北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

基于遗传算法的绿地地形设计与植物生境优化

左翔 刘晖

Green space terrain design and plant habitat optimization based on genetic algorithms

Zuo Xiang, Liu Hui

引用本文:
左翔, 刘晖. 基于遗传算法的绿地地形设计与植物生境优化[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(11):147-158. doi: 10.12171/j.1000-1522.20240423
Zuo Xiang, Liu Hui. Green space terrain design and plant habitat optimization based on genetic algorithms[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(11):147-158. doi: 10.12171/j.1000-1522.20240423

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20240423

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

近自然森林景观空间结构参数化设计研究
Parametric design of close-to-nature forest landscape spatial structure
北京林业大学学报, 2023, 45(6): 100-107. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20220010

基于自适应遗传优化递归神经网络的木工送料平台补偿控制研究
Compensation control of woodworking feeding platform based on self-adaptive genetic optimization recurrent neural network
北京林业大学学报, 2020, 42(12): 125-134. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20200248

基于ENVI技术的永定河段景观格局演变与优化研究
Evolution and optimization research on landscape pattern of Yongding River section of Beijing based on ENVI technology
北京林业大学学报, 2021, 43(6): 118-129. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20200204

晋西黄土区流域景观格局对径流及其组分的影响
Effects of watershed landscape pattern on runoff and its components in the loess region of western Shanxi Province, northern China
北京林业大学学报, 2023, 45(10): 118-126. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20230037

固沙植被景观格局变化及其影响因子
Landscape pattern change and its influencing factors of sand-binding vegetation
北京林业大学学报, 2020, 42(4): 102-112. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20190061

基于参数化的榫卯尺寸智能确定方法
Intelligent method of determining dimension of mortise and tenon joint based on parameterization
北京林业大学学报, 2021, 43(3): 145-154. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20200104

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240423

基于遗传算法的绿地地形设计与植物生境优化

左 翔 刘 晖
（西安建筑科技大学建筑学院，陕西 西安 710055）

摘要:【目的】针对当前景观地形设计依赖人工、效率低下且与生态数据分析脱节的问题，本研究旨在开发一种自动化、数据驱动的地形优化方法，以精准改善植物生境。**【方法】**本研究借助 Grasshopper 平台建立一种基于遗传算法的数字地形自动优化程序，在植物生境优化导向下对渭河北岸约 5.57 hm^2 场地进行地形设计，以改善其土壤干旱、地形配置单一和生境空间均质化的问题。之后利用 SWAT、Fragstats 软件进行环境多因子评价和景观格局指数分析，检测优化后植物生境变化情况。**【结果】**优化后，地形最大起伏度增加了 0.36 m，日均直接辐射持续时间的平均值减少了 0.36 h，总辐射的平均值下降了 11.53（kW·h）/m^2，平均土壤含水量提高了 0.24 mm，生境的多样性和均匀性指标分别提高了 0.20 和 0.11。**【结论】**研究表明基于遗传算法的数字地形自动优化程序能快速找到地形参数最优解，且能通过地形的调优定向干预植物生境，实现丰富地形配置、减少太阳直接辐射时长和总辐射量、提升土壤含水率、提高生境的多样性和均匀性等设计目标。研究有利于推动地形设计和生境营造的数智化发展，提高生境营造的效率、准确性与综合性。

关键词：数字景观；地形设计；遗传算法；参数化设计；生境优化；景观格局
中图分类号：S731 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)11−0147−12
引文格式：左翔，刘晖. 基于遗传算法的绿地地形设计与植物生境优化［J］. 北京林业大学学报，2025，47(11)：147−158.
Zuo Xiang, Liu Hui. Green space terrain design and plant habitat optimization based on genetic algorithms［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(11): 147−158.

Green space terrain design and plant habitat optimization based on genetic algorithms

Zuo Xiang Liu Hui
(School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract:［**Objective**］In response to the current problem of landscape terrain design relying on manual labor, low efficiency, and disconnection from ecological data analysis, this paper aims to develop an automated, data-driven terrain optimization method to accurately improve plant habitats.［**Method**］This study developed an automated digital terrain optimization program based on a genetic algorithm, implemented on the Grasshopper platform. The optimization targeted a 5.57 ha site along the north bank of the Weihe River of northwestern China, focusing on mitigating issues such as arid soil conditions, simplified terrain configurations, and spatial homogenization of plant habitats. Afterwards, SWAT and Fragstats software were used for environmental multi-factor evaluation and landscape pattern index analysis to detect the changes in plant habitat after optimization.［**Result**］The optimization process resulted in an increase in maximum terrain undulation by 0.36 m, a reduction in the average daily duration of direct incoming solar

收稿日期: 2024−12−09 **修回日期:** 2025−07−25
基金项目: 国家自然科学基金项目（52578097），陕西省自然科学基金一般项目（2023-JC-QN-0525），陕西省社会科学基金年度项目（2023J002），渭南市海绵城市建设专题研究服务项目（20230759）。
第一作者: 左翔，博士生。主要研究方向：风景园林规划与设计。Email: 493967380@qq.com 地址：710055 陕西省西安市碑林区雁塔路中段 13 号西安建筑科技大学建筑学院。
责任作者: 刘晖，教授，博士生导师。主要研究方向：西北脆弱生态环境景观规划设计理论与方法。Email: 249600425@qq.com 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

radiation by 0.36 h, and a decrease in global radiation by 11.53 (kW·h)/m^2. Additionally, average soil moisture content increased by 0.24 mm, while the diversity and homogeneity indices of plant habitats improved by 0.20 and 0.11, respectively. [**Conclusion**] Research findings indicate that the genetic algorithm-based automated digital terrain optimization program can rapidly identify optimal solutions for terrain parameters and achieve key design objectives. These include enriching terrain configurations, reducing direct incoming solar radiation duration and global radiation, enhancing soil moisture content, and improving habitat diversity and homogeneity through targeted terrain interventions. This study contributes to advancing digital intelligence in terrain design and habitat-site design methodologies, enhancing the efficiency, precision and comprehensiveness of habitat optimization efforts.

Key words: digital landscape; terrain design; genetic algorithm; parametric design; habitat optimization; landscape patterns

植物生境是植物赖以生存的空间范围与环境条件的综合体，包括光照、温度、空气、水分、土壤养分、生存空间等关键要素。不同植物的生长均依赖特定的适宜阈值，通过合理调控环境因子，可最大限度满足其生理要求，为群落的构建与稳定发展提供条件。已有研究表明[1−3]，地形特征对植物生境因子具有显著影响：高程差异会影响光照、热量和湿度的分布，使凸地形光照充足、土壤干燥，利于阳生和耐旱植物生长；而凹地形荫庇潮湿，适合耐阴和湿生植物生长。坡度则可影响土壤养分[4−5]、土壤厚度[6]和土壤侵蚀[7]等环境因子，因此修建缓坡或水平阶，能减缓水土侵蚀，增加养分积存，促进植物增产。坡向调节太阳辐射[8]、风向[9]、风速及土壤水分分布[10]，北向坡面太阳辐射偏弱，适宜阴生植物生长；南向坡面太阳辐射强，则利于阳生植物生长[11]。提升地形起伏度能够增强空间异质性[12]和生境多样性[13]，为植物提供更多的生态位[14]，促进植物多样性的提升[15]，这为通过地形设计来调控和优化植物生长的环境条件，进而促进植物生长提供了理论依据。

