Mann-Kendall(MK)趋势检验分析方法,对以上获得的2000—2023年植被数据集进行趋势检验。MK检验是一种非参数统计检验方法,主要用于检测变量在时间序列上的变化趋势,被广泛应用于气象和水文领域<sup>[27-28]</sup>。MK检验计算方法如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (7)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_j > x_i) \\ 0 & (x_j = x_i) \\ -1 & (x_j < x_i) \end{cases} \quad (8)$$

**表 3 植被响应单元第 4—5 位编码(三级植被类型编码)**  
**Table 3 Fourth and fifth codes of vegetation response unit (tertiary vegetation type codes)**

植被类型	编码
无植被区	10
亚热带阔叶落叶林	16
温带落叶阔叶林	17
亚热带阔叶常绿落叶混交林	19
寒温带与温带沼泽	20
温带落叶灌木	22
草与非禾草甸	25
草、苔草与非禾草沼泽草甸	26
亚热带针叶林	34
温带针叶林	35
一年熟耐寒经济作物与落叶果园	38
一年熟粮食作物与耐寒经济作物	39
温带非禾草原	49
温带草原	50
温带丛生的草地草原	51
两年三熟或一年两熟粮食作物与落叶果园	53

**表 4 植被响应单元第 6 位编码(坡度编码)**  
**Table 4 Sixth codes of vegetation response unit (slope codes)**

坡度	级别名称	编码
0°~5°	平坡	1
6°~15°	缓坡	2

**表 5 植被响应单元第 7 位编码(坡向编码)**  
**Table 5 Seventh codes of vegetation response unit (slope direction codes)**

坡向	编码
无坡地区	0
0°~45°	1
45°~90°	2
90°~135°	3
135°~180°	4
180°~225°	5
225°~270°	6
270°~315°	7
315°~360°	8

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+S)}{18} \quad (9)$$

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{var}(S)} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ (S+1)/\sqrt{\text{var}(S)} & (S < 0) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $x_i$ 表示单个像元第*i*年的植被盖度。MK 检验

结果中, $Z > 1.96$ 时,表示在 0.05 显著水平上植被盖度呈显著上升趋势; $Z < -1.96$ 时,表示植被盖度呈显著下降趋势;当  $Z$  在  $-1.96 \sim 1.96$  区间时,表示植被盖度无明显变化趋势。

1.2.5 土壤水分植被承载力计算

基于划分的植被响应单元,以三层土壤水分为自变量,植被盖度为因变量,对稳定区内各植被响应单元做多元线性回归分析,建立各类植被响应单元内土壤水分含量与植被覆盖度之间的函数关系,回归函数表达式为

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X \quad (11)$$

式中: $Y$ 为植被盖度; $X$ 分别表示三层土壤水分含量; $\beta_0$ 为回归截距项; $\beta_1$ 为回归系数,表示各层土壤水分对植被覆盖度的影响程度。

根据拟合计算得到回归系数和截距,建立不同植被响应单元土壤水分与植被盖度的拟合函数。由于建立回归函数时,各个植被响应单元的气候条件、植被类型、土壤质地以及坡度和坡向等因素是固定的,因此能够更准确地识别每个植被响应单元中土壤水分与植被盖度的回归关系。对于各个植被响应单元所获得的回归函数,通过计算决定系数( $R^2$ ),确定函数的拟合精度。计算公式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (12)$$

式中: $Y_i$ 为实际观测的植被盖度值; $\hat{Y}_i$ 为回归模型的预测值; $\bar{Y}$ 为预测植被覆盖度的平均值。 $R^2$ 值越接近于 1,表明拟合精度越高。

根据建立的拟合函数,以土壤水分为自变量,代入回归模型,计算该时段内的植被覆盖度,即可得到在该时段内土壤水分所能承载的植被盖度阈值。在稳定区内,并非所有植被响应单元都能包含在内。为进一步计算稳定区内的植被承载力,按照植被响应单元的编码顺序,从后往前,逐个寻找符合条件的植被响应单元。

随后利用函数拟合结果与残差的和代表土壤水所能承载的植被覆盖度的上限,其拟合结果与残差的差为植被承载力下限,从而获得研究区植被承载力的阈值。计算公式如下:

$$\epsilon_i = Y_i - \hat{Y}_i \quad (13)$$

$$Y_{\text{upper},i} = \hat{Y}_i + \epsilon_i \quad (14)$$

$$Y_{\text{lower},i} = \hat{Y}_i - \epsilon_i \quad (15)$$

式中: $\epsilon_i$ 为残差值; $Y_{\text{upper},i}$ 为植被承载力上限; $Y_{\text{lower},i}$ 为植被承载力下限。

### 1.3 数据来源

为计算研究区的土壤水分和植被承载力,收集气象数据、植被数据、数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据、全球陆面同化系统(global land data assimilation system, GLDAS)数据、土壤数据、土地利用数据等(表6)。

