

王洋,王振亭.植物固沙最低盖度的理论计算[J].中国沙漠,2025,45(2):97-101.

植物固沙最低盖度的理论计算

王洋^{1,2},王振亭¹

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 人工植被作为传统防风固沙措施的核心,其最低盖度是治沙工程设计与施工的关键参数。本文利用前人建立的植被与生物土壤结皮耦合动力学模型,计算地表稳定状态下的最低植被盖度。主要结论:(1)该模型可望成为植物固沙的理论依据;(2)当输沙势高且降雨量低时,存在以植物或生物土壤结皮覆盖为主的两种稳定地表,植物固沙的最低盖度为0.02~0.12;(3)根据年降水量与输沙势,可将河西走廊沙区划分为自然恢复、植物固沙和工程固沙三类区域,以便因地制宜地制订精准固沙策略。

关键词: 防风固沙; 植被; 生物土壤结皮; 耦合模型; 最低盖度

文章编号: 1000-694X(2025)02-097-05

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00111

中图分类号: U418.5+6

文献标志码: A

0 引言

风沙运动严重影响人们的生活和社会发展,成为干旱区特有的自然灾害^[1]。防风固沙对农业生产 and 环境保护具有重大作用。在传统防风固沙措施中,人工植被往往处于核心地位^[2-3]。风速、气温、降水等自然条件在地理空间上的巨大差异决定了植物固沙必须因地制宜。因此,根据实际情况确定固沙植物基本参数是众多治沙工程设计与施工的首要问题。

最低盖度是植物固沙效果和成本的关键控制参数,通常由风洞模拟^[4-6]、野外观测^[7]和模型计算^[8-10]等方法确定。不同植被种类、盖度、排布等情况下的风洞实验表明,盖度15%~25%^[4]、60%^[5]、43%^[6]的植物措施均可固沙。对固定沙地、半固定沙地和流动沙地的野外观测表明,有效防风固沙的植被盖度参考值为31%^[7]。经验性的土壤风蚀方程或其修正给出的盖度值为40%~50%^[8]、12%^[9]、35%~44%^[10]。可见,不同方法给出的最低盖度值差别很大。除了影响因素众多,理论模型缺乏是主要原因。本文尝试利用植被-生物土壤结皮耦合动力学模型,进一步探讨植物固沙的最低盖度问题。

1 理论模型

Kinast等^[11]建立的自然条件下植被与生物结皮盖度耦合动力学模型为:

$$\dot{v} = \alpha_v(v + \eta_v)s - \epsilon_v D_p v g(v)s - \gamma D_p^{\frac{2}{3}} v - \phi_v v b \quad (1a)$$

$$\dot{b} = \alpha_b(b + \eta_b)s - \epsilon_b D_p b g(v)s - \phi_b v b \quad (1b)$$

该模型定量描述了降水、风速及植被与结皮相互作用对植被和结皮盖度的影响。 v, b, s 分别为植被、结皮、流沙盖度,三者之和为1。

第一项 $\alpha_v(v + \eta_v)s$ 和 $\alpha_b(b + \eta_b)s$ 为降水作用下的增长率。 η_v 和 η_b 为植物和结皮在自发生长状况下的盖度值。 α_v 和 α_b 为植物和结皮的增长率,假设与年降水量 p 有以下关系:

$$\alpha_i(p) = \begin{cases} \alpha_{i,\max}(1 - e^{-(p - p_{i,\min})/c_i}) & p \geq p_{i,\min} \\ 0 & p < p_{i,\min} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i = v, b$; $p_{i,\min}$ 为降水阈值; $\alpha_{i,\max}$ 为高降水作用下渐进增长率; c_i 为对降水反应程度。

第二项 $\epsilon_v D_p v g(v)s$ 和 $\epsilon_b D_p b g(v)s$ 描述了风沙流对植被和生物结皮的吹蚀、磨蚀或压埋作用。其中, D_p 为输沙势,参数 ϵ_v 和 ϵ_b 为植物和结皮对输沙势的限度。 $g(v)$ 为植被的防护效应,可表示为类阶跃函数:

