

引用格式: 苏常红, 刘宇, 宋子豪, 寻雅雯. 干旱区灌丛形态对水文连通性的响应及生态效应[J]. 山地学报, 2023, 41(3): 375-385.

SU Changhong, LIU Yu, SONG Zihao, XUN Yawen. Responses of shrub morphology to hydrological connectivity and their ecological effects in arid areas [J]. Mountain Research, 2023, 41(3): 375-385.

干旱区灌丛形态对水文连通性的响应及生态效应

苏常红¹, 刘宇², 宋子豪¹, 寻雅雯¹

(1. 天津师范大学 地理与环境科学学院, 天津 300387;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要: 干旱区生态系统的水文连通性影响植被斑块形态的空间分异。植被形态对水文连通性的适应是一个复杂且长期的过程。研究植被与水文连通性, 过去多基于群落以上尺度, 不涉及微观尺度。从植株个体角度探讨植被斑块形态与水文连通性关系, 有助于挖掘微观尺度上景观格局对生态过程的驱动机制。本研究以黄土高原丘陵沟壑区多年生灌丛作为研究对象, 以高分辨率无人机航拍照片解译和野外定点观测为研究手段, 量化植被斑块形态与水文连通性之间定量关系, 分析二者对泥沙截留与土壤固碳等关键生态过程的影响。结果表明: (1) 坡面灌丛斑块总体呈现横向生长趋势, 灌丛斑块纵横比小于1; 灌丛斑块纵横比从坡顶到坡底逐渐增大, 分别为0.64、0.70、0.79、0.83; (2) 灌丛方向与水流方向夹角从坡顶到坡底先减小再增大; 坡面中部的坡度最大, 灌丛方向最接近与水流垂直的方向; (3) 灌丛的汇流累积量从坡顶到坡底逐渐增大, 表明其水文连通度逐渐增大; 水文连通度与灌丛斑块纵横比呈正相关关系; 当水文连通度足够大时, 灌丛在横纵方向上的生长没有倾向, 形状近似为圆形; (4) 泥沙拦截量和固碳效率随坡位下降而下降, 二次曲线拟合表明泥沙拦截量和固碳效率随水文连通度增加呈增加态势, 表明水文连通度有促使植株自主优化株型、提升泥沙截留和固碳效率的功效。本研究有助于为黄土高原干旱区植被结构优化及生态建设提供案例分析与借鉴。

关键词: 水文连通性; 灌丛; 泥沙截留; 土壤固碳; 黄土高原

中图分类号: Q948.2, P935.1

文献标志码: A

水文连通性(hydrological connectivity), 又称水文连通度或水文连接度, 常用来描述景观中水和以水流为媒介的物质传输的通畅程度^[1], 是表征地貌过程与植被动态相互作用的重要指标^[2]。在干旱半干旱内陆区, 生态系统处于水分匮乏环境, 破碎化严重, 气候变化和人类活动持续干扰水文连通性, 水文连通性与生态系统的关系十分复杂。水文连通性可用来定量评估上游水源区和下游景观单元通过水文过程建立的物质、能量和信息的关联度, 特别是在描述地表景观影响下径流和泥沙的运动轨迹方面具有很强的优势。提高水文连通性, 对于促进干旱半干旱内陆区水生态系统的形成、发展、演替具有重要

作用。

干旱半干旱区的生态系统一般具有鲜明的斑块状植被分布格局, 水文连通性是干旱区植被斑块特征的重要影响因素^[3-4]。植被斑块形态特征的空间分异与水文连通度的空间格局紧密相关。植被形态特征对水文连通性的适应是一个长期的过程。对植被与水文连通性关系的研究, 多在群落以上的尺度展开, 多考虑植被盖度对水文连通性的影响, 从植株单株个体及斑块形状角度来分析其形态特征的水文连通性响应研究, 还不多见。对斑块形状与水文连通性研究有助于揭示微观尺度上景观格局驱动生态过程的机理, 填补景观生态学在微观尺度上格局过

收稿日期(Received date): 2023-01-04; 修回日期(Accepted date): 2023-06-16

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(42271302, 42071239)。[National Natural Science Foundation of China (42271302, 42071239)]

作者简介(Biography): 苏常红(1974-), 男, 山西省晋城人, 博士, 副教授, 研究方向: 景观生态学。[SU Changhong (1974-), male, born in Jincheng, Shanxi province, Ph.D., associate professor, research on landscape ecology] E-mail: sxjcsch@hotmail.com

程研究的不足。

灌丛具有深根系和较强的抗旱能力,是干旱半干旱区的优势物种。本研究选择黄土高原丘陵沟壑区北缘东芦河流域多年生灌丛作为研究对象。东芦河流域实施退耕还林还草工程 20 多年来,坡面完整、微地貌发育较充分,灌丛植被和草地镶嵌分布,为分析坡面灌丛与水文连通性关系提供了一个天然的野外实验场。本研究以高分辨率无人机航拍照片解译和野外定点观测为研究手段,分析坡面尺度上灌丛植被个体形态特征及其对水文连通度异质性的响应,量化植被斑块形态指标与水文连通度之间的关系,探讨其对泥沙截留及土壤固碳的影响,以期为

小尺度上黄土高原干旱区植被结构优化及生态建设提供案例分析与借鉴。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省榆林市靖边县东芦河流域芦西村附近(图 1),处于黄土高原丘陵沟壑区北缘,北边与毛乌素沙地隔无定河干流相望。研究区属于大陆性季风气候,亦受来自西风带北支气流的影响,多年平均气温 8.8℃,最高和最低年均温分别为 15.3℃和 3.3℃;年平均降雨量 384.7 mm,多年来