近年来，如何利用地形对环境的影响效应来开展地形设计，并最大程度改善植物生境，已成为生态修复的重要研究热点之一。在高程优化方面，贺文君等[16]针对滨海土地盐碱化问题开展实验设计，发现地形高程显著影响滨海盐碱地土壤的水盐分布，带来最高 89.7% 的植物地上生物量增量，据此建立了基于微地形营造的“盐碱地异质性生境优化组合模式”，促进了植被生长，提升了植物景观层次的多样性。王志勇等[17]针对场地水沙失衡问题提出“挖凹以集蓄，堆凸以分流”的设计策略，成功调节了水土关系，改善生境并促进植物恢复。García-Ávalosa 等[18]针对西班牙采石场的土地干旱、植被缺乏的问题开展地形改造对比实验，证实微集水区设计能增加干旱土地的土壤水分，并将植物存活率从 40% 提高至 94%，植被覆盖面积提高了 175.84%。在坡度优化方面，徐勇等[19]通过“坡改梯”措施显著提升了黄土高原区的保水减沙效益，其中减沙效益提升最高达 41.18%，植物增产效益提升最高达 16.74%。在地形多样性优化方面，袁嘉等[20]通过增加微地形的变化和地形配置的多样性，促进了空间异质性的形成和空间生态位的多样化，提升了场地的植物多样性。这些研究验证了地形优化在改善植物生境与促进植被繁茂方面的重要作用，并逐步形成了“问题诊断—地形优化—生境改善—植被恢复”的因果逻辑和设计途径。然而，现有设计方法仍高度依赖主观判断与试错，形式较为粗放，主观性强，缺乏科学性与精确性。

早期地形设计主要依赖于沙盘建模和手绘图纸。20 世纪中叶，数学计算和数字图形技术的进步推动了数字地形表现方法的出现[21]。20 世纪 60 年代，计算机辅助设计技术（CAD）[22]和地理信息系统（GIS）技术[23]出现，80 年代微型电脑和信息技术的快速演进，促使数字地形建模和编辑技术和工具迅速发展[24−25]，极大促进了地形设计技术的数字化转型，使其逐渐成为目前地形设计的主流技术。目前，数字地形编辑方法主要包括不规则格网和规则格网两类方法[26]。建模平台主要有 3 类：基于 CAD 平台的数字地形程序，如 AutoCAD Land desktop、Map3D、Civil3D、City Plan、HY-TFD 等[27]；地理信息系统程序，如 ArcView GIS、Map Info、Qgis2threejs、Surfer 等；3D 场景编辑器，如 TrueVision3D、Ogitor、Epic、RPG Map Editor 等[28]。其中，前两类的地形编辑过程依赖于手动测算和控制，在面对复杂问题和复合目标时效率不高，且与生态分析数据协同性不足，需要反复修改才能满足生态设计要求；第 3 类则侧重于视觉仿真，工程精度和智能化程度有限。

基于此，为提升“基于地形营造的植物生境优化设计方法”的科学性、精确性和效率，本研究以生境条件改善为目标，在参数化设计平台 Rhino 上建立

一种基于遗传算法的数字地形自动优化程序，并通过对比分析优化前后土壤水分、光照条件及生境格局，检验其对植物生长与生境多样性的改善效果。本研究旨在推动植物生境数字化设计与营造的数智化转型，提高其效率、准确性与综合性，从而为植物群落的生境优化营造与景观构建提供新路径。

1　研究区概况

研究区位于西安市北部渭河咸阳段北岸的渭河生态带。北侧隔兰池大道东段与秦文明广场相对，南侧接滨渭路东段与渭河相望(图 1)，地理坐标为 34°24′36″ ~ 34°22′48″N，108°51′00″ ~ 108°52′48″E。场地形态近似为矩形，呈西南—东北走向。长为 346.67 m，宽为 164.35 m，占地面积 55 68 m^2，高程 373.33 ~ 380.14 m。整体地势略呈西高东低、南高北低，地形最大相对高差为 2.48 m。北部地势较为平坦，南部因人工修筑堤坝抬升形成缓坡。场地光照充足，周边无高大建筑物遮挡。土壤含沙量大，压实易板结，较为干旱。现状植被以草本植物为主，伴有少量灌木。群落中杂草比例较高，植被层次不完整，物种多样性低，花卉数量有限，色彩表现单一。

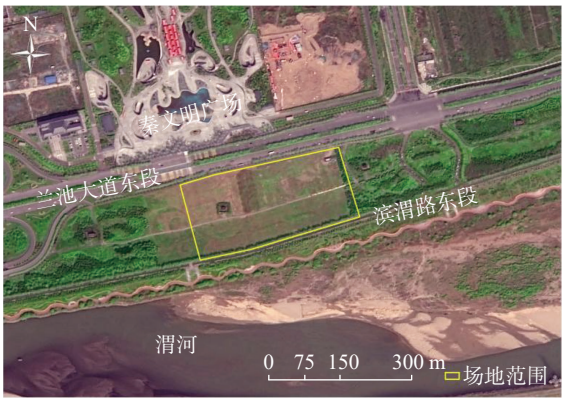


图 1　研究区概况

Fig. 1　Overview of the study area

2　研究方法

2.1　地形优化程序构建与求解

在 Rhino 平台的 Grasshopper 算法编辑器中构建地形优化程序。Rhino 是一种参数化建模软件，在量化分析和精确建模上具有独特优势，能显著提高地形建模的精度和效率。优化程序的核心为遗传算法，这是一类模拟自然进化过程搜索最优解的方法[29]，通过参数选择调控、优胜劣汰和循环迭代，实现地形参数的自动寻优，具有速度快和结果优的特点。本研究采用的遗传算法搭载在 Grasshopper 下的 Galapagos 运算器之上，Galapagos 有两个接口，其中 Genome 接口接入自变量，数量不限，Fitness 接口链接因变量，因变量通常是优化目标。

首先，对场地生境现状进行调查与分析，明确主要问题为强日照导致的土壤干旱、地形配置单一和生境空间均质化。由此确定总体目标为降低土壤干旱程度、丰富地形格局，并增加生境空间。鉴于地形起伏度与生境多样性密切相关，且土壤干旱度受日照影响，故在具体设计中以地形的起伏调控为主要手段，以降低太阳入射辐射(指到达地面的单位立体角的辐照度)为目标进行地形调优设计。将场地现状高程点数据导入 Rhino 平台的 Grasshopper 插件程序中，建立地形网格。高程点数据为 0.5 m 分辨率的人工测绘高程数据。在场地范围内随机生成 20 个点作为高程控制点(图 2)，其位置由随机种子参数 seed 控制。每个控制点高程可在−3 ~ 3 m 范围内变化，并对周围高程点产生影响，其影响强度随距离增加线性衰减。同时，使用 Ladybug 组件计算场地太阳入射辐射量。以控制点位置和高程作为自变量，太阳入射辐射为因变量，调用 Galapagos 运算器中的遗传算法求得场地太阳入射辐射最小时的地形高程和标变量值，运算程序界面见图 3。实验初始条件为：随机种子参数 seed 初始值为 0（seed∈[0,100]），高程增量为 0，场地现状太阳入射辐射初始值为 61.45（kW·h)/m^2。遗传算法迭代次数设为 100。迭代结束时选取太阳入射辐射为最小值时的地形图层，作为地形优化结果。

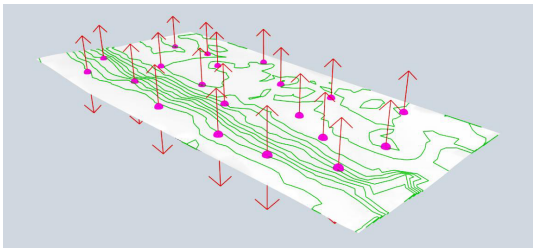


图 2　高程控制点

Fig. 2　Elevation control points

2.2　生境条件评价与对比

为检测地形优化对场地生境的影响效果，需对地形优化前后的生境条件因子进行一致性分析与对比。植物生长的主要生境因子包括光照、温度、水分和土壤。其中，温度主要受到地理区位、季节和昼夜周期性变化控制，土壤理化性质由长期成土过程和人为活动决定，二者在短期内难以改变，因此本研究重点关注水分与光照因子。

对于光因子，使用 ArcGIS 的“太阳辐射区域”分析工具，分别对现状和优化后的数字高程数据进行太阳辐射的对比分析，分析时间为 2021 年。该工具可综合大气效应、地形和区位、太阳高度角进行高