收稿日期:2024-09-27; 改回日期:2024-11-11

资助项目:国家自然科学基金项目(U21A2001,42371005)

作者简介:王洋(1999—),男,甘肃兰州人,硕士研究生,主要从事干旱气象研究。E-mail: wangyang241@mails.ucas.ac.cn

通信作者:王振亭(E-mail: ztwang@lzb.ac.cn)

$$g(v) = \frac{1}{2} \{ \tanh [d(v_c - v) + 1] \} \quad (3)$$

当植被盖度大于阈值 v_c 时,地表流沙受到保护,免受风的直接作用, $g(v)$ 等于0;当植被盖度远小于阈值 v_c 时,地表流沙不再受保护作用,受风的直接作用, $g(v)$ 等于1。参数 d 控制着 $g(v)$ 的陡度。由于风的间接作用效果与沙源供应量相关,整项乘以 s 。

式(1a)中的 $\gamma D_p^{\frac{2}{3}} v$ 为风因加速蒸腾或吹折枝条而对植物生长的抑制作用。气流拖曳力正比于风速平方,因而此项出现 $D_p^{\frac{2}{3}}$ 。式(1b)无此项是因为结皮能有效抵御气流吹蚀。

最后一项 $\phi_v v b$ 和 $\phi_b v b$ 为植被-结皮竞争作用。 ϕ_v 和 ϕ_b 表示植被和结皮之间的交互作用。模型中假设植被-结皮为负相互作用。结皮会阻止植物种子发芽,并且减少地表水对土壤的渗透。植被提供遮荫和可能有毒的掉落物,抑制结皮的生长。

各参数取值如下: $\phi_v=0.01 \text{ a}^{-1}$; $\phi_b=0.01 \text{ a}^{-1}$; $\alpha_{v,\max}=0.15 \text{ a}^{-1}$; $\alpha_{b,\max}=0.015 \text{ a}^{-1}$; $c_v=100 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$; $p_{v,\min}=50 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$; $p_{b,\min}=20 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$; $\eta_v=0.2$; $\eta_b=0.1$; $v_c=0.3$; $\epsilon_v=10^{-3} \text{ a}^{-1} \cdot \text{VU}$; $\epsilon_b=10^{-4} \text{ a}^{-1} \cdot \text{VU}$; $d=15$; $c_b=50 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$; $\gamma=8 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1} \cdot \text{VU}^{-3/2}$ 。

2 模型验证

该模型已经在以色列-埃及边境的野外实验中得到验证^[11]。这里,我们以地处巴丹吉林和腾格里两大沙漠之间的民勤地区为例,进一步检验其对植被盖度的预测能力。民勤地区风大沙多,年降水量110 mm,潜在蒸发量2 600 mm,水资源稀缺^[12-13]。遥感技术^[14]已经给出过去数十年内空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为8 d的植被盖度数据(<https://glass-product.bnu.edu.cn/introduction/fvc.html>)。降水量和风速数据来自欧洲气象中心的ERA5再分析数据集(<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>),空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,时间分辨率为1 h。因不同来源数据的空间分辨率不同,通过线性插值得到与植被盖度相同地点的年降水量和输沙势。一年内的降水量总和即为年降水量。根据输沙势定义,先由风速计算小时分辨率的输沙势数值,然后在一年内累加而得年输沙势。如果给定初值以及降水和输沙势数据,那么方程(1a)和(1b)可以预测植被和结皮盖度随时间的变化情况。实际求解中,以差分代替导数,时