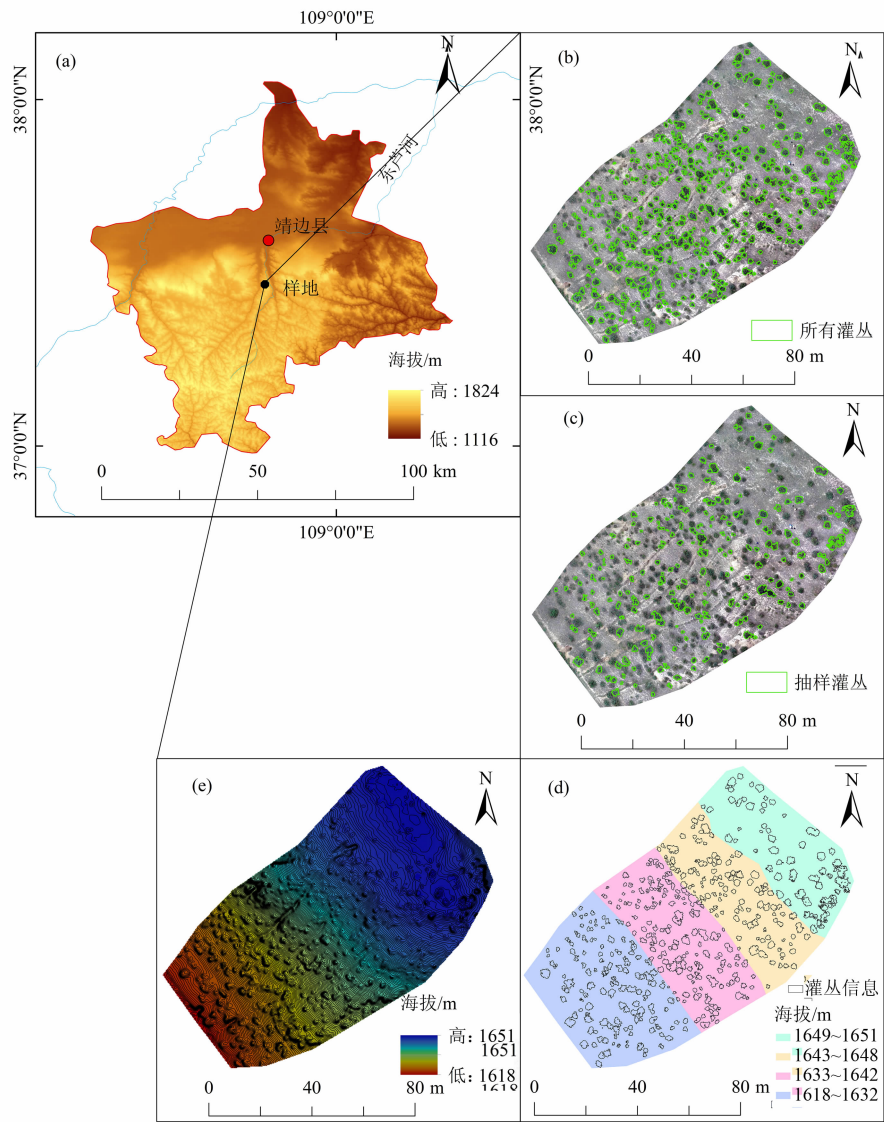


图 1 研究区位置和样地信息:(a)位置图;(b)所有灌丛;(c)抽样灌丛;(d)灌丛信息提取;(e)微地形
Fig. 1 Location of the study area and the shrub distribution and the elevation of the sampling site:
(a) location map; (b) all shrubs;(c) sampled shrubs;(d) extraction of shrubs information;(f) micro topography

年际变幅约 82.3 mm,且降雨时间集中在 6—9 月;年平均湿度为 52%。流域主要为黄土覆盖,土壤质地疏松,以砂质土为主。地带性植被为草原植被,物种以针茅、长芒草、羊草、披碱草等为主,在沟谷、阴坡分布有丁香、黄刺玫、狼牙刺等本土灌丛。该区长期以来降雨侵蚀严重^[5],叠加风蚀。退耕还林还草工程实施以来,该区经历了大规模的植被恢复和重建^[6]。弃耕恢复草原植被和种植柠条等灌丛、建立人工植被是该区植被恢复的两种主要途径。柠条因其较强的水分胁迫适应性和可作为牧食植物而在该区广泛种植^[7],形成灌草镶嵌分布的植被结构。

1.2 数据获取与处理

1.2.1 灌丛分布提取

灌丛分布从大疆精灵 3 标准版 (DJI Phantom 3 Standard) 四旋翼无人机拍摄的 RGB 照片提取。利用 GS Pro 软件设计无人机飞行路线,飞行高度为 15 m,航向重叠和旁向重叠分别为 90% 和 60%。通过悬停拍照模式共获取 280 张航拍照片。采用 Agisoft Photoscan 软件建立数字表面模型 (Digital Surface Models, DSM),其分辨率为 3 cm;并进一步生成分辨率为 2 cm 的坡面数字正射影像 (Digital Orthophoto Map, DOM)。经影像处理去掉灌丛植被生成坡面 DEM。使用 eCognition (易康) 软件结合目视解译提取灌丛斑块信息 (图 2)^[8]。eCognition 软件采用决策专家系统支持的模糊分类算法,是首个基于目标信息的遥感信息提取工具。与传统的遥感分析软件单纯基于光谱信息进行影像分类相比,eCognition 软件采用面向对象的分类方法,具有更高的辨识度和精确度。

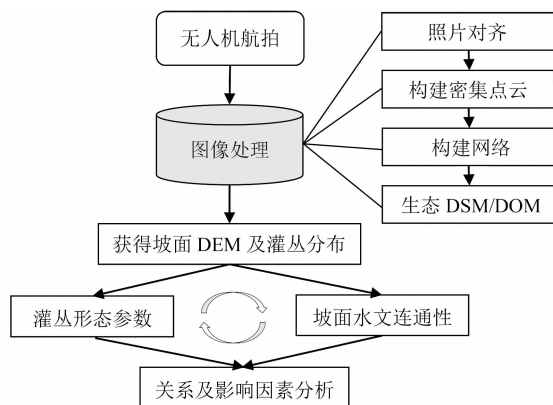


图 2 数据处理流程

Fig. 2 Data processing flowchart

1.2.2 灌丛形状参数及方向数据的获取

根据坡度变化,沿坡面由上到下约每 30 m 划分一个坡位,共四个坡位(标为 A、B、C、D)。在每个坡位随机抽取 50% 的灌丛进行形态参数计算。测量每个灌丛斑块投影形状的长度 a 与宽度 b ,计算得到各个坡位灌丛的纵横比 b/a (图 2)。灌丛的纵横比等于 1 时,表明灌丛在横向与纵向的生长没有明显倾向;纵横比小于 1 表明灌丛更倾向于横向生长,反之则倾向于纵向生长。

对坡面所有灌丛斑块,以最小外接矩形长边的方向作为其生长方向。根据坡面 DEM 计算得到各个灌丛斑块的平均水流流向。灌丛方向和水流流向的夹角为 $0^\circ \sim 180^\circ$,越接近 90° ,表明灌丛形态适应水分的程度越大,受水分条件限制越大。