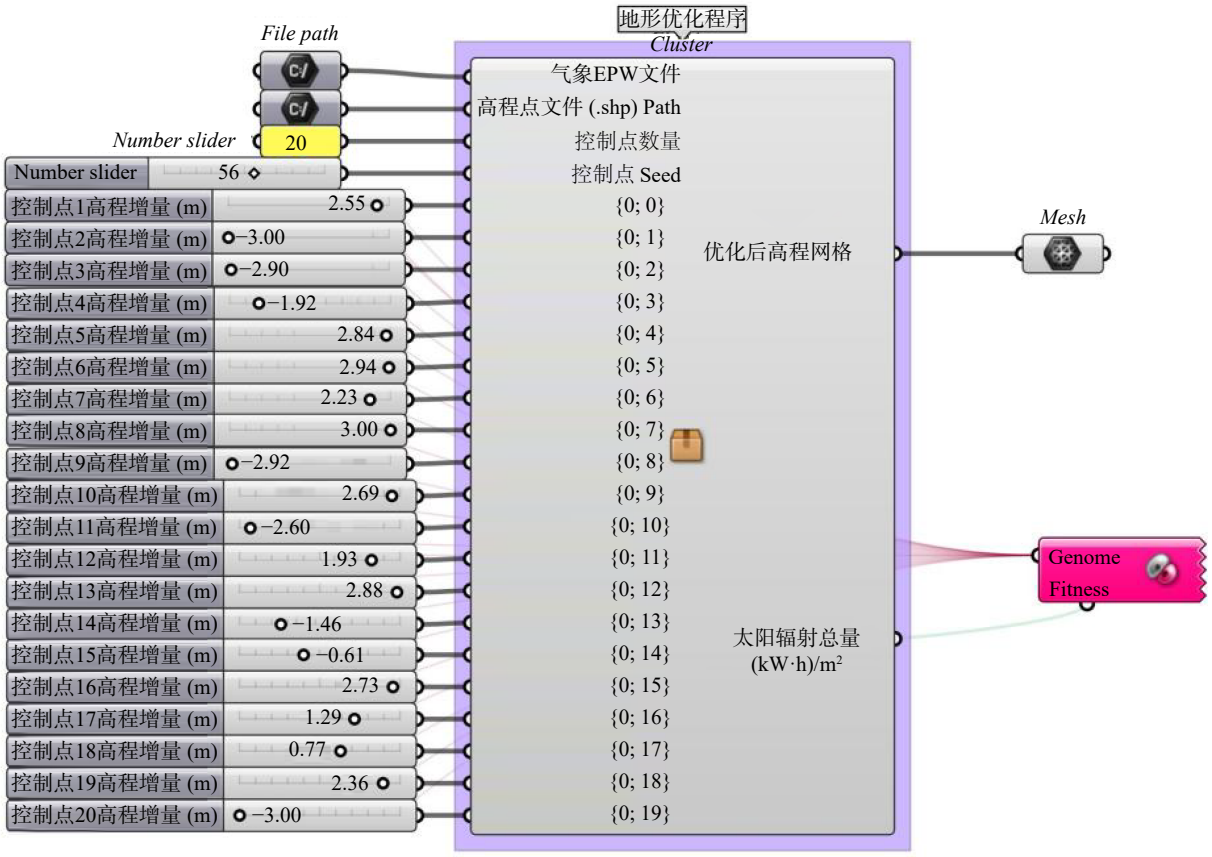


图 3 地形优化程序运算界面

Fig. 3 Terrain optimization procedure computation interface

精度分析，结果科学可信，在生态分析中应用广泛。而为了解场地水文条件在地形优化前后的变化，采用 SWAT 模型模拟土壤含水率。SWAT 是一种基于物理机制的水文模型，能进行连续时间的定量化模拟，精度高且适用于中小尺度场地研究。为保证水文过程的完整性，本研究以场地中心点为基准，扩展至 800 m × 800 m 的矩形范围进行模拟。模拟时间设置为 2021 年 1 月 1 日至 2022 年 1 月 1 日。初次运行后使用 SWAT-CUP 率定模型参数，调参后输入 SWAT 模型二次运行，并得到最终结果，最后将运行结果导入 ArcGIS 进行插值和可视化分析。

数据来源如表 1 所示，其中输入的数字高程数据采用场地内部的高分辨率高程数据（0.5 m）与场地外部较低分辨率高程数据（30 m）合成并重采样至 1 m 分辨率。外围高程数据为欧洲航天局 Copernicus DEM；根据相关研究结果，1 km 是黄土高原土壤养分空间分异的特征尺度[30]，本研究所使用的土壤数据分辨率为 30 m，可满足研究需求。

2.3 生境格局分析与对比

为评估优化前后场地生境格局的变化，本研究基于年均太阳辐射总量与土壤含水量对场地生境进行分类。参考文献 [31]，旱生植物生长的土壤体积含水率下限为 0.28%。因此，将土壤体积含水率 < 0.28% 的区域划分为超干旱生境，≥ 0.28% 的非湿生区域划分为干旱生境。此外，西安市年均降水日数约为 96.6 d，集中于 6—11 月[32]。强降水常导致积涝，形成潮湿的土壤环境，故将积涝区域作为季节性湿生生境。积涝区的识别需计算特定暴雨情景下的场地

表 1 研究数据来源

Tab. 1 Research data sources

数据项	分辨率/m	来源
场地高程	0.5	等高线测绘CAD图
场地外部高程	30	欧洲航天局网站Copernicus DEM数据集（https://panda.copernicus.eu/panda）
土地利用数据	1	武汉大学SinoLC-1中国地表覆盖数据集（2021年）
土壤栅格数据	30	地理遥感生态网（http://www.gisrs.cn/index.html）
河流网矢量数据		OpenStreetMap网站（https://www.openstreetmap.org）

径流总量和水位:首先以 20 年的重现期,计算 24 h 暴雨情境下的地表径流总量。经查询,西安市的设计暴雨雨强、径流量和降水量[33]计算公式如下。

$$i=\frac{16.715(1+1.165\ 8\lg P)}{(t+16.813)^{0.930\ 2}} \tag{1}$$

$$Q=W\Psi \tag{2}$$

$$W=Ah/1\ 000 \tag{3}$$

$$h=it \tag{4}$$

式中:i 为雨强(mm/min),P 为降水的设计重现期(a),t 为降水历时(min),Q 为径流量(m^3),W 为降水量(m^3),Ψ 为径流系数,A 为场地面积(m^2),h 为径流深度(mm)。

之后通过 ArcGIS "面积体积" 工具计算场地不同水位对应的库容量,绘制场地的 "水位库容曲线",在曲线中查询地表径流总量对应水位高度,即积涝水位。将场地位于该水位以下的面积划定为 "季节性湿生生境"。

使用 ArcGIS 的太阳辐射工具对研究区 2021 年的直接辐射持续时间进行分析,研究区日均直射时长范围为 5.69 ~ 11.96 h,均值 11.40 h。根据相关文献 [22, 34−36],典型阳生植物至少需 6 ~ 8 h 直射光,因此研究区整体属阳生植物适生区。基于全年辐射量,采用分位数法将场地划分为强日照和次强日照两类生境。优化后,场地的光照生境的划分形式和标准与优化前保持一致。最后将光因子和水因子的分类结果进行叠加得到生境分类。

为理解地形优化前后生境格局的整体变化,选择景观级别的指标并使用 Fragstats 4.2 软件进行分析。指标中斑块数量(NP)、斑块密度(PD)可揭示生境斑块数量和密度的定量变化,香农多样性指数(SHDI)可反映景观类型的丰富程度,香农均匀性指数(SHEI)可反映景观类型分布的均匀和邻近程度,分离度(DIVISION)、聚合度(AI)、连结度(COHESION)可反映生境斑块的聚散性和连通性,边缘密度(ED)、景观形状指数(LSI)可反映生境斑块的边缘效应和形状的复杂程度。上述 9 个指标与生境质量有着密切关系[37−39],可揭示生境格局在多个维度的变化并提供定量信息,因此,本研究选取这 9 个指标进行分析。景观格局指标[40]的具体含义见表 2。