气象数据包括甘泉、延川、延长、宜川、长武、富县6个气象站的平均风速、最大风速、降水量、平均气温、日照时数等。缺失的数据使用GLDAS数据集进行补充。

植被数据采用MODIS-MOD13Q1的NDVI数据,使用MRT(MODSI Reprojection Tool)将MOD13Q1数据从HDF转换为TIF格式,并在ArcGIS中进行裁

剪和重投影,提取出NDVI值,用于计算植被覆盖度。

DEM数据是根据航天飞机雷达地形测绘使命(SRTM)数据集裁切而来,用于提取坡度和坡向。

土壤数据根据研究区边界从中国1:100万土壤数据库裁切而来,用于植被响应单元分类。

土地利用数据是根据2000年、2005年、2010年、2015年、2020年共五期中国土地利用现状遥感监测数据裁切而来,用于说明不同地貌单元的土地利用类型。

利用Kriging插值方法将离散的气象数据插值为空间分辨率为250 m×250 m的栅格数据,同时将所有的栅格数据重采样为空间分辨率为250 m×250 m的栅格数据,投影信息为UTM(横轴墨卡托投影)。

表6 数据来源

Table 6 Data sources

数据类型	数据格式	时间分辨率	空间分辨率	数据来源
气象数据	Text	d	N/A	中国气象科学数据共享服务网( <a href="http://data.cma.cn">http://data.cma.cn</a> )
GLDAS数据集	Raster	3 h	0.25°	NASA网站( <a href="http://search.earthdata.nasa.gov/search">http://search.earthdata.nasa.gov/search</a> )
植被数据	Raster	16d	250 m	NASA网站( <a href="https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov">https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov</a> )
DEM数据	Raster	N/A	90 m	地理空间数据云( <a href="http://www.gscloud.cn/search">http://www.gscloud.cn/search</a> )
土壤数据	Raster	N/A	1 000 m	国家冰川冻土沙漠科学数据中心( <a href="http://www.ncdc.ac.cn">http://www.ncdc.ac.cn</a> )
土地利用数据	Raster	N/A	100 m	中国科学院资源环境科学与数据中心( <a href="https://www.resdc.cn">https://www.resdc.cn</a> )

## 2 结果与分析

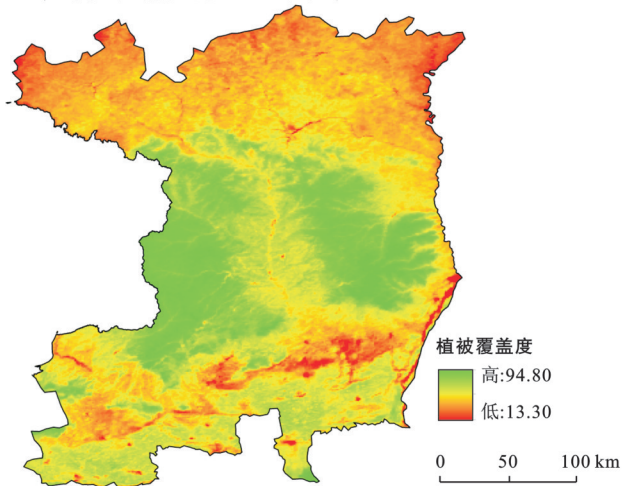
### 2.1 植被覆盖度时空变化趋势

基于MODIS产品,计算得到研究区植被覆盖度的时空变化趋势(图3)。

在空间上,研究区的植被覆盖度为13.30%~94.80%,基本呈中间高、南北低的空间分布格局。中

间为黄土梁峁区,大部分区域的植被覆盖度在70.00%以上;黄土台塬区北部靠近梁峁区的土地利用类型主要为耕地,其植被覆盖度最低,平均在30.00%以下;研究区最北端子午岭山区主要植被类型为草地和小灌木,其植被覆盖度也较低,均在40.00%以下;研究区最南端为渭河冲积平原区,其土地利用类型以草地和林地为主,植被覆盖度相对较高。

a 平均植被覆盖度的空间分布



b 平均植被覆盖度的年际变化

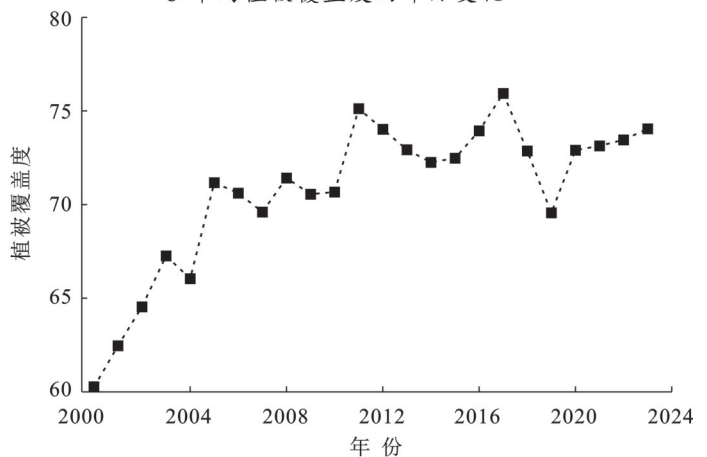


图3 研究区2000—2023年植被覆盖度时空变化

Fig.3 Spatial and temporal changes in vegetation cover of study area from 2000 to 2023