1.2.3 水文连通度量化

灌丛斑块水文连通度用汇流累积量来表征,其基本思想是数字地面高程模型每点处的水量按照自然水流从高处流往低处的自然规律,根据地形确定的水流方向计算每点处流经的水量,从而得到该点的汇流累积量^[9]。灌丛的水文连通度越大,表明其越容易获取水分,生长受水分条件的限制越小。ArcGIS 软件下的水文分析模块可以实现汇流累积量的计算。首先基于 DEM (数字高程图, $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$),采用 ArcGIS 软件下的 Flow Direction 模块提取水的流向,再采用 Sink 工具和 Fill 工具进行洼地计算与填充并重新生成新的水流方向;最后,以新生成的水流方向为输入,采用 Fill Accumulation 工具计算得到汇流累积量的结果 (图 2)。为避免汇流累积量的重复计算,选取灌丛内的最大汇流累积量作为各灌丛斑块的水文连通度量化结果。

1.2.4 灌丛泥沙拦截量及固碳效率获取

灌丛斑块拦截从上游径流带来的泥沙,并在灌丛基部堆积;依据堆积体沿坡面上端和下端的宽度和厚度,以及堆积体的长度测量泥沙堆积体体积。堆积体沿坡面的上端截面面积和下端截面面积以近似矩形方式进行估算。堆积体体积和质量计算如下:

$$V_s = \frac{1}{3} \cdot (S_{\text{up}} + \sqrt{S_{\text{up}} \cdot S_{\text{dn}}} + S_{\text{dn}}) \cdot L \quad (1)$$

$$SED_s = V_s \cdot BD_s \quad (2)$$

式中, V_s 为泥沙截留堆积量 (m^3); S_{up} 与 S_{dn} 分别为堆积体沿坡面上端和下端的面积; L 为堆积体长度; SED_s 为泥沙堆积体的质量; BD_s 为堆积体容重。

在灌丛下泥沙堆积体 0 ~ 10 cm 内取土样,每个样点三个重复。室内实验测量土壤有机碳;室温下风干土壤,用重铬酸钾氧化-外加热法测定土壤有机碳含量;环刀法测量土壤容重。

1.3 数据分析方法

利用 Excel 2019 统计分析工具进行灌丛形态参数的分析和制图。使用 ArcGIS 的水文分析工具 (Hydrological Analysis) 和区域统计工具 (Zonal Statistics) 进行斑块汇流累积量和水流流向的计算。

2 结果分析

2.1 灌丛形态的坡面分异

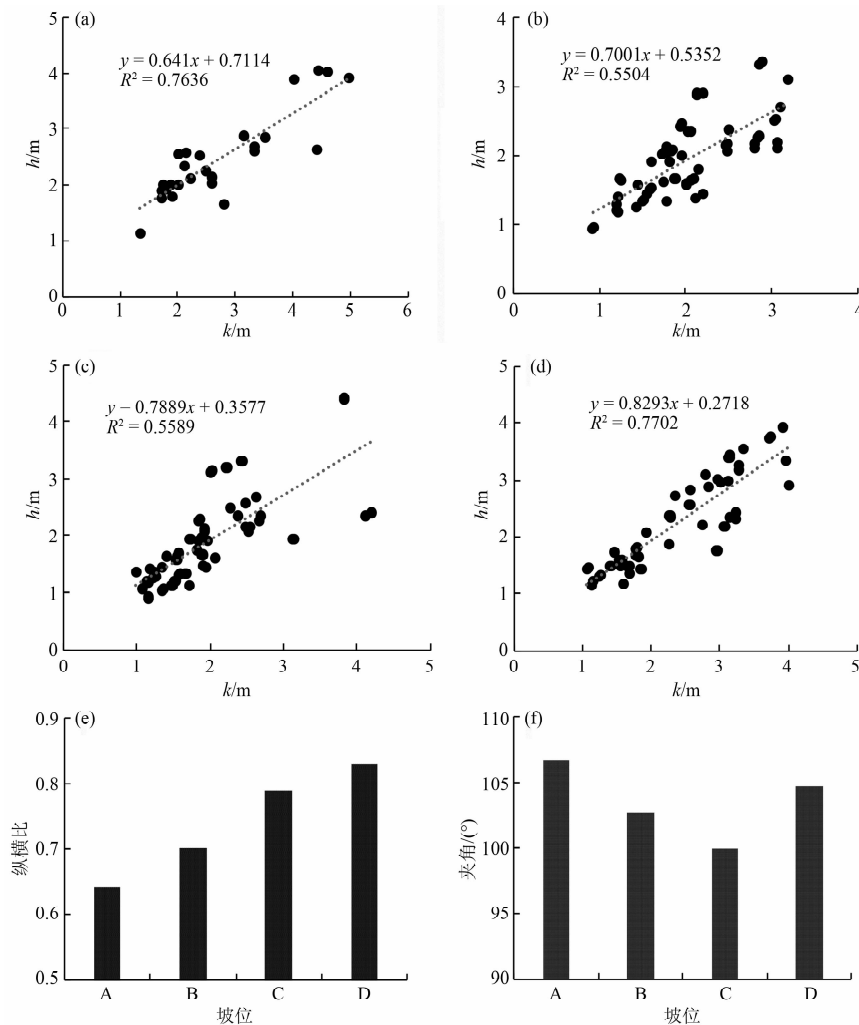
整个坡面上,灌丛斑块纵横比小于 1,表明研究区内灌丛主要呈现横向生长的形态。从坡顶至坡

底,灌丛斑块纵向长度与横向长度线性拟合的斜率逐渐增大,即纵横比 b/a 呈现逐渐增大的趋势。从高低 A、B、C、D 四个坡位的纵横比分别为 0.64、0.70、0.79、0.83 (图 3),由此可见:表明从坡顶到坡底,灌丛横向生长的程度逐渐减小,灌丛斑块呈现由扁向圆变化的趋势。

从坡顶到坡底,灌丛方向与水流方向的夹角先减小再增大。坡顶至坡底 A、B、C、D 四个坡位的夹角分别为 106.76°、102.78°、99.99°、104.70° (图 3)。坡顶区域夹角最大,随坡面下降,夹角逐渐减小,坡中位置达到最小值。坡面继续下降,夹角增大。