间步长取为1年。植被盖度初值 v_0 取为实测值。因为民勤沙丘表面多有结皮发育^[15],所以 b 的初值取为 $1-v_0$ 。

决定系数 R^2 是评判预测结果是否符合实际的常规指标。我们计算了2012—2021年104个位置的植被盖度预测值与实测值及实测值趋势之间的决定系数,分别记为 R_1^2 和 R_2^2 。图1以箱线图形式给出了决定系数的统计特征。 R_1^2 为0.01~0.87,平均值为0.46,第一四分位数为0.3,第三四分位数为0.6。 R_2^2 为0.03~0.99,平均值为0.73,第一四分位数为0.73,第三四分位数为0.95,有8个异常值处于0.03~0.3。部分预测结果与实测值差异较大,其原因主要在于实际植被盖度偏低,均值接近于零,决定系数计算不准。年降水量和输沙势不能精细反映风季的风沙活动和生长季植被变化,可能对预测结果有影响。另外,河西走廊地区人类活动频繁,而模型仅考虑了自然状态下地表盖度的变化情况,理论预测的不确定性在所难免。虽然两个决定系数的范围相差无几,但是 R_2^2 均值明显高于前者。图2为经纬度(38.7°N , 102.5°E)处的植被盖度在2012—2021年的变化情况。其中,趋势值以2012年数值为起点,对所有实测值做线性拟合而得。 R_2^2 的第一四分位数和均值说明,理论模型至少能够比较准确地预测植被盖度的变化趋势。

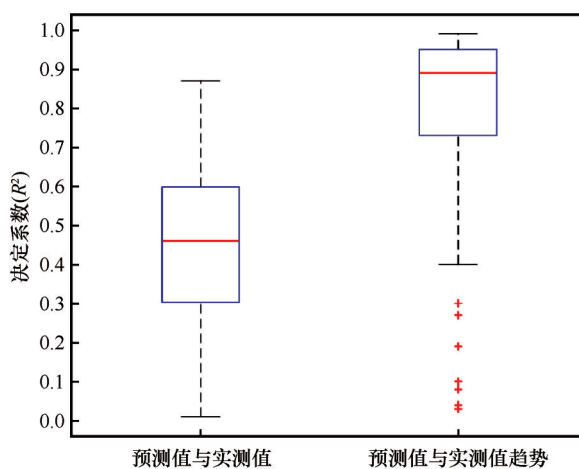


图1 植被盖度决定系数箱线图

Fig.1 Boxplot of the determination coefficients of vegetation coverage

3 实际应用

河西走廊位于甘肃省西北部,地处祁连山以北、乌鞘岭以西、合黎山以南,西临甘肃与新疆的交界,呈现出西北至东南的狭长走向。该地区海拔

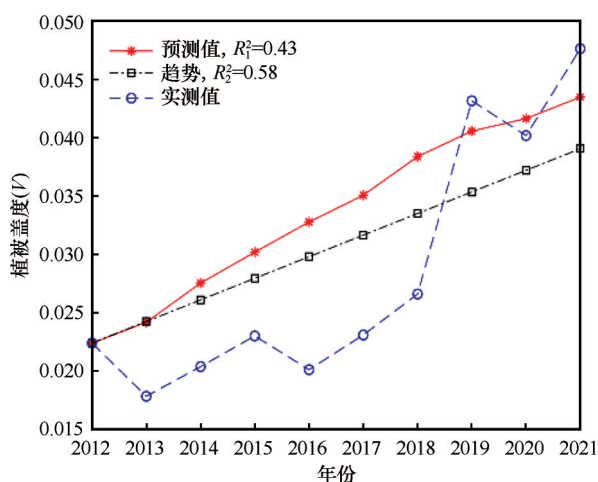


图2 植被盖度随时间的变化

Fig.2 The change of vegetation coverage with time

1 139~3 100 mm, 年降水量 40~410 mm, 而年潜在蒸发量为 1 500~3 311 mm^[16]。河西走廊荒漠化面积占甘肃省 90% 以上, 是中国“三北”防护林建设的重点, 也是北方防风固沙的前沿阵地^[17-18]。下面以该地区为例, 说明植被与结皮耦合动力学模型在确定植物固沙最低植被盖度及措施区划方面的具体应用。