在时间上,2000—2023年研究区平均植被覆盖度呈显著上升趋势。2000年平均植被覆盖度最低,为60.00%,2017年时达到最高(76.00%)。2018年和2019年植被覆盖度有轻微下降,但2020年之后有所上升。MK趋势检验结果显示,Z值为26.30,说明在0.05显著水平上植被覆盖度呈显著上升趋势。其中,2019—2023年西延高铁建设期间,研究区的植被覆盖度呈现逐年上升的趋势,这为高铁建设提供了良好的植被基础。植被覆盖度的增加有助于保持土壤结构,从而减少水土流失速率,降低土壤风蚀量<sup>[29]</sup>。

## 2.2 各层土壤水分分布特征

利用BEACH模型计算得到2000—2023年研究区各层土壤水分含量。其模拟结果与GLDAS采用陆面模型NOAH(Noah land surface model)得到的结果一致性较高(图4),表明BEACH模型能够较好地模拟研究区土壤水分的变化过程,尤其是在不同土层深度上的变化趋势。

研究结果(图5)表明,0—10,10—40,40—100 cm土壤水分含量的范围分别为0.158~0.276,0.169~0.285,0.134~0.296 mm<sup>3</sup>/mm<sup>3</sup>。可以看出,表层土壤

水分呈现明显的东南高西北低的分布趋势;10—40 cm深度的土壤水分呈现中部黄土梁峁沟壑区最低,其次为北部子午岭低山区,南部的黄土台塬区土壤水分含量最高;40—100 cm深度的土壤水分呈现南北两端高,中间低的空间分布趋势,该层土壤水分含量高值区的面积明显高于表层和10—40 cm深度高值区的面积。随着土层深度的增加,土壤水分的空间差异性逐渐增强。

结合研究区土地覆被数据,南部黄土台塬区分布主要为农田,有较完善的灌溉系统,因此,其土壤水分含量较高;中部黄土梁峁沟壑区主要为乔木和灌木,根系较深,蒸腾作用较大,因此该区域表层和深层土壤水分含量均较低;北部子午岭低山区主要为草地和小灌木,根系较浅,因此植物的蒸腾作用仅消耗了表层和浅层的土壤水分,而40—100 cm较深层的土壤水分则不易被消耗,因此,北部子午岭低山区40—100 cm土壤水分含量较高。结合前人研究,可以推断,植物的根系深度和类型对土壤水分的分布起到了重要的调控作用,尤其是在深层土壤水分的分布上,植被类型对土壤水分的消耗具有显著影响<sup>[30]</sup>。

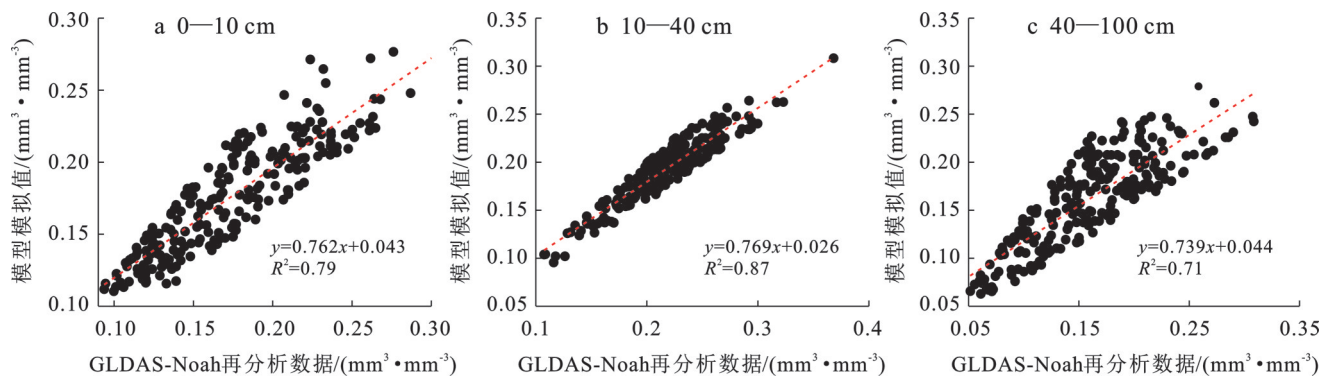


图4 研究区不同深度土壤含水量验证结果

Fig.4 Validation results of soil moisture content at different depths of study area

## 2.3 植被响应单元与分区划定

根据气候干旱指数、土壤类型、植被类型、坡度和坡向数据,划分得到388类植被响应单元(VRUs),合计3 054个具体单元(图6a)。研究表明,湿润地区(干旱指数编码=6)占比最高,说明整体水分条件较好;在土壤质地方面,壤土(19)与砂壤土(21)最为常见;植被类型则以温带针叶林(35)、温带草原(50)及农作物(39,53)为主。