3　结果与分析

3.1　生境条件变化分析

在迭代计算 100 次后,最小太阳入射辐射稳定值为47.34(kW·h)/m^2,较优化前下降了 14.11(kW·h)/m^2。高程范围为 371.74 ~ 381.77 m;最大起伏度为 2.84 m,较优化前增加 0.36 m,表明地形配置单一的问题得到改善。地形优化程序得到的最优参数见表 3,优化前后地形高程见图 4。

3.1.1　土壤水分变化

采用 SWAT 模型对研究区土壤体积含水量进行分析(图 5),得到优化前后地形条件下的土壤体积含水量(图 6)。模型经过 SWAT-CUP 的参数率定,率定后决定系数(R^2)为 0.78,Nash-Sutcliffe 效率系数(NSE)为 0.75,百分比偏差(PBIAS)为 5.40,均方根误差观测值标准差比(RSR)为 0.50,这符合 $R^2>0.7$、|PBIAS|≤25%、NSE > 0.5 和 RSR≤0.7 的模拟精度要求[41]。经统计(表 4),优化后平均土壤含水量提高了 0.24 mm,全年储水总量增加了 13.52 m^3,说明地形的优化设计使场地的土壤存蓄了更多水分,干旱情况得到一定缓解。同时土壤含水量极差增加

表 2　景观格局指标含义

Tab. 2　Meaning of landscape pattern indexes

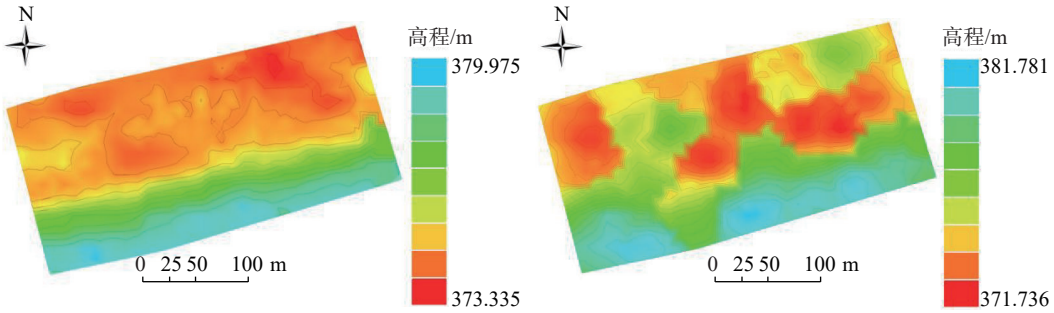
指标名称	含义
斑块数量(NP)/个	所有斑块的总数,值域为[1, ∞),与生境破碎度成正相关
斑块密度(PD)/(个·km^{-2})	单位面积的斑块数量,与生境整体的异质性成正相关
香农多样性指数(SHDI)	反映景观类型的丰富程度,等于各景观类型的面积比例与其自然对数乘积的负数,值域为[0, 1],与景观类型数目成正相关
香农均匀性指数(SHEI)	与景观类型分布的均匀程度成正比,对非均匀分布较敏感,与少数优势类型的植被趋势成负相关,值域为[0, 1]
分离度(DIVISION)	不同景观类型分布的分离度,可以在一定程度上表征人类活动的干扰强度
聚合度(AI)/%	景观类型斑块聚集程度,值域为[0, 100]。取值越小,景观越离散
连结度(COHESION)	表示同一景观类型在空间上的结构联系特征
边缘密度(ED)/(m·hm^{-2})	单位面积内景观类型的边界长度,用于揭示景观被边界分割的程度
景观形状指数(LSI)	斑块边界与面积比值,与斑块形状复杂程度成正比

注:引自文献[40]。

表 3 地形参数初始值与最优值

Tab. 3 Initial and optimal values of topographic parameters

地形控制点高程变化	点1	点2	点3	点4	点5	点6	点7	点8	点9	点10
高程增量初始值/m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
高程增量最优值/m	2.55	−3.00	−2.90	−1.92	2.84	2.94	2.23	3.00	−2.92	2.69
地形控制点高程变化	点11	点12	点13	点14	点15	点16	点17	点18	点19	点20
高程增量初始值/m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
高程增量最优值/m	−2.60	1.93	2.88	−1.46	−0.61	2.73	1.29	0.77	2.36	−3.00
控制点位随机种子(seed)初始值	0				控制点位随机种子(seed)最优值			56		



a 优化前 b 优化后

图 4 优化前后高程

Fig. 4 Elevation before and after optimization

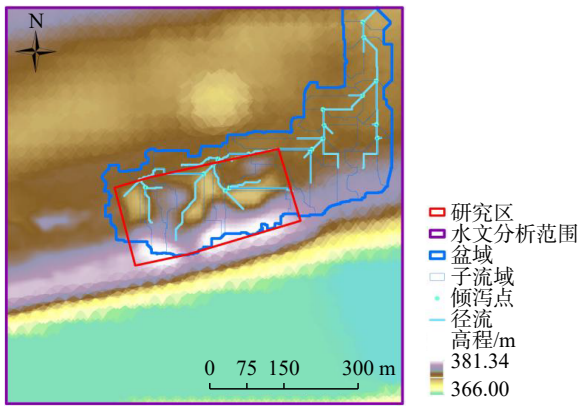


图 5 基于 SWAT 模型的水文分析

Fig. 5 Hydrologic analysis based on SWAT modeling

了 1.28 mm，标准差增加了 0.22，说明土壤含水量的局部差异增大，这有利于促进水文生境的多样化，改变场地单一的生境类型格局，为生物多样性的增加提供环境基础。

3.1.2 光照条件变化

ArcGIS 对 2021 年度的辐射持续时间和总辐射的分析结果(表 5)显示：优化后日均直接辐射持续时间的平均值下降了 0.36 h；说明优化算法实现了场地日照时长减小，这有利于减少蒸发，增加土壤湿度；同时日均直接辐射持续时间极差增加了 1.41 h，标准差增加了 0.30，说明日照时长数据趋于离散，场地局部差异在增大，这有利于促进场地生境多样性的增加。优化后总辐射的平均值下降了 11.53 (kW·h)/m^2，说明优化算法有效降低了场地单位时间内单位面积接收的太阳辐射能量，这有利于缓解场地土壤的干旱程度。总辐射的极差增加了 224.96(kW·h)/m^2，标准差增加了 33.52(kW·h)/m^2，说明数据离散程度增加，场地接收的太阳辐射能量的局部差距在增大，即“晒的更晒，阴的更阴”，总辐射值的变化情况同样支持“优化算法能减少平均日照，同时增加内部光照差异”的论断。

3.2 生境格局动态分析

场地现状为草地，查得其径流系数 Ψ 为 0.11。场地面积 A 为 55 683 m^2，降水历时 t 为 1 440 min，设计重现期 P 为 20 a。将以上变量值代入公式(1)～(3)，求得在 20 年一遇的降水情景下，暴雨雨强为 0.05 mm/min，产生的径流总量为 423.47 m^3。

通过 ArcGIS“面积体积”工具分别计算地形优化前后场地不同水位对应的库容量，绘制场地的“水位库容曲线”(图 7)，根据曲线求得径流量为 423.47 m^3 时，优化前场地对应的水位为 373.75 m，优化后场地对应的水位为 372.39 m。分别提取高程值小于这两个水位的区域得到积涝区(图 8)。经统计，优化前场地共有 2 个积涝区共 1 139.93 m^2，占场地总面积的 2.05%，位于场地的东北角。其中最小面积为 52.15 m^2，最大面积为 1 087.78 m^2，平均面积为 569.97 m^2。优化后共有 5 个积涝区共 2 382.04 m^2，较优化前增加了 1 242.11 m^2，散布于场地中部和西