2.2 灌丛斑块形状与水文连通度的关系及其坡位分异

以各灌丛斑块所在位置的汇流累积量来表征其水文连通度。坡面由上到下,灌丛的汇流累积量逐



h 为灌丛平行等高线方向的长度; k 为灌丛垂直等高线方向的长度; A、B、C、D 为从低到高四个坡位。

图 3 各坡位灌丛斑块形态(纵横比):(a) A 坡位;(b) B 坡位;(c) C 坡位;(d) D 坡位

Fig. 3 Shrub patches' morphology (horizontal/vertical ratio) at each slope position:

(a) slope position A; (b) slope position B; (c) slope position C; (d) slope position D

渐增大,表明其水文连通度逐渐增大;从高到低四个坡位的汇流累积量分别为 101.21、245.47、628.12、790.51(图 4)。

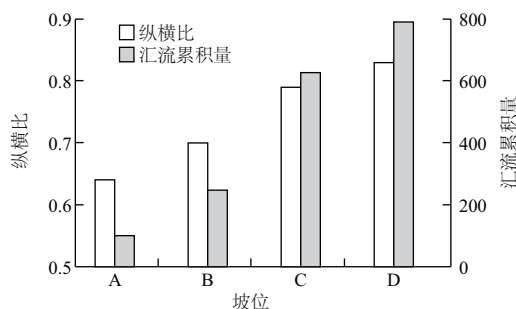


图 4 灌丛斑块纵横比与汇流累积量

Fig. 4 Horizontal/vertical ratio and flow accumulation

灌丛斑块纵横比随坡位下降而增加,与汇流累积量呈正相关关系。同一坡位,水文连通度越大,灌丛斑块的纵横比越接近于 1(图 5)。水文连通度较大的灌丛,其水文连通度随纵横比变化近似呈倒 U 形(图 5b、图 5c、图 5d),二次曲线拟合顶点对应的纵横比分别为 0.93、0.85、1.16、1.04,均值为 1。这表明当水文连通度足够大时,灌丛在横纵方向上的生长没有倾向,形状为圆形。

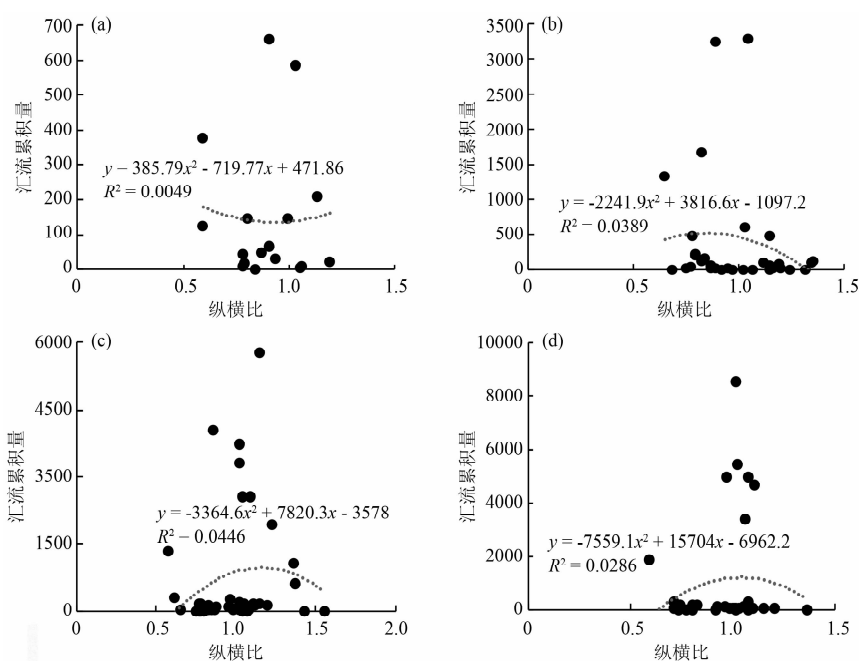


图 5 各坡位灌丛斑块纵横比与汇流累积量的关系:(a) A 坡位;(b) B 坡位;(c) C 坡位;(d) D 坡位

Fig. 5 Relations between horizontal/vertical ratio and flow accumulation at different slope positions:

(a) slope position A; (b) slope position B; (c) slope position C; (d) slope position D

2.3 灌丛斑块方向与水文连通度的关系及坡位分异

由坡顶至坡底,水文连通度逐渐增大,灌丛方向与水流方向的夹角先减小后增大,两者存在非线性关系。考虑到坡度对径流流量和流速的影响,坡度由坡顶至坡底的变化趋势为先增大后减小,从高到低四个坡位的坡度分别为 10.13°、15.51°、22.30°、19.79°,与灌丛方向呈负相关关系(图 6)。各坡位灌丛方向与水流方向的夹角均大于 90°,坡度越大,夹角越接近 90°,灌丛向垂直水流方向生长的趋势越明显。

同一坡位,当水文连通度较大时,灌丛方向与水流方向的夹角接近 90°~120°(图 7)。各灌丛斑块的水流方向均值为 204°,计算得到灌丛斑块的方向为 84°~114°,具有向着灌丛朝向正南时 90°方向的生长趋势。

2.4 灌丛形态对泥沙拦截及土壤固碳效率的影响

随坡位从高到低,泥沙拦截量与固碳效率总体上均呈现骤降再缓慢回升的趋势(图 8),泥沙拦截量在 B 坡位减少态势更为明显。从高到低四个坡位的固碳效率分别为 1.89 kg、1.00 kg、1.09 kg、1.09 kg,四个坡位泥沙拦截量分别为 276.45 kg、132.24 kg、179.96 kg、183.86 kg。泥沙拦截量越少意味着土壤侵蚀量增加,即随着坡位降低土壤侵蚀

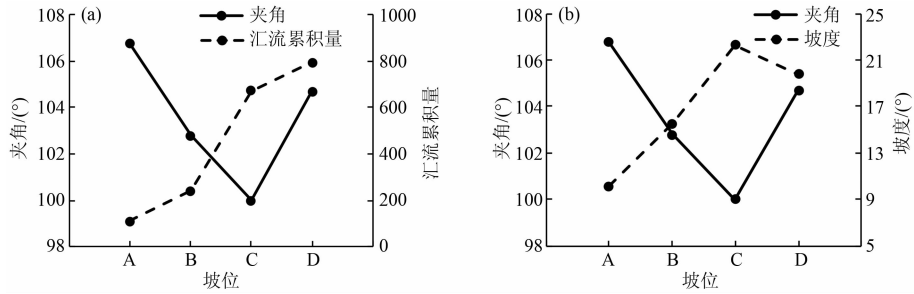


图 6 灌丛方向与水流方向的夹角和汇流累积量、坡度的关系:

(a) 夹角与汇流累积量变化情况; (b) 夹角与坡度变化情况

Fig. 6 Relations among the intersection angle of the shrub direction and the water flow direction, flow accumulation, and the slope degree: (a) variation of the intersection angle and the flow accumulation; (b) variation of the intersection angle and the slope degree

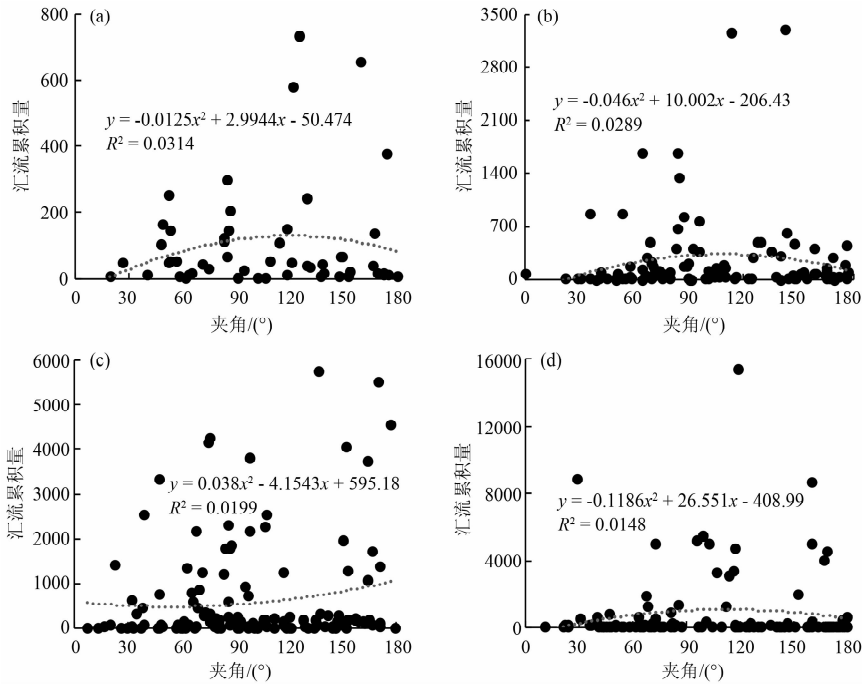


图 7 各坡位灌丛斑块与水流夹角与汇流累积量的关系: (a) A 坡位; (b) B 坡位; (c) C 坡位; (d) D 坡位

Fig. 7 Relations between the intersection angle of shrub patch and flow direction, and the flow accumulation at different slope positions: (a) slope position A; (b) slope position B; (c) slope position C; (d) slope position D

加剧。二次曲线拟合表明, 汇流累积量与泥沙拦截量呈 U 形, 且随着汇流累积量增加, 泥沙拦截量有增加的趋势(图 9a)。灌丛斑块纵横比与泥沙拦截量变化趋势相对平缓(图 9b)。汇流累积量与固碳效率二次曲线拟合呈现 U 形(图 9c)。在固碳效率方面, 灌丛形态对土壤固碳有一定的影响, 随着斑块纵横比增加, 土壤固碳略微增加(图 9d)。总体上, 固碳效率有随汇流累积量和斑块纵横比增加而增加的趋势(图 8)。

3 讨论

植株冠形是植物应对生存环境变化的一种反映, 是植物在环境和资源条件下生活史选择的结果^[5], 由环境和遗传共同作用; 植株冠形不仅影响光截获、群落稳定性、植物繁殖等, 还影响植物生活史^[10]。对水分受限的干旱区而言, 占主导地位的孤岛状的灌丛植被反映的是植株个体如何适应环境达

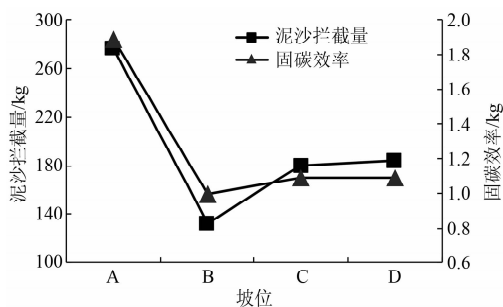


图8 各坡位泥沙拦截效率及固碳效率关系

Fig. 8 Relations of sediment retentions and carbon sequestration at different slope positions

到理想形态。例如,在干旱条件下,灌丛的水平与垂直生长、灌丛体积的增加,以及灌丛与环境的接触面,都体现了灌丛个体随着生长发育对环境的不断适应^[10-11]。本研究中,灌丛斑块冠幅有横向生长的倾向,体现了植株对于干旱环境的一种适应。植物为了应对环境竞争往往采取不同的策略,调整对资源的分配比例,如生物量分配、分枝模式、叶片表面积、叶片数量和质量,优化植物形态结构,增强环境适应

性^[12]。在干旱逆境条件下,灌丛斑块变化同时体现了植物冠形的可塑性。冠形可塑性使灌丛具有更好的适应性,占据更广的空间范围和更复杂的生境,从而成为优势物种或广幅种^[13]。

水文连通性对灌丛斑块的塑造具有潜在的影响。本研究从个体尺度上对水文连通性与植株斑块纵横比和斑块方向进行了探讨,结果显示:水文连通条件较差区域,灌丛斑块纵横比小于1,形状呈扁形,灌丛斑块方向与水流方向近似垂直;水文连通条件较好的区域,灌丛斑块横纵向生长没有明显倾向,斑块形状偏圆形。其原因可能是灌丛斑块具有主动调整斑块形状增加横向生长,从而阻挡和截留更多水分的能力,同时也可能是植物在获取水分和光照之间综合权衡的结果,相关研究^[14-15]也证实了这一点。本研究显示:坡位越高,水文连通性越小,灌丛斑块横向垂直生长的趋势也越明显。此外,灌丛方向与水流方向的夹角与坡度呈负相关,其原因可能是坡度越大,径流也越大,导致灌丛阻挡径流的难度也越大。目前在个体或斑块尺度上对水文连通性和