根据植被变化趋势将研究区划分为稳定区、显著降低区和显著升高区(图6b)。其中,绝大部分区域(73.6%)植被覆盖度呈显著升高趋势,主要分布于整个子午岭中山区、大部分黄土梁峁沟壑区以及南部的渭河冲积平原区。这一趋势与近年来北部地区生态治理、植被恢复项目以及气候变化的影响有关。

植被覆盖度显著降低区主要分布在黄土台塬区,占到研究区总面积的13.5%。其植被退化受到多种因素的影响,包括过度放牧、土地利用变化、土壤侵蚀等。植被覆盖度的稳定区域主要分布在研究区中部的黄土梁峁沟壑区,此外在黄土台塬区也有零星分布,植被无显著变化区域占研究区总面积的12.9%,面积与显著下降区基本一致。

叠加植被稳定区与植被响应单元,发现有201类植被响应单元分布在稳定区域内,有806个植被响应单元没有分布在稳定区内。对于未分布在稳定区内的植被响应单元,需要通过寻找替代单元来弥补。通过查找前6位相同的编码,即不考虑坡向因素,寻找相似的植被响应单元替代不在稳定区内的植被响应单元。如有多个相似植被响应单元,采取

就近原则,选择最近的植被响应单元进行替代。经筛选,不在稳定区内的植被响应单元全部由相似的

植被响应单元替代,为下一步植被承载力分析做数据准备。

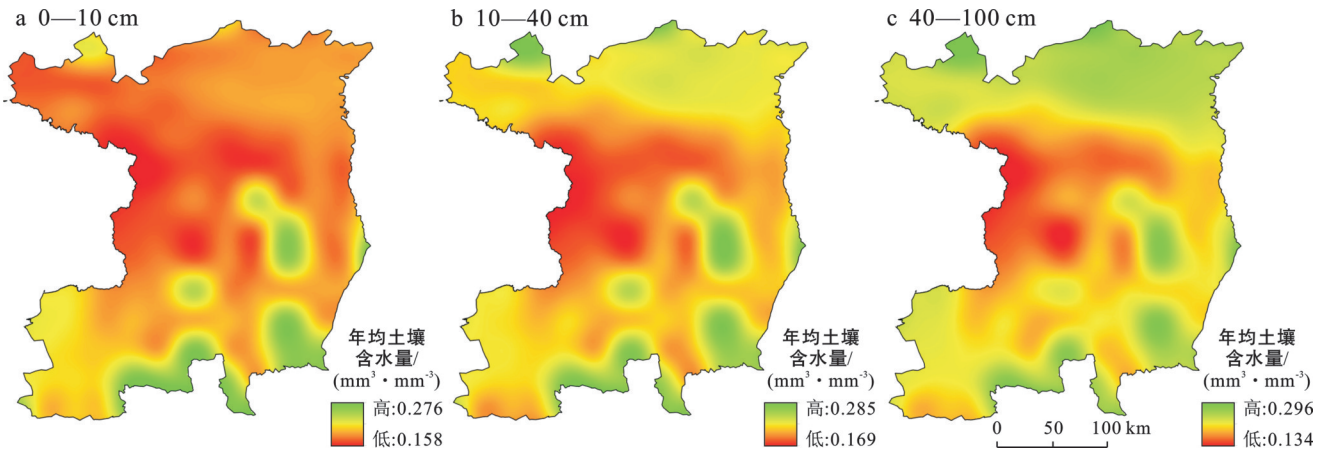


图5 研究区 2000—2023 年不同深度年均土壤水分含量  
Fig.5 Annual average soil moisture content at different depths of study area from 2000 to 2023