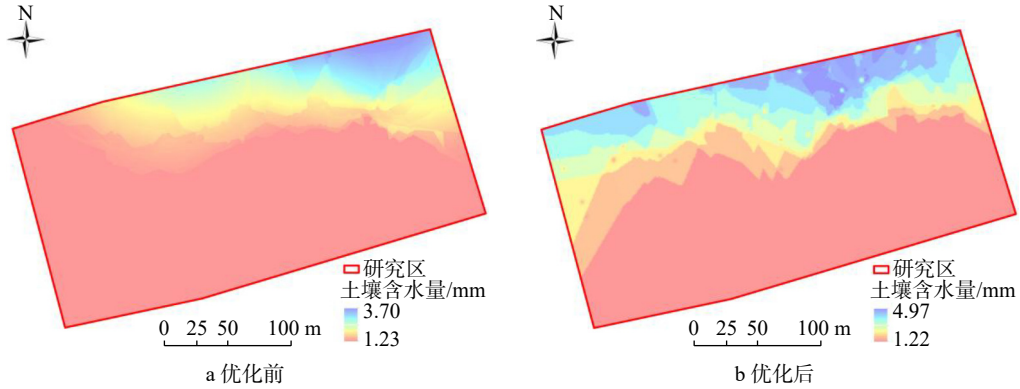


图 6　优化前后土壤含水量

Fig. 6　Soil moisture contents before and after optimization

表 4　优化前后土壤含水量统计

Tab. 4　Statistics of soil water contents before and after optimization

优化情况	土壤含水量/mm					储水总量/m^3
	最小值	最大值	极差	均值	标准差	
优化前	1.23	3.70	2.47	1.55	0.57	86.27
优化后	1.22↓	4.97↑	3.75↑	1.79↑	0.79↑	99.79↑

注：↑代表数据较优化前增加，↓代表数据较优化前减少。下同。

表 5　优化前后光照特征统计

Tab. 5　Statistics of light characteristics before and after optimization

指标	优化情况	最小值	最大值	极差	均值	标准差
日均直接辐射持续时间/h	优化前	10.64	11.92	1.28	11.76	0.10
	优化后	9.23↓	11.92	2.69↑	11.40↓	0.40↑
总辐射/(kW·h·m^{-2})	优化前	1 227.47	1 475.64	248.17	1 385.26	26.62
	优化后	1 033.52↓	1 506.65↑	473.13↑	1 373.73↓	60.15↑

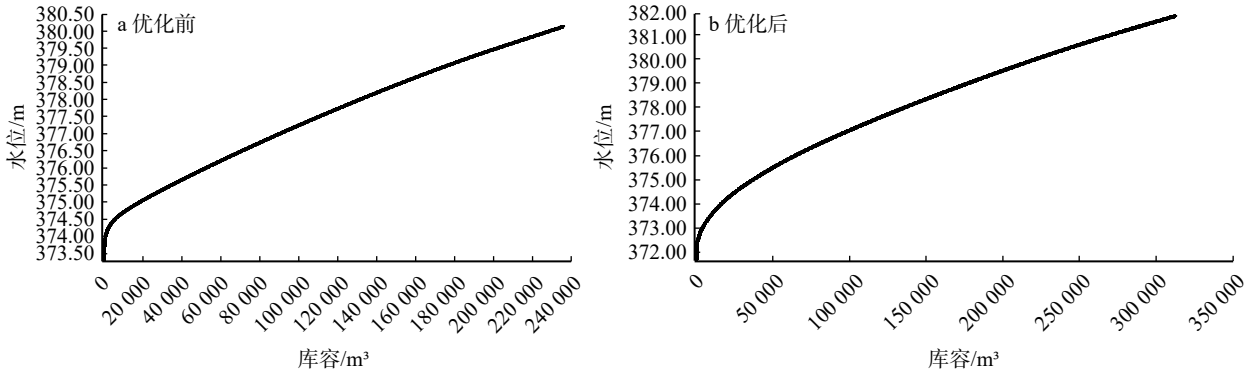


图 7　水位–库容曲线

Fig. 7　Water level-reservoir capacity curves

北部。总面积占比为 4.28%，较优化前增加 2.23 个百分点。其中最小面积为 179.92 m^2，最大面积为 749.33 m^2，平均面积为 476.41 m^2。

通过叠加土壤含水量与光照两种生境因子，得到研究区最终的生境类型(图 9)。统计结果显示，研究区内共存在 6 种生境类型(表 6)。

优化前，按照面积占比从高到低依次为次强日照超旱生生境、强日照超旱生生境、强日照旱生生境、强日照季节性湿生生境、次强日照旱生生境、次强日照季节性湿生生境。其中，次强日照超旱生生境面积占比最高(48.57%)，强日照超旱生生境次之(44.26%)，二者合计占比达 92.83%，构成主要生境类型，其余类型占比仅 7.17%。

优化后，6 类生境按照面积占比排序变为次强

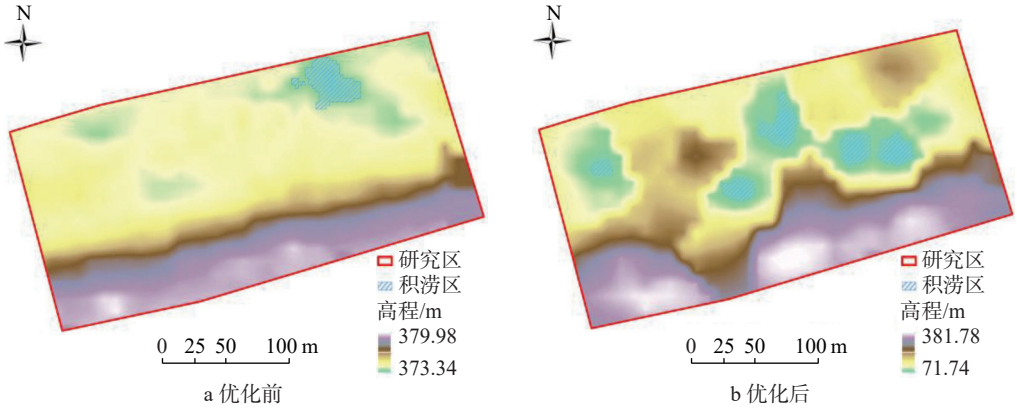


图 8 场地积涝区

Fig. 8 Site waterlogging area

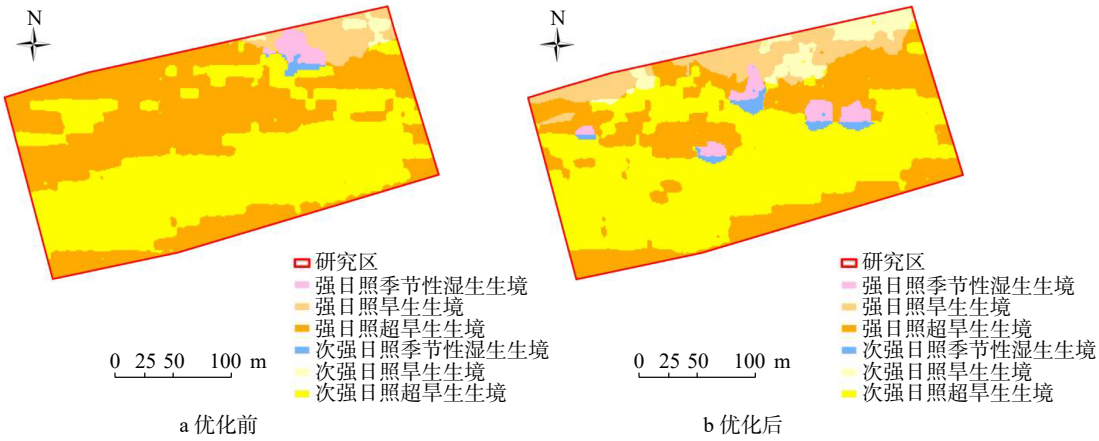


图 9 优化前后生境分类

Fig. 9 Habitat classification before and after optimization

表 6 优化前后生境类型面积统计

Tab. 6 Area statistics of habitat types before and after optimization

生境分类	优化前		优化后	
	生境类型面积/m^2	占比/%	生境类型面积/m^2	占比/%
强日照季节性湿生生境	862.64	1.55	1 565.02	2.81↑
强日照旱生生境	2 282.95	4.10	5 208.10	9.35↑
强日照超旱生生境	24 647.07	44.26	16 991.31	30.51↓
次强日照季节性湿生生境	277.29	0.50	817.02	1.47↑
次强日照旱生生境	565.93	1.02	2 658.05	4.77↑
次强日照超旱生生境	27 047.13	48.57	28 443.51	51.08↑
合计	55 683.00	100.00	55 683.00	100.00