根据降水量和输沙势的不同, 由方程(1)描述的动力系统存在以下 3 种稳定状态^[11]: 高降水时的完全植被覆盖或低降水时的完全结皮覆盖; 高降水和强风作用下的 I 型双稳态; 低降水和弱风作用下的 II 型双稳态。I 型双稳态与植被的挡风作用有关, 尽管降水量很高, 但高风力促进流沙活跃, 抑制植物生长。然而, 一旦沙丘被植被覆盖, 植被的挡风作用使其能够持续存在。在这种稳定状态下, 裸露的流动沙丘与固定的灌丛沙丘长期共存。II 型双稳态与植被和生物土壤结皮的竞争有关, 竞争结果是地表流沙被二者之一固定。植物固沙的目的是使地表处于稳定状态。因此, 可根据降水量和输沙势, 确定理论模型处于稳定状态时的植被与结皮盖度, 制定合适的固沙策略。

当系统处于稳定状态时, 方程(1)等号右端为 0, 成为关于植被和结皮盖度的代数方程。代入 2012—2021 年平均降水量、输沙势及其他常数, 不难计算植被与结皮盖度。图 3、4 分别为河西走廊地区年降水量和输沙势的空间分布。降水量具有南高北低与东高西低的特点, 输沙势则恰恰相反。图 5 为根据植被与结皮盖度稳定值划分的固沙措施, 大致分为自然恢复、植物固沙和工程固沙 3 种情况:

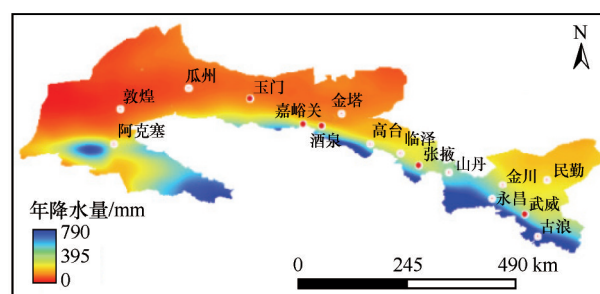


图3 河西走廊年降水量

Fig.3 Mean annual precipitation in the Hexi Corridor

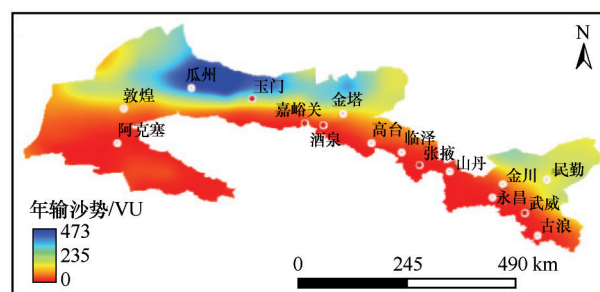


图4 河西走廊年输沙势

Fig.4 Mean annual sand drift potential in the Hexi Corridor

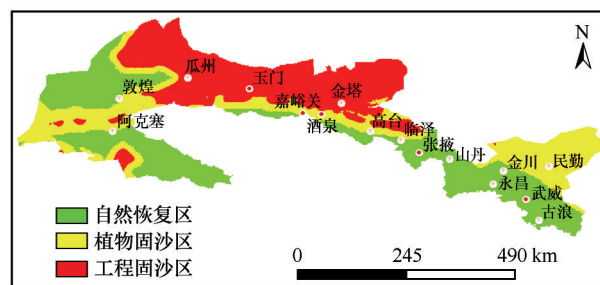


图5 河西走廊不同治沙措施的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of different sand control measures in the Hexi Corridor

第一、降水量较大且输沙势较低时, 系统存在以植被为主的单稳态区域。我们将植物盖度理论值大于等于 50% 的区域划分为自然恢复区, 主要分布于古浪县东北部、武威市凉州区、民勤县西南部、永昌县、张掖市甘州区、临泽县、高台县中部、酒泉市肃州区以及敦煌市西湖湿地和阿克塞的部分区域。自然恢复区风沙危害程度较低, 即使偶有裸露的流沙地表, 植被也可自然恢复, 故优先采取封育措施; 第二、河西部分地区干旱少雨, 高植被盖度不易实现。因此, 将降水量较小, 输沙势较高, 植物盖度理论值小于等于 5% 的区域划分为工程固沙区。瓜州县、玉门市、金塔县以及酒泉市和嘉峪关市北部地区的工程固沙区, 连续实施 100% 面积占比的工程措施一段时期后, 生物土壤结皮将完全覆盖原有的