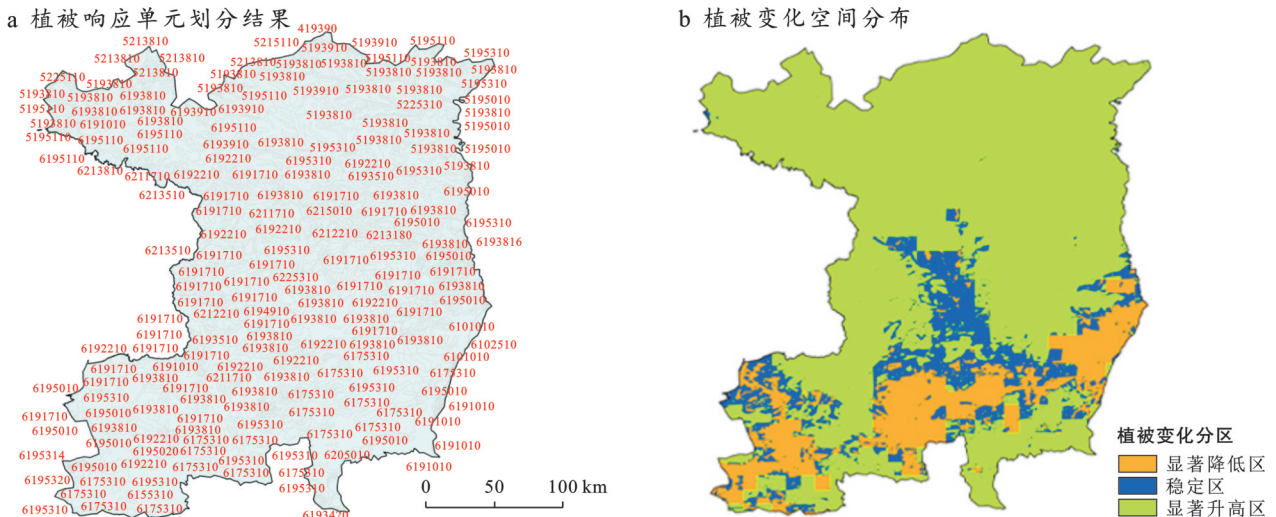


图6 研究区 2000—2023 年植被响应单元与植被变化分区  
Fig.6 Vegetation response units and vegetation change zones of study area from 2000 to 2023

### 2.4 植被承载力

根据各植被响应单元 2000—2023 年植被覆盖度和土壤水分的对应关系,利用多元线性回归分析,建立各植被响应单元内各层土壤水分与植被覆盖度之间的函数关系,共获得 202 组多元线性回归函数,各拟合函数的  $R^2$  均大于 0.6,说明各拟合函数能够较好地反映各层土壤水分含量与植被覆盖度之间的关系(图 7)。

依据回归函数,基于 2000—2023 年西延高铁沿线不同深度土壤水分的变化,获得了不同研究区植被承载力的阈值(图 8)。图 8 表明,研究区植被承载力上限的植被覆盖度为 18.60%~100.00%,承载力下限的植被覆盖度范围为 4.40%~100.00%。整个研究区承载力呈中间高、南北低的分布格局。承载力最低的区域主要分布在子午岭低山区、延安的东北部地区和研究区的西南部地区包括彬州市和淳化县

等地。该区域土壤水分含量较低,各层土壤水分差异较大,导致其植被承载力较弱。中部黄陵县、洛川县、富县、甘泉县等区域植被承载力较高,能承载的植被覆盖度均在 60.00% 以上。该区域土壤条件对植物生长较为适宜,具备较好的水分供应和土壤结构,植被覆盖度较高。

对比当前的植被覆盖度,超过研究区总面积 45% 的区域植被覆盖度超过了其承载力范围,超出范围为 10.00%~62.0%。其中,中部的黄土梁峁沟壑区和北部的子午岭低中山区当前植被覆盖度超出承载力范围的值较高,南部的黄土台塬区和渭河冲积平原区植被覆盖度超过承载力范围的值比较低。这表明该区域的植被覆盖度在短期内已超出了土壤水分的植被承载能力。在工程建设期间,应适当调整植被种植策略,以“最小扰动+生态维稳”为主。