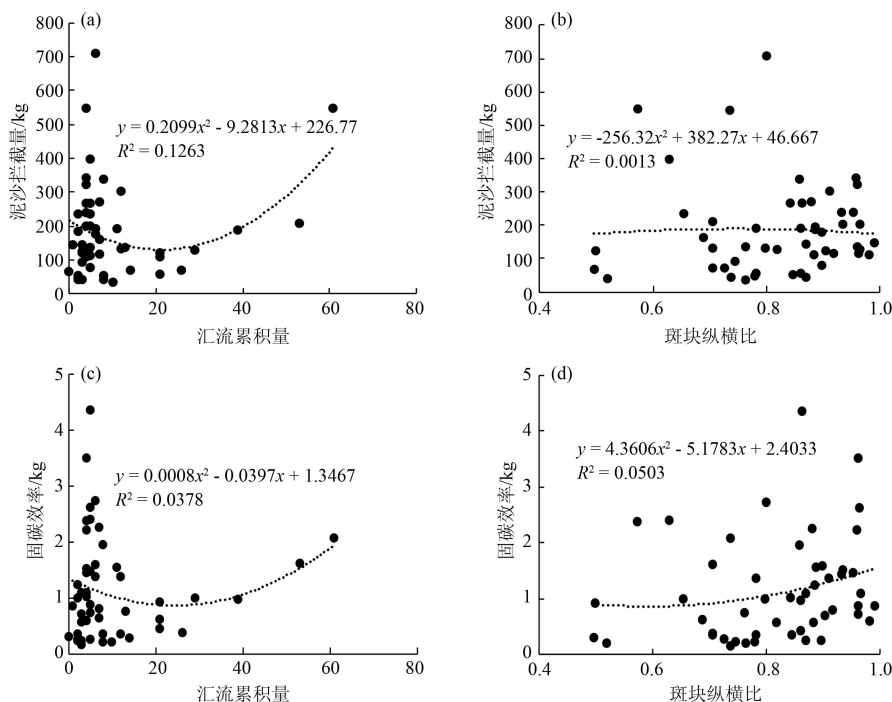


图9 汇流累积量、灌丛斑块纵横比与泥沙拦截量及固碳效率的关系:(a)泥沙拦截量与汇流累积量关系;

(b)泥沙拦截量与灌丛斑块纵横比关系;(c)固碳效率与汇流累积量关系;(d)固碳效率与灌丛斑块纵横比关系

Fig. 9 Relations among flow accumulation, shrub horizontal/vertical ratio, sediment retention and carbon sequestration;

(a) relation between sediment retention and flow accumulation; (b) relation between sediment retention and horizontal/vertical ratio of shrub patches; (c) relation between carbon sequestration and flow accumulation;

(d) relation between carbon sequestration and horizontal/vertical ratio of shrub patches

植株斑块形状的研究还不多见。在群落和景观尺度上的相关研究^[16-18]表明,水文连通性越强,植被斑块更紧密,空间连接性也更高,结点的平均连接数也更高。本文从个体尺度上进行的水文连通性和灌丛斑块形状研究,对群落和景观尺度上相关研究进行了补充。

微地形对地表水文连通性有重要影响,微地形能增加地面粗糙度,延缓径流时间,改变降雨分配。微地形中沟道和凹陷的存在,决定了地表水文连通性的空间差异。P2P(Puddle to Puddle)水文连通范式认为,微地形中存在一系列连通区域(connected areas)与单个积水区域(ponding area)组合,景观中水文连通度由不断的填充(filling)-溢出(spilling)-合并(merging)-分割(splitting)的动态机制塑造^[19]。微地形对水文特征及物质运移的影响,潜在地影响着植被的形态。不同微地形土壤含水量差异较大,塌陷可以很好地蓄集水分,浅沟次之,陡坎的水分条件最差;相应地,浅沟沟底、塌陷、坡底缓台上植被生长更好^[20]。本研究区坡面中部微地貌最为复杂,分布有 9 条浅沟,坡面两侧存在陡坎;而坡顶和坡底相对平缓,微地形简单,尤其是坡底分布着较大面积缓台;由于浅沟和下坡位缓台的立地条件要好于坡顶原状坡,灌丛植被生长状况显著好于坡顶。微地形除影响土壤水分外,还影响坡面土壤养分和光照等生境条件,是植物群落结构组成及更新与演替的重要影响因子^[21]。

坡度和坡位也是影响水文连通性主要因子,同时也是影响植被形态的潜在因子。研究表明,坡度越大,水文连通性越高,坡长越长,坡度对水文连通性的影响越显著^[22]。坡度对植物的生长影响机制比较复杂,一方面,坡度塑造了微地形,坡度越大,沉积物高度越大,对植物生长有利^[23];另一方面,坡度越大,往往立地条件较差,有可能对植被生长不利。本研究区中部坡度较陡区域,微地貌复杂、风化严重、土壤养分流失较重、植被生长较差。坡位对水文连通性和植被的影响比较明显。上坡位利于产生径流,水文连通性往往也最好,下坡位则利于水分的蓄积^[24]。不同坡位的水热条件组合影响着植物群落的分布及结构。研究表明,植物群落生物量、盖度、生物多样性、胸径、枯落物随坡位降低而增加^[25-26]。本研究区中坡位平均单株冠幅小于上坡位和下坡位;而上坡位灌丛数量显著低于中坡位和下坡位,总

体上灌丛盖度呈现从坡顶到坡底增加的趋势。此外,坡位在灌丛斑块对土壤养分和微生物的截获方面具有潜在的影响,导致土壤理化性质和养分随坡位变化而变化^[27]。本研究显示,从坡顶到坡底水文连通性增加的同时,泥沙拦截量和土壤固碳量相应减少,相关研究也证实了这一点^[3, 28]。其原因可能是,尽管随着坡位下降水文连通度增加,上游碳的输入增加,但是随坡位下降径流速度和总量也增加,导致泥沙和有机碳的损失。此外,退耕多年下坡位灌丛基部形成泥沙堆积体导致水流向四周散失,加剧了下坡位养分流失和固碳效率的降低。

本研究对黄土高原干旱区植被恢复提供了新的思路。与“适地适林”的原则相比,除了考虑传统立地类型外,还应考虑微地形和水分状况。对于那些水文连通性较好的微地形,可适当增加植被种类,提升植被覆盖率,提高生态建设的成效。水文连通性较差区域,尤其是在带状或斑块状的半干旱景观中,在植物种植密度的配置上,为了充分利用水分资源,应综合考虑生态与水文的相互作用,优化植物恢复模式,培育合适的株型,适当增加植物的横向间距,缩小纵向间距,尽可能使株型与水流方向垂直分布,提高种植效率。