流沙地表,确保地表稳定;第三、将植物盖度理论值为5%~50%的区域划分为植物固沙区,除河西走廊东部偶有连片分布,例如民勤县大部,其他多呈斑块状介于工程固沙区和自然恢复区之间。植物固沙区地表覆被系统存在双稳态。当以生物土壤结皮覆盖为主时,植被盖度为0.02~0.12。防风固沙初期,风沙流动大,植株易受袭扰而难以存活。策略是在植物固沙区内先采用2~3年的短期工程措施固定地表,以保障幼苗存活。表1为植物固沙区内植物措施与短期工程措施各自的面积占比,供河西走廊治沙工程设计与施工参考。

表 1 植物固沙区固沙措施的平均面积占比		
Table 1 Mean area percent of sand fixation measures in plant fixation areas		
区域	植物措施面积占比/%	短期工程措施面积占比/%
民勤县	14.1	24.1
金川区	18.2	30.6
临泽县	6.8	85.4
高台县	13.7	70.7
嘉峪关市	17.9	65.9
肃州区	21.9	59.1
金塔县	10.5	35.8
玉门市	13.1	55.2
瓜州县	11.2	45.0
敦煌市	24.9	52.7
阿克塞县	16.0	69.7

4 讨论

人工植被是传统防风固沙措施的核心,植被种类、盖度和排布方式对固沙效果有重要影响。确定最低盖度是治沙工程设计和施工的首要问题。目前,风洞模拟、野外观测和模型计算等方法给出的最低盖度存在巨大差异。植被-结皮耦合动力学模型为研究该问题提供了新思路,能够预测系统处于稳定状态的植被、生物土壤结皮和流沙盖度。对河西走廊东北部民勤县植被盖度在10年间变化的计算结果表明,该模型很可能普遍适用于中国西北干旱区,在植物固沙中具有较高的实用价值。

植物固沙涉及气流、沙粒、植物三者之间的复杂耦合运动,理论模型的建立与求解均比较困难。本文采用的早期平均场模型相对简单,仅以输沙势代表风沙运动强弱,其背后的气固两相运动机理尚

需深入探讨。忽略空间异质性是这种模型的主要缺陷。实际上,植物种子和沙粒均可被风输运,沉积在下风向区域。在该模型的近期完善^[19]中,风向对植物生长的影响已被考虑在内,能够描述的空间动力学行为更加丰富。植被与生物结皮的相互作用取决于生物土壤结皮的发育阶段、植被类型和土壤特性,其机理尚未完全清楚。目前采用的负反馈假设未必适合于所有情况。另外,模型参数众多,有的仍属于纯经验参数,有的已在以色列与埃及边境地区的野外实验中确定。如果结合最新理论进展,根据中国西北干旱区气候、地貌、植被特征与演化规律,进一步确定降水阈值和生长速率等关键参数,必将大大提高植物-生物土壤结皮动力学模型的适用范围和预测精度。

5 结论

相对于经验治沙,植被-生物土壤结皮耦合动力学模型有望成为植物固沙的可靠理论依据。

当输沙势高且降雨量低时,存在以植物或生物土壤结皮覆盖为主的两种类型稳定地表,植物固沙的最低盖度为0.02~0.12。

可根据降水量与输沙势将河西走廊沙区分为自然恢复、植物固沙、工程固沙三类区域,实施因地制宜的精准固沙。

参考文献:

[1] 吴晓旭,邹学勇,王仁德,等.毛乌素沙地不同下垫面的风沙运动特征[J].中国沙漠,2011,31(4):828-835.