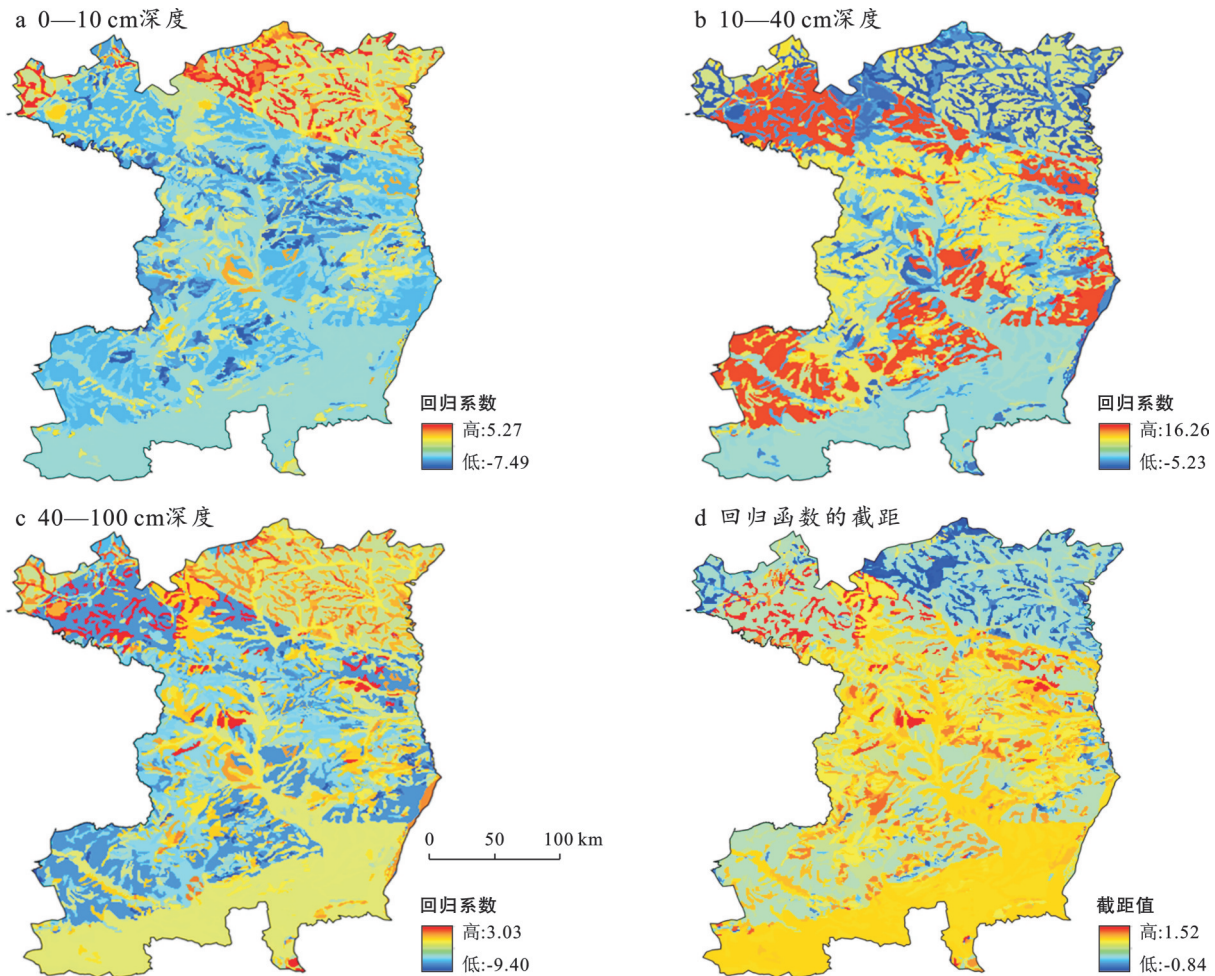


图7 研究区2000—2023年各深度层土壤水分与植被覆盖度之间的回归系数以及回归函数的截距

Fig.7 Regression coefficients and intercepts of regression functions between soil moisture and vegetation coverage across different depth layers of study area from 2000 to 2023

研究区南部的黄土台塬区和子午岭低中山区的西部有部分地区(约占研究区总面积的32%)当前植被覆盖度尚低于植被承载力的下限,具备一定的植被恢复潜力,尚可补充其植被密度。在植被承载力范围内能补充的植被覆盖度取值范围为1.00%到65.00%之间,尤其是东南部的黄土台塬区,其植被覆盖度较当地承载力有较大的差距,能补充的植被覆盖度在8.00%~60.00%之间。这表明这些区域仍有较大的生态修复空间,在工程建设期间,需要增强土壤质量管理、注重生态恢复和植被恢复策略,减少对生态环境的人为扰动,从而进一步提高沿线的植被覆盖度,增强其生态功能,建设策略以“工程避让+植被补植”为主。

### 3 结论

本研究利用植被承载力模型,探讨了西延高速铁路沿线不同气候条件、土壤质地、植被类型和地形环境下土壤水分含量与植被覆盖度之间的关系,并

模拟了当前的植被承载力。

(1) 研究区植被覆盖度呈中间高两端低的空间分布格局,自2000—2023年,尤其是工程建设期间,研究区的平均植被覆盖度呈显著升高趋势。

(2) 土壤水分的分布呈现明显的深层与表层差异。南部黄土台塬区因农田灌溉系统完善,土壤水分较高;中部黄土梁峁沟壑区蒸腾作用较强,表层和深层土壤水分较低;北部子午岭低山区由于草地和小灌木的影响,深层土壤水分较为丰富。

(3) 当前研究区能够承载的植被覆盖度上限在18.60%~100.00%之间。在空间分布上,研究区中部植被承载力较高,南北两端植被承载力较低。

(4) 对于当前植被覆盖度超出承载力范围的地区,应采取适当的植被种植策略,减少人为干扰。对于植被覆盖度低于承载力下限的区域,应加大生态恢复力度。高铁建设和其他基础设施项目应充分考虑当地的植被承载力与土壤水分条件,减少对生态环境的影响,增强区域生态功能。