日照超旱生生境、强日照超旱生生境、强日照旱生生境、次强日照旱生生境、强日照季节性湿生生境、次强日照季节性湿生生境。强日照超旱生生境是唯一面积占比减少的类型，较优化前减少 13.75 个百分点；其他生境类型的面积占比均有不同程度增加。优化后，次强日照超旱生生境和强日照超旱生生境仍为主要类型，占比合计 81.59%。而次强日照季节性湿生生境的面积虽增加了 0.97 个百分点，占比达到 1.47%，依旧是面积最小的生境类型。

景观格局指数分析结果(表 7)显示，地形优化后斑块数量 NP 增加了 44 个，斑块密度 PD 提高了 789.80 个/km^2，表明单一的大斑块分散为多个小斑块，这有利于打破原有大片连续、缺乏视觉焦点的景观格局。分离度 DIVISION 提高了 0.02，聚合度 AI 降低了 0.79 个百分点，连结度 COHESION 下降了 0.26，表明不同生境类型分布由聚集趋于分散；香农均匀性指数 SHEI 提高了 0.14，表明生境类型在分散后布局变得更加均匀；香农多样性指数 SHDI 提高

表 7　优化前后生境格局指数

Tab. 7　Habitat pattern indices before and after optimization

项目	NP/个	PD/(个·km^{-2})	SHEI	SHDI	DIVISION	AI/%	COHESION	ED/(m·hm^{-2})	LSI
优化前	48	862.44	0.55	0.98	0.70	97.50	99.31	543.70	4.50
优化后	92	1 652.24	0.69	1.23	0.72	96.71	99.05	718.90	5.53
变化	44	789.80	0.14	0.25	0.02	−0.79	−0.26	175.20	1.03

了 0.25，表明生境中各斑块类型的复杂性、变异性和丰富度得到提升。边缘密度 ED 提高了 175.20 m/hm^2，生境的单位面积边界长度提高了，边缘效应得到加强，这有利于生物多样性的加强和植物群落稳定性的形成；景观形状指数 LSI 提高了 1.03，表明各生境类型的斑块形状更加复杂，更接近自然状态。

4　讨　　论

4.1　地形设计对植物生境的影响和价值

研究以一块绿地为研究对象，针对其土壤干旱、地形配置单一和生境空间均质化问题，基于不同地形特征对植物生境的作用机理和影响途径，建立地形的寻优算法程序，对程序生成的优化地形进行了生境条件和格局的对比评价。结果显示优化后地形的日均直接辐射持续时间和总辐射均值均出现下降，可能原因是地形起伏度增加使得场地阴影面积增加。曾燕等[42]对黄河流域的研究表明在平坦地区，对总辐射几乎无影响。但在起伏的山区，地形对总辐射的影响可占总辐射年总量的 20% ~ 30%，这证明了以地形起伏度调控太阳辐射是可行的。生境评估显示优化后研究区的平均土壤含水量提高了 0.24 mm，可能原因是地形起伏度的增加促进了下凹式集水结构数量的增加和容量的提升，同时坡度、坡向变化对集水效率产生积极影响。一项对天山南麓寒旱矿区微地形改造的实验结果显示，改造后平台集水坡面、蓄水沟、边坡反坡梯田、鱼鳞坑的土壤含水率分别提升 37.03%、25.85%、6.48% 和 13.22%[43]，这印证了通过地形起伏度的调控促进改善土壤干旱的路径是有效的。优化方案主要锚定水分和光照 2 项核心植物生存条件进行优化，虽达到了预期目的，但可能忽略了西北地区植物生境问题的复杂性。例如土壤沙漠化、盐渍化等指标未纳入优化算法。参考一项对松嫩平原西部微地形与土壤盐渍化关系的研究成果[44]：相对高程与土壤电导率、盐分含量、pH 和钠吸附比 4 种盐碱化指标呈极显著相关，这展示了地形优化算法在植物生境修复领域的更多可能和潜在价值，也指明了未来优化算法的研究方向。

利用地形的环境效应修复生境的一大优势在于，在完成优化地形的建设施工之后，其形态一般不会出现较大改变，因此产生的生态效益具有可持续性，这对植物群落稳定性的形成具有积极作用。方案中虽未涉及具体植物种类的生长效果评价，但可以预计在缺水地区优化方案对多数植物有积极作用，因为水是此类地区植物生长的主要限制因素。蒋冲等[45]在分析自然植被净初级生产力(net primary productivity，NPP)与 9 项气候指标对渭河流域(本文研究区所属流域)的关系后发现，NPP 与降水、相对湿度和湿润指数呈显著正相关。郭晓鸽等[46]对关中地区(本文研究区所属地区)长达 50 年的气候生产力研究结果显示：降水与气候生产力相关性系数为 0.96，关中地区降水量每增加 l0% ~ 20%，植被气候生产力将增加 7%~14%。以上研究，说明水因子对区域植被生产力的关键性。由于黄土区土壤水分水平变化与该地区的降水量的区域变化基本是一致的[47]，因此可以判断平均土壤含水量提升总体上会对多数植物生长产生积极影响。但需要强调的是，不同植物种类对土壤含水量提升的响应程度可能有差异，若土壤含水量增幅过大，可能对部分原生植物生长产生抑制作用，因此地形设计需要建立在对影响作用和植物耐受性的合理评估上。就本研究而言，优化前场地平均土壤含水率为 0.155%，优化后上升至 0.179%，均未超过超旱生生境 0.28% 的土壤含水率上限，因此出现因过高土壤含水率导致的植物生长受抑的概率较低，优化方案整体有效。

4.2　遗传算法对地形设计和植物生境优化的适用性

微地形改造的环境影响观测试验耗时在数月[43]至数年[44]不等，采用计算机辅助设计和模型评价的方法设计微地形耗时在数小时至数日间，且需要在一次成功的条件下。而采用遗传算法进行地形方案的寻优与测评仅需数秒至数分钟，且可以同时测评多个环境因子和地形方案，在时间成本上无疑占有较大优势。这种优势主要来自遗传算法较强的全局搜索和并行计算能力[48]，对于植物生境优化这种复杂[49]、非线性[50]问题有较好的适用性。此外，全过程的数字化也避免了主观因素对结果的干扰，提升了设计的科学性、精确性。

在适用尺度上，算法本身并没有限制，但由于地形设计以植物生境优化为目标，而绿地植物个体和

群落的研究尺度通常是中小尺度，因此中小尺度是该设计方法的适用尺度。此外，由于算法的求解目标是根据设计场地的具体问题设定的，而场地的生态问题往往具有特异性，因此这可能会限制算法应用范围，即本算法适用于存在“日照导致的土壤干旱、地形配置单一和生境空间均质化问题”的场地。但这种算法的特异性并不会造成方法的局限性，因为遗传算法本身易于调整和定制，当场地变化时可根据具体问题调整算法的求解目标，例如在过于阴暗潮湿的场地，可将本文中“降低太阳入射辐射”的算法目标，调整为“增加太阳入射辐射”。由此可见，所构建的地形优化方法在应对不同场地问题时具有灵活性，这有利于拓展方法的适用范围。