[2] 纪永福,李亚,魏怀东,等.腾格里沙漠南缘人工固沙植被抚育管理与合理利用模式研究:以景泰治沙站为例[J].甘肃林业科技,2013,38(4):1-4.

[3] 褚建民.干旱区植物的水分选择性利用研究[D].北京:中国林业科学研究院,2007.

[4] 杨文斌,卢琦,吴波,等.低覆盖度不同配置灌丛内风流结构与防风效果的风洞实验[J].中国沙漠,2007,27(5):791-796.

[5] 董治宝,陈渭南,董光荣,等.植被对风沙土风蚀作用的影响[J].环境科学学报,1996(4):437-443.

[6] 余沛东,陈银萍,李玉强,等.植被盖度对沙丘风沙流结构及风蚀量的影响[J].中国沙漠,2019,39(5):29-36.

[7] 贺晶.草原植被防风固沙功能基线盖度研究[D].北京:中国农业科学院,2014.

[8] 黄富祥,牛海山,王明星,等.毛乌素沙地植被覆盖率与风蚀输沙率定量关系[J].地理学报,2001(6):700-710.

[9] 杨祎,王根绪,李阳,等.三江源区草地水土保持与防风固沙功能临界植被覆盖度时空变化分析[J].山地学报,2024,42

- (2):143–153.
- [10] 张彪,王爽,史芸婷.京津风沙源区防风固沙功能对植被覆盖度变化的时空响应研究[J].生态科学,2022,41(1):110–119.
- [11] Kinast S, Meron E, Yizhaq H, et al. Biogenic crust dynamics on sand dunes[J]. Physical Review E, 2013, 87(2):020701.
- [12] 张瑜忠,王立,徐先英,等.河西走廊公众对防护林认知及影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2022,36(9):98–105.
- [13] 李军,周发元,焦亮,等.1960–2022年河西走廊主要气候要素特征及气候生产潜力[J].中国沙漠,2024,44(6):1–12.
- [14] Jia K, Liang S, Liu S, et al. Global land surface fractional vegetation cover estimation using general regression neural networks from MODIS surface reflectance[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(9):4787–4796.
- [15] Tan N J, Luo X M, Wang Z T. Biocrust as a surface protection of erodible nebkhas [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2024, 49:4523–4531.
- [16] 罗晓玲,李岩瑛,严志明,等.近60年河西走廊地区沙尘暴发生演变特征及其气象影响因子[J].水土保持研究,2021,28(5):254–260.
- [17] 雷加强,高鑫,赵永成,等.河西走廊–塔克拉玛干沙漠边缘阻击战:风沙形势与防治任务[J].中国科学院院刊,2023,38(7):966–977.
- [18] 朱发昇,李长春,侯爱冰.国家重大战略和水资源演变背景下河西走廊水安全保障的思考[J].水利发展研究,2024,24(6):20–25.
- [19] Yizhaq H, Ashkenazy Y. Sand dune vegetation-biocrust interaction as a source of spatial heterogeneity[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2022, 70(2):145–155.

Theoretical calculation of the minimum vegetation cover for fixing sand

Wang Yang^{1,2}, Wang Zhenting¹

(1. Northwest Institute of Eco-Environmental and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As the core of traditional windbreak and sand fixation measures, artificial vegetation's minimum coverage is a key parameter for the design and construction of various desertification control projects. This paper utilizes the vegetation and biological soil crust coupling dynamics model established by previous researchers to calculate the minimum vegetation coverage under stable surface conditions. The main conclusions are as follows: First, this model can serve as a theoretical basis for plant sand fixation; second, in areas with high sand transport and low rainfall, there are two types of stable surfaces, where the minimum required vegetation coverage for fixing sand is 0.02–0.12; third, based on the average annual precipitation and sand transport potential, the Hexi Corridor region is divided into areas of natural recovery, plant sand fixation, and engineering sand fixation, in order to develop targeted sand control strategies that are suited to local conditions.

Key words: windbreak and sand fixation; vegetation; biological soil crust; coupling model; minimum coverage