4 结论

基于东芦河流域—灌草镶嵌分布坡面的航拍数据,对坡面灌丛斑块的形态特征与水文连通之间的关系及坡面分异进行了研究,表明灌丛有主动适应水分胁迫的趋势,且对泥沙截留和土壤固碳有一定的影响。主要结论如下:

(1)水文连通度越低,灌丛斑块横向生长的趋势越明显。从坡顶到坡底,灌丛的水文连通性逐渐增加,从高到低四个坡位汇流累积量分别为 101.21、245.47、628.12、790.51。从坡顶到坡底灌丛横向生长的程度逐渐增大,四个坡位的灌丛斑块纵横比分别为 0.64、0.70、0.79、0.83,表明植物具有自主适应不利环境调整冠型的可塑性。

(2)坡面上灌丛斑块的生长方向与水流流向的夹角从坡顶至坡底先减小后增大,从高到低四个坡位的夹角分别为 106.76°、102.78°、99.99°、104.70°。坡面坡度先增大后减小,从高到低分别为 10.13°、15.51°、22.30°、19.79°,二者呈现负相关

性。坡度越大,斑块与水流越趋近于垂直关系。其中,中坡位坡度最大,灌丛方向最接近与水流垂直方向。这表明灌丛有通过调整生长方向,最大可能获取降水的能力。

(3)二次曲线拟合表明灌丛斑块纵横比增加和汇流累积量增加都伴随着固碳效率和泥沙截留量的增加;说明水文连通度促进植物形态主动优化的同时,还有助于土壤固碳和减少泥沙流失。

参考文献 (References)

- [1] LEXARTZA-ARTZA I, WAINWRIGHT J. Hydrological connectivity: Linking concepts with practical implications [J]. *Catena*, 2009, **79** (2): 146–152. DOI: 10.1016/j.catena.2009.07.001
- [2] 王利成, 温仲明, 逮金鑫. 延河流域植被景观格局与水文连通性关系[J]. *水土保持研究*, 2022, **29**(5): 124–130. [WANG Licheng, WEN Zhongming, LU Jinxin. Relationship between vegetation landscape pattern and hydrological connectivity in Yanhe River Basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, **29**(5): 124–130] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.20220608.001
- [3] MAYOR A G, BAUTISTA S, RODRIGUEZ F, et al. Connectivity-mediated ecohydrological feedbacks and regime shifts in drylands [J]. *Ecosystems*, 2019, **22**(7): 1497–1511. DOI: 10.1007/s10021-019-00366-w
- [4] TURNBULL L, WAINWRIGHT J. From structure to function: Understanding shrub encroachment in drylands using hydrological and sediment connectivity [J]. *Ecological Indicators*, 2019, **98** (3): 608–618. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.11.039
- [5] CAI Qiangguo. Soil erosion and management on the Loess Plateau [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2001, **11**(1): 53–70. DOI: 10.1007/bf02837376
- [6] FU Bojie, WANG Shuai, LIU Yu, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, **45**(1): 223–243. DOI: 10.1146/annurev-earth-063016-020552
- [7] LIU Yu, YU Xiubo, ZHAO Liang, et al. Evaluating the revegetation by shrub planting in degraded dryland rangeland: Perspectives of hydrological and sediment connectivity [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2021, **48**(2): 132–138. DOI: 10.1016/j.cosust.2020.12.009
- [8] 徐莉, 刘宇, 张忠启, 等. 灌草镶嵌坡面土壤紧实度变异及水文连通度的影响[J]. *水土保持研究*, 2020, **27**(5): 133–137 + 146. [XU Li, LIU Yu, ZHANG Zhongqi, et al. Variation of soil compaction and the impacts of hydrological connectivity on shrub-grass mosaic slope [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, **27**(5): 133–137 + 146] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2020.05.019
- [9] 丑述仁, 高微微, 于占超, 等. GIS支持下基于DEM的中等流域的划分——以富县为例[J]. *地下水*, 2011, **33**(6): 131–133. [CHOU Shuren, GAO Weiwei, YU Zhanchao, et al. Watershed division based on DEM in GIS [J]. *Ground Water*, 2011, **33**(6): 131–133]
- [10] 李嵩, 郑新军, 唐立松, 等. 基于异速生长理论的准噶尔盆地荒漠灌丛形态研究[J]. *植物生态学报*, 2011, **35**(5): 471–479. [LI Song, ZHENG Xinjun, TANG Lisong, et al. Morphological investigation of desert shrubs of China's Junggar Basin based on allometric theory [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, **35**(5): 471–479] DOI: 10.3724/SP.J.1258.2011.00471
- [11] 郭志霞, 刘任涛, 赵文智. 荒漠灌丛和土壤动物关系及对降水变化的响应研究进展[J]. *草业学报*, 2022, **31**(10): 206–216. [GUO Zhixia, LIU Rentao, ZHAO Wenzhi. The relationships between desert shrubs and soil fauna and their responses to precipitation changes in arid regions: A review [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, **31**(10): 206–216] DOI: 10.11686/cyxb2021389
- [12] 朱苗苗, 朱强根, 李波, 等. 植物构件间异速生长关系研究进展[J]. *安徽农学通报*, 2022, **28**(2): 36–39. [ZHU Miaomiao, ZHU Qianggen, LI Bo, et al. Research progress of allometric growth relationship among plant components [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2022, **28**(2): 36–39] DOI: 10.16377/j.cnki.issn1007-7731.2022.02.018
- [13] 陆霞梅, 周长芳, 安树青, 等. 植物的表型可塑性、异速生长及其入侵能力[J]. *生态学杂志*, 2007, **26**(9): 1438–1444. [LU Xiamei, ZHOU Changfang, AN Shuqing, et al. Phenotypic plasticity, allometry and invasiveness of plants [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, **26**(9): 1438–1444] DOI: 10.13292/j/1000-4890.2007.0248
- [14] 范昊明, 王铁良, 周丽丽, 等. 不同坡形坡面径流流速时空分异特征研究[J]. *水土保持学报*, 2007, **21**(6): 35–38. [FAN Haoming, WANG Tieliang, ZHOU Lili, et al. Study on temporal and spatial variation of current velocity on different form slopes [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, **21**(6): 35–38] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2007.06.007
- [15] 范世香, 韩绍文. 地面坡度对地表径流影响的实验研究[J]. *水土保持通报*, 1991, **11**(4): 6–10. [FAN Shixiang, HAN Shaowen. Testing research on the effects of land surface slopes upon surface runoff [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1991, **11**(4): 6–10] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.1991.04.002
- [16] 刘佳凯, 崔保山, 张振明, 等. 黄河三角洲横向水文结构连结空间尺度变异性分析[J]. *生态学报*, 2021, **41**(10): 3745–3754. [LIU Jiakai, CUI Baoshan, ZHANG Zhenming, et al. Scale effects of structural hydrological connectivity in coast wetlands in the Yellow River Delta [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(10): 3745–3754] DOI: 10.5846/stxb202007221923