在未来的研究中，我们将进一步完善和丰富参数化程序功能体系，以提高程序在面对不同场地问题和设计目标时的可用性，结合植物群落种植设计需求，建立协同优化植物群落稳定性和生态服务功能的一体化流程，拓展程序对生态要素和设计要素的综合分析和可视化能力，提高多因子分析的效率和精度，融入更多前沿算法，进一步提升全设计过程的智能化程度。

5 结　　论

研究建立了基于遗传算法的参数化地形设计方法，该方法能快速找到地形参数最优解，通过地形的调优定向干预生境、实现既定的生境优化目标。在对渭河北岸约 5.57 hm^2 场地的地形设计实践中，通过该方法有效促使地形最大起伏度增加了 0.36 m，日均直接辐射持续时间下降了 0.36 h，总辐射的平均值下降了 11.53（kW·h）/m^2，平均土壤含水量提高了 0.24 mm，生境的多样性和均匀性指标分别提高了 0.25 和 0.14，使场地地形配置单一、土壤干旱、生境空间均质化等问题得到改善，证明了方法的科学性和可行性。本研究表明，该数智化方法在提升生境营造的效率、精度与综合性方面具有显著优势，为生境修复与生态设计的智能化发展提供了可靠的技术路径。

参 考 文 献

[1] 贺金生, 陈伟烈. 陆地植物群落物种多样性的梯度变化特征 [J]. 生态学报, 1997, 17(1): 91−99.
He J S, Chen W L. A review of gradient changes in species diversity of land plant communities [J]. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17(1): 91−99.

[2] Lucena R L, Fernando E, Borges D A, et al. The influence of altitude on the climate of semiarid areas: contributions to conservation[J]. The International Journal of Climate Change: Impacts and Responses, 2022, 14(2): 81.

[3] Sanroma E, Pallel E, Sanchez-Lorenzo A. Long-term changes in insolation and temperatures at different altitudes[J]. Environmental Research Letters, 2010, 5(2): 24006.

[4] 赵晗, 王海燕, 罗鹏, 等. 微地形对云冷杉阔叶混交林土壤有机碳和全氮的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(8): 88−97.
Zhao H, Wang H Y, Luo P, et al. Effects of micro-topography on soil organic carbon and total nitrogen in mixed spruce-fir-broadleaf forest[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(8): 88−97.

[5] Wubie M A, Assen M. Effects of land cover changes and slope gradient on soil quality in the Gumara Watershed, Lake Tana Basin of Northwest Ethiopia[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2020, 1(6): 85−97.

[6] Brosens L, Campforts B, Robinet J, et al. Slope gradient controls soil thickness and chemical weathering in subtropical Brazil: understanding rates and timescales of regional soilscape evolution through a combination of field data and modeling [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2020, 125(6): e2019JF005321.

[7] Li H, Guan Q, Sun Y, et al. Spatiotemporal analysis of the quantitative attribution of soil water erosion in the upper reaches of the Yellow River Basin based on the RUSLE-TLSD model [J]. Catena, 2022(212): 106081.

[8] 袁杰, 曹广超, 杨登兴, 等. 祁连山黑河源区植被 NDVI 时空变化特征及影响因素分析 [J]. 生态科学, 2021, 40(5): 172−182.
Yuan J, Cao G C, Yang D X, et al. Temporal and spatial variation characteristics and influencing factors of vegetation NDVI in Heihe source region of Qilian Mountains [J]. Ecological Science, 2021, 40(5): 172−182.

[9] Zhou Z, Zhang Z, Zou X, et al. Quantifying wind erosion at landscape scale in a temperate grassland: nonignorable influence of topography [J]. Geomorphology, 2020, 370: 107401.

[10] Hu A, Duan Y, Xu L, et al. Litter decomposes slowly on shaded steep slope and sunny gentle slope in a typical steppe ecoregion [J]. Ecology and Evolution, 2021, 11(6): 2461−2470.

[11] Yang J, El-Kassaby Y A. The effect of slope aspect on vegetation attributes in a mountainous dry valley, Southwest China [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 16465.

[12] Ma S, Qiao Y P, Wang L, et al. Terrain gradient variations in ecosystem services of different vegetation types in mountainous regions: vegetation resource conservation and sustainable development [J]. Forest Ecology and Management, 2021, 482: 118856.

[13] Barajas-Barbosa M P, Weigelt P, Borregaard M K, et al. Environmental heterogeneity dynamics drive plant diversity on oceanic islands [J]. Journal of Biogeography, 2020, 47(10): 2248−2260.

[14] Deák B, Kovács B, Rádai Z, et al. Linking environmental heterogeneity and plant diversity: the ecological role of small natural features in homogeneous landscapes [J]. Science of the Total Environment, 2021, 763: 144199.

[15] 田瑞云. 地形复杂度及其在生物多样性保护规划中的应用研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2013.
Tian R Y. Topographic complexity and its applcation in conservation planning of biodiversity [D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2013.

[16] 贺文君, 韩广轩, 颜坤, 等. 微地形对滨海盐碱地土壤水盐分布和植物生物量的影响 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(11): 3585−3597.
He W J, Han G X, Yan K, et al. Effects of microtopography on plant biomass and the distribution of both soil water and salinity in coastal saline-alkali land [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(11): 3585−3597.

[17] 王志勇, 李嘉宁, 彭晓, 等. 水土平衡的生境营造模式及其工程应用 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2024, 60(1): 165−174.
Wang Z Y, Li J N, Peng X, et al. Habitat creation modes based on balance between water and soil and its application in ecological restoration engineering [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2024, 60(1): 165−174.

[18] Garcia-Avalosa S, Rodriguez-Caballeroa E, Mirallesa I, et al. Water harvesting techniques based on terrain modification enhance vegetation survival in dryland restoration [J]. Catena, 2018, 167: 319−326.

[19] 徐勇, 安祥生, 杨波, 等. 黄土高原坡改梯综合效益分析: 以燕沟流域为例 [J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(1): 1−5.
Xu Y, An X S, Yang B, at al. Synthetic analyses of effects of farmland terracing on the Loess Plateau: a case study of Yangou Watershed [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2010, 8(1): 1−5.

[20] 袁嘉, 钱深华, 游奉溢, 等. 基于群落构建机制的城市棕地草本植物生态种植研究 [J]. 景观设计学 (中英文), 2022, 10(6): 10−31.
Yuan J, Qian S H, You F Y, et al. Herbaceous planting for ecological restoration of urban brownfields based on mechanisms of the assembly of plant communities [J]. Landscape Architecture Frontiers, 2022, 10(6): 10−31.

[21] 何塞·米格尔·拉米拉斯, 保罗·法里尼亚·马克斯, 原茵, 等. 数字地面模型新进展: TIN2.0、3D 表面塑型线和自由形态建模工具 [J]. 中国园林, 2020, 36(9): 36−41.
Jose M L, Paulo F M, Yuan Y, et al. Advances in digital terrain modeling: TIN 2.0, 3D surface sculpting lines and freeform modeling tools [J]. Chinese Landscape Architecture, 2020, 36(9): 36−41.

[22] Tai L. Assessing the impact of computer use on landscape architecture professional practice: efficiency, effectiveness, and design creativity [J]. Landscape Journal, 2003, 22(2): 113−125.

[23] 刘勇, 井文涌. 地理信息系统技术及其在环境科学中的应用 [J]. 环境科学, 1997(2): 64−67.
Liu Y, Jing W Y. Geographic information system technology and its application in environmental science[J]. Environmental Science, 1997(2): 64−67.

[24] Li Z, Zhu C, Gold C. Digital terrain modeling: principles and methodology [M]. Boca Raton: CRC Press, 2004.

[25] Macdougall E B. Microcomputers in landscape architecture [M]. New York: Elsevier, 1983.