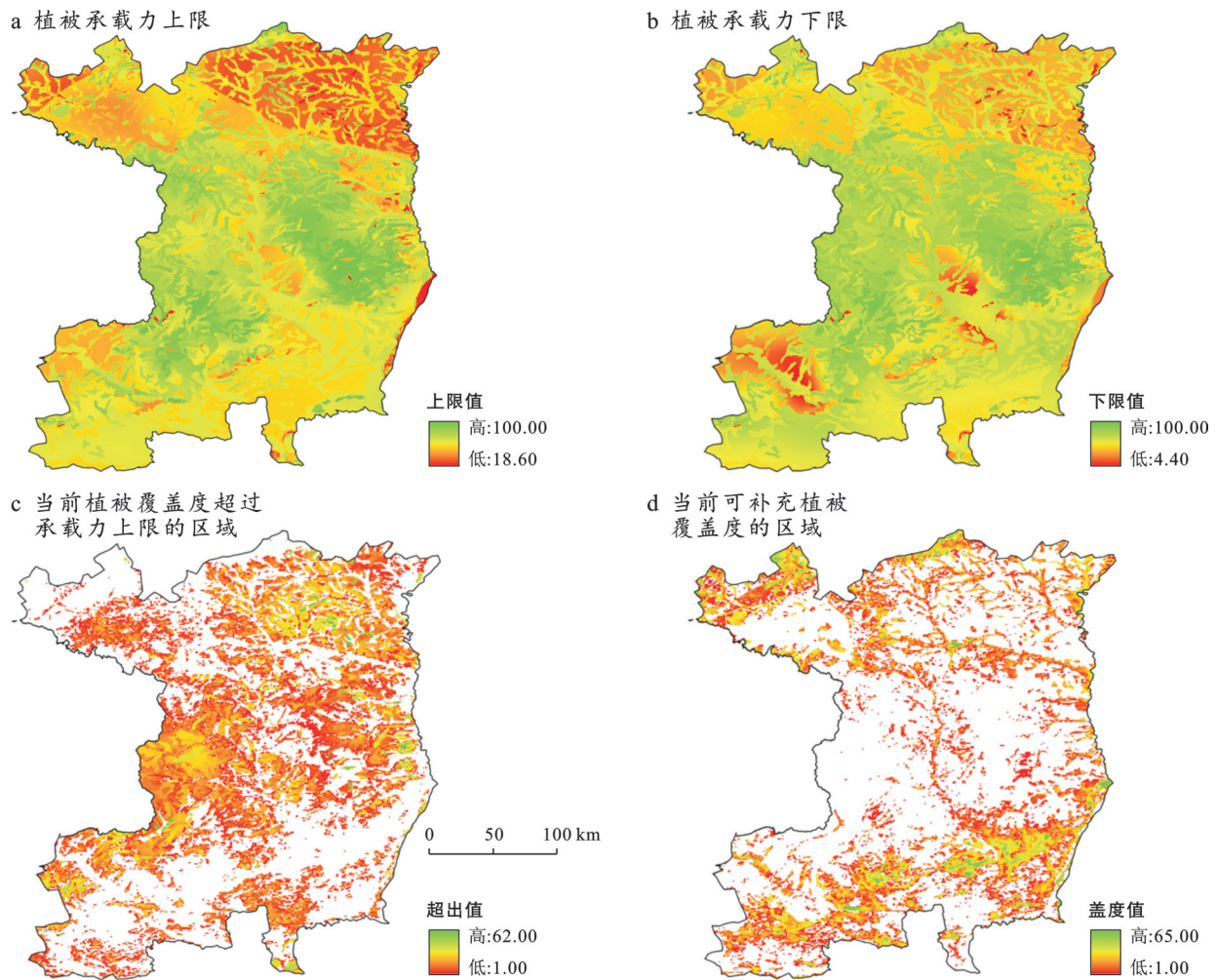


图 8 研究区植被承载力上下限与当前植被覆盖度的差别  
 Fig.8 Difference between upper and lower vegetation carrying capacity and current vegetation cover of study area from 2000 to 2023

本研究综合考虑了植被类型、气候条件、土壤质地、坡度和坡向等因素对植被承载力的影响,模拟了西延高铁沿线黄土区全域的植被承载力,对工程建设时生态修复政策的制定以及边坡防护体系的建立具有主要的指导意义。

#### 参考文献 (References)

- [1] 彭建兵,王启耀,庄建琦,等.黄土高原滑坡灾害形成动力学机制[J].地质力学学报,2020,26(5):714-730.  
 Peng Jianbing, Wang Qiyao, Zhuang Jianqi, et al. Dynamic formation mechanism of landslide disaster on the Loess Plateau [J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(5):714-730.
- [2] 王鑫盈,马超,吕立群,等.黄土高原不同土地利用类型区浅层滑坡侵蚀特征分析:以蔡家川滑坡事件为例[J].干旱区研究,2024,41(4):697-705.  
 Wang Xinying, Ma Chao, Lü Liqun, et al. Erosion characteristics of shallow landslides under various land-use conditions: An example of the Caijiachuan landslide [J]. Arid Zone Research, 2024, 41(4):697-705.
- [3] 程晓伟,剡理祯,李清泉.黄土边坡突发滑坡地质灾害风险辨识评估研究[J].铁道工程学报,2022,39(9):1-6.  
 Cheng Xiaowei, Yan Lizhen, Li Qingquan. Research on the risk identification and assessment of sudden landslide in loess slope [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(9):1-6.
- [4] 庞晓林,史丽涛,武玉坤,等.西延高铁黄土路基高边坡生态防护技术[J].铁路技术创新,2024(1):18-24.  
 Pang Xiaolin, Shi Litao, Wu Yukun, et al. Ecological protection technology for high slope in loess subgrade of Xi'an-Yan'an HSR [J]. Railway Technical Innovation, 2024(1):18-24.
- [5] Zhou Jinxing, Zhu Chunyun, Zheng Jingming, et al. Landslide disaster in the loess area of China [J]. Journal of Forestry Research, 2002, 13(2):157-161.
- [6] 李浩瑄,刘宝河,罗煦,等.东北林草交错生态脆弱区公路工程创面生态修复现状及对策分析[J].内蒙古科技与经济,2020(21):80.  
 Li Haoxuan, Liu Baohe, Luo Xu, et al. Analysis on the present situation and countermeasures of ecological resto-