[26] 石松, 陈崇成, 王钦敏, 等. 地物仿真及交互可视化编辑工具的设计与实现 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(3): 659−662.
Shi S, Chen C C, Wang Q M, et al. Design and implement of terrain & object simulation and editing visually kit [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(3): 659−662.

[27] 邵凯. 数字地形技术在环境规划设计中的应用 [J]. 浙江大学学报 (理学版), 2010, 37(3): 348−353.
Shao K. Digital terrain analysis for landscape planning & design [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2010, 37(3): 348−353.

[28] 李界光, 唐丽玉, 陈崇成, 等. 面向景观规划设计的数字地形交互式编辑技术 [J]. 地球信息科学学报, 2012, 14(2): 179−186.
Li J G, Tang L Y, Chen C C, et al. On interactive digital terrain editing for landscape planning & design and its implementation [J]. Journal of Geo-information Science, 2012, 14(2): 179−186.

[29] 彭宏, 王兴华. 具有 Elitist 选择的遗传算法的收敛速度估计 [J]. 科学通报, 1997, 42(2): 144−147.
Peng H, Wang X H. Convergence rate estimation of genetic algorithm with Elitist selection [J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(2): 144−147.

[30] 朱洪芬. 黄土高原太原盆地区土壤养分空间分异与尺度效应研究 [D]. 太谷: 山西农业大学, 2017.
Zhu H F. Spatial variation and multi-scale effect of soil nutrients in Taiyuan Basin on the Chinese Loess Plateau [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2017.

[31] 马龙, 刘廷玺. 科尔沁沙地植物生态型与地下水位及土壤水分的关系研究 [J]. 中国沙漠, 2007(3): 391−396.
Ma L, Liu T X. Relationship of plant ecotype with groundwater depth and soil moisture in Horgin Sandy Land [J]. Journal of Desert Research, 2007(3): 391−396.

[32] 西安市地方志编纂委员会. 西安市志 (第一卷) 总类 [M]. 西安: 西安出版社, 1996: 286−289.
The Compilation Committee of Xi'an Local Chronicles. Xi'an chronicles (Vol. 1) general category [M]. Xi'an: Xi'an Publishing House, 1996: 286−289.

[33] 卢金锁, 程云, 郑琴, 等. 西安市暴雨强度公式的推求研究 [J]. 中国给水排水, 2010, 17(3): 82−84.
Lu J S, Cheng Y, Zheng Q, et al. Derivation of rainstorm intensity formula in Xi'an City [J]. China Water & Wastewater, 2010, 17(3): 82−84.

[34] Hansen G, Alvarez E. Landscape design: analyzing site conditions [J]. Environmental Horticulture, 2016(4): 1−4.

[35] Hardiman L. The many shades of sunlight [J]. Horticulture, 2000, 97(2): 34−37.

[36] Hopkins T M, Miller C M. Systems and methods for detecting and translating sunlight exposure data: US20050230598A1 [P]. 2005−10−20.

[37] 常玉昉, 高阳, 谢臻, 等. 京津冀地区生境质量与景观格局演变及关联性 [J]. 中国环境科学, 2021, 41(2): 848−859.
Chang Y Y, Gao Y, Xie Z, et al. Spatiotemporal evolution and

spatial correlation of habitat quality and landscape pattern over Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. China Environmental Science, 2021, 41(2): 848−859.

[38] 樊应凭, 金晓斌, 陈传钊, 等. 沿海都市区景观格局与生态环境质量的时空演变及关联性分析: 以海口市秀英区为例 [J]. 现代城市研究, 2023(3): 116−124.
Fan Y P, Jin X B, Chen C Z, et al. Spatial-temporal evolution and correlation analysis of landscape pattern and ecological environment quality in coastal metropolitan area: a case study of Xiuying District, Haikou [J]. Modern Urban Research, 2023(3): 116−124.

[39] 唐燕, 冯兴华, 曾凡盛, 等. 水网型城市的蓝绿景观变化对生境质量的影响分析: 以南昌市为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(9): 1949−1959.
Tang Y, Feng X H, Zeng F S, et al. Impact of blue-green landscape changes on habitat quality in water network cities: a case study of Nanchang City [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(9): 1949−1959.

[40] 吉静怡, 赵允格, 张万涛, 等. 黄土丘陵区生物结皮空间分布的代表性景观指数 [J]. 应用生态学报, 2022, 33(7): 1878−1884.
Ji J Y, Zhao Y G, Zhang W T, et al. Representative landscape indices of biological soil crusts distribution in the hilly Loess Plateau of China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(7): 1878−1884.

[41] Singh J, Knapp H V, Demissie M. Hydrological modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT [J]. Journal of American Water Resources Association, 2005, 41(2): 343−360.

[42] 曾燕, 邱新法, 潘敖大, 等. 地形对黄河流域太阳辐射影响的分析研究 [J]. 地球科学进展, 2008, 23(11): 1185−1193.
Zeng Y, Qiu X F, Pan A D, et al. Distributed modeling of global solar radiation over rugged terrain of the Yellow River Basin [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(11): 1185−1193.

[43] 鲁元波, 严成, 宋春武, 等. 微地形改造对天山南麓寒旱矿区土壤水分动态的影响 [J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 126−132.
Lu Y B, Yan C, Song C W, et al. Effects of micro-topography modification on soil moisture dynamics in cold and arid mining areas of southern piedmont of Tianshan Mountain [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 126−132.

[44] 杨帆, 章光新, 尹雄锐, 等. 松嫩平原西部土壤盐碱化空间变异与微地形关系研究 [J]. 地理科学, 2009, 29(6): 869−873.
Yang F, Zhang G X, Yin X R, et al. Spatial variability of soil salinity and alkalization and its correlation with mic-topography in the west of Songnen Plain [J]. Geographical Science, 2009, 29(6): 869−873.

[45] 蒋冲, 王飞, 穆兴民, 等. 气候变化对渭河流域自然植被净初级生产力的影响研究 (Ⅱ): 渭河流域自然植被净初级生产力的研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(5): 53−57.
Jiang C, Wang F, Mu X M, et al. Effect of climate change on net primary productivity (NPP) of natural vegetation in Wei River Basin (Ⅱ): NPP of natural vegetation in Wei River Basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(5): 53−57.

[46] 郭晓鸽, 庞奖励, 史兴民, 等. 关中平原近 50 年来气候生产力的变化及对植物影响研究 [J]. 农业系统科学与综合研究, 2010, 26(4): 395−400.
Guo X G, Pang J L, Shi X M, et al. Variation of climate productivity and its impact on plants in Guanzhong Plain for last 50 years [J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2010, 26(4): 395−400.

[47] 张雷明, 上官周平. 黄土高原土壤水分与植被生产力的关系 [J]. 干旱区研究, 2002, 20(4): 59−63.
Zhang L M, Shangguan Z P. Relationship between the soil moisture and the vegetation productivity in the loess [J]. Arid Zone Research Plateau, 2002, 20(4): 59−63.

[48] 马永杰, 云文霞. 遗传算法研究进展 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29(4): 1201−1206.
Ma Y J, Yun W X. Research progress of genetic algorithm [J]. Application Research of Computers, 2012, 29(4): 1201−1206.

[49] 王宇超, 王得祥. 佛坪自然保护区植物群落物种多样性和复杂性的海拔格局研究 [J]. 西北植物学报, 2013, 33(1): 169−176.
Wang Y C, Wang D X. Study on elevational patterns of plant species diversity and community complexity in Foping Natural Reserve [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, 33(1): 169−176.

[50] 杨元合, 张典业, 魏斌, 等. 草地群落多样性和生态系统碳氮循环对氮输入的非线性响应及其机制 [J]. 植物生态学报, 2023, 47(1): 1−24.
Yang Y H, Zhang D Y, Wei B, et al. Nonlinear responses of community diversity, carbon and nitrogen cycles of grassland ecosystems to external nitrogen input [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(1): 1−24.

(责任编辑 范 娟
责任编委 李 雄)