- ration of highway engineering wounds in the ecotone between forest and grass in northeast China [J]. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, 2020 (21):80.
- [7] 戚国庆, 胡利文. 植被护坡机制及应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(11):2220-2225.  
Qi Guoqing, Hu Liwen. Study on mechanism and application of slope protection with vegetation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25 (11):2220-2225.
- [8] 叶建军, 陈阳阳, 黄涛. 湿喷植被混凝土生态护坡技术在水渠边坡工程中的应用[J]. *水土保持通报*, 2020, 40 (3):228-234.  
Ye Jianjun, Chen Yangyang, Huang Tao. Application of ecological slope protection technology of wet-spraying vegetation-compatible concrete in channel slope [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40 (3): 228-234.
- [9] 邹群, 邹国平. 高速公路生态护坡技术及其应用[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2013, 30(2):52-54.  
Zou Qun, Zou Guoping. Application of ecological slope protection technology to expressway [J]. *Road Machinery & Construction Mechanization*, 2013, 30(2): 52-54.
- [10] 包含, 敖新林, 高月升, 等. 黄土边坡典型护坡植被的根系加固力学效应演化分析[J]. *中国公路学报*, 2024, 37 (6):98-110.  
Bao Han, Ao Xinlin, Gao Yuesheng, et al. Evolution analysis of root reinforcement mechanical effect of typical plant protection on loess slope [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2024, 37(6):98-110.
- [11] Xian Jiantang, Zhu Jun, Leung A K, et al. Using global sensitivity analysis to quantify the uncertainty of root reinforcement in vegetated slope stability [J]. *Plant and Soil*, 2025:1-31.
- [12] 陈生义, 成子桥, 彭阿辉, 等. 泌桐高速公路生态护坡不同草灌混播 10 a 后的植被群落特征[J]. *广西植物*, 2019, 39(6):768-775.  
Chen Shengyi, Cheng Ziqiao, Peng Ahui, et al. Community characteristics of ecological slope protection under mixture planting of shrub and herbage after ten years in Bitong expressway [J]. *Guihaia*, 2019, 39(6): 768-775.
- [13] Xia Y Q, Shao M A. Evaluation of soil water-carrying capacity for vegetation: The concept and the model [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica (Section B: Plant Soil Science)*, 2009, 59(4):342-348.
- [14] 安文明, 韩晓阳, 李宗善, 等. 黄土高原不同植被恢复方式对土壤水分坡面变化的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38 (13):4852-4860.  
An Wenming, Han Xiaoyang, Li Zongshan, et al. Effects of different vegetation restoration types on the slope difference of soil water content in the Loess Plateau, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(13): 4852-4860.
- [15] 王力, 卫三平, 吴发启. 黄土丘陵沟壑区土壤水分环境及植被生长响应: 以燕沟流域为例[J]. *生态学报*, 2009, 29(3):1543-1553.  
Wang Li, Wei Sanping, Wu Faqi. Soil water environment and vegetation growth in the hilly and gully region of the Loess Plateau: A case study of Yangou catchment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3):1543-1553.
- [16] 郭忠升, 邵明安. 雨水资源、土壤水资源与土壤水分植被承载力[J]. *自然资源学报*, 2003, 18(5):522-528.  
Guo Zhongsheng, Shao Ming'an. Precipitation, soil water and soil water carrying capacity of vegetation [J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(5):522-528.
- [17] Liu Bingxia, Shao Ming'an. Modeling soil-water dynamics and soil-water carrying capacity for vegetation on the Loess Plateau, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 159:176-184.
- [18] 夏永秋. 黄土高原水蚀风蚀交错带小流域土壤水分植被承载力过程模拟[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2008.  
Xia Yongqiu. Process simulation of soil moisture and vegetation carrying capacity in small watershed of water and wind erosion ecotone in Loess Plateau [D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [19] 王广锋. 黄土区边坡陡坡段植被建植技术及应用效果[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(3):243-248.  
Wang Guangfeng. Vegetation construction technology and application effect of steep slope in loess area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(3): 243-248.
- [20] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 等. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J]. *生态学报*, 2019, 39(20):7398-7409.  
Li Zongshan, Yang Lei, Wang Guoliang, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: Present situations, problems, and counter-solutions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39 (20):7398-7409.
- [21] 韩磊, 曹鑫鑫, 朱会利, 等. 基于特征分区的陕北黄土高原植被覆盖变化及其驱动因素[J]. *生态学报*, 2023, 43 (20):8564-8577.  
Han Lei, Cao Xinxin, Zhu Huili, et al. Change of vegetation coverage and driving factor in the north Shaanxi Loess Plateau based on characteristic zoning [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(20):8564-8577.