- [17] ZHANG Cheng, KUI Shengyang, TANG Caihong, et al. Evaluation of hydrological connectivity in a river floodplain system and its influence on the vegetation coverage [J]. *Ecological Indicators*, 2022, **144**(9): 109445. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109445
- [18] CUI Yuan, XIAO Rong, ZHANG Mingxiang, et al. Hydrological connectivity dynamics and conservation priorities for surface-water patches in the Yellow River Delta National Nature Reserve, China [J]. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 2020, **20**(2): 525–536. DOI: 10.1016/j.ecohyd.2020.03.005
- [19] YANG Jun, CHU Xuefeng. Quantification of the spatio-temporal variations in hydrologic connectivity of small-scale topographic surfaces under various rainfall conditions [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, **505**(15): 65–77. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.09.013
- [20] 赵芸, 朱清科, 秦伟, 等. 黄土高原干旱阳坡微地形土壤水分特征研究[J]. *水土保持通报*, 2010, **30**(3): 64–68. [ZHAO Hui, ZHU Qingke, QIN Wei, et al. Soil moisture characteristics on microrelief of dry south-slope on the Loess Plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, **30**(3): 64–68] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2010.03.027
- [21] 朱清科, 张岩, 赵磊磊, 等. 陕北黄土高原植被恢复及近自然造林[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 43–69. [ZHU Qingke, ZHANG Yan, ZHAO Leilei, et al. *Vegetation restoration and natural afforestation in the Loess Plateau of northern Shaanxi* [M]. Beijing: Science Press, 2012: 43–69]
- [22] 王盛萍, 姚安坤, 赵小婵. 基于人工降雨模拟试验的坡面水文连通性[J]. *水科学进展*, 2014, **25**(4): 526–533. [WANG Shengping, YAO Ankun, ZHAO Xiaochan. Analyzing hydrological connectivity for a slope-surface on the basis of rainfall simulation experiment [J]. *Advances in Water Science*, 2014, **25**(4): 526–533] DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2014.04.004
- [23] 宋述军, 李辉霞, 张建国. 黄土高原坡地单株植物下的微地形研究[J]. *山地学报*, 2003, **21**(1): 106–109. [SONG Shujun, LI Huixia, ZHANG Jianguo. Microtopographic structures study of individual plants on Loess Plateau [J]. *Mountain Research*, 2003, **21**(1): 106–109] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.2003.01.017
- [24] 马勇勇, 李占斌, 任宗萍, 等. 草带布设位置对坡沟系统水文连通性的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, **34**(8): 170–176. [MA Yongyong, LI Zhanbin, REN Zongping, et al. Effect of different positions of grass strips on hydrological connectivity in slope-gully system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, **34**(8): 170–176] DOI: 10.11975/j.issn.1002–6819.2018.08.022
- [25] BERRY Z C, GOTSCH S G, HOLWERDA F, et al. Slope position influences vegetation-atmosphere interactions in a tropical montane cloud forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, **221**(1): 207–218. DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.02.012
- [26] FAN Bihang, TAO Wanghai, QIN Guanghua, et al. Soil microclimate variation in relation to slope aspect, position, and curvature in a forested catchment [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, **290**(15): 107999. DOI: 10.1016/j.agrformet.2020.107999
- [27] XIAO Sa, CHEN Shuyan, ZHAO Luqiang, et al. Density effects on plant height growth and inequality in sunflower populations [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2006, **48**(5): 513–519. DOI: 10.1111/j.1744–7909.2006.00265.x
- [28] PUTTOCK A, MACLEOD C J A, BOL R, et al. Changes in ecosystem structure, function and hydrological connectivity control water, soil and carbon losses in semi-arid grass to woody vegetation transitions [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, **38**(13): 1602–1611. DOI: 10.1002/esp.3455

Responses of Shrub Morphology to Hydrological Connectivity and their Ecological Effects in Arid Areas

SU Changhong¹, LIU Yu², SONG Zihao¹, XUN Yawen¹

(1. College of Geographic and Environmental Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China;

2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The hydrological connectivity of ecosystems in arid areas affects the spatial differentiation of vegetation patch morphology. It is a complex and long-term process for the adaptation of vegetation morphology to hydrological connectivity. Previous research on the correlation between vegetation and hydrological connectivity was conducted

on a larger scale of above community scale, not on the microscale. Investigation into the relations of vegetation patch and hydrological connectivity at single-plant scale is expected to be conducive to the revealing of the driving mechanisms of landscape patterns on ecological processes.

In this study, by application of interpolation of high-resolution photograph by drone and field survey, perennial shrubs in the hilly and gully region of the Loess Plateau was focused to interpret the correlations between vegetation patch morphologies and hydrological connectivity. Besides, their implications on sediment retention and soil carbon sequestration were also investigated.

We have the following findings. (1) The shrub patches generally exhibited a vertical growth tendency, with a horizontal/vertical ratio of less than 1. The horizontal/vertical ratio of the shrub patches increased from the top of slope crests to bottoms, as 0.64, 0.70, 0.79, 0.83. (2) The intersection angle between the direction of shrub patches and the water flow showed a decreasing-then-increasing trend from slope crest to its bottom. Notably, in the middle slope it exhibited the highest slope corresponding to the nearest-to-vertical intersection angle between the direction of shrub patches and water flow. (3) The accumulation of flows increased from slope crests to bottoms, indicating a rising trend in hydrological connectivity. The horizontal/vertical ratios of shrub patches exhibited a positive correlation with hydrological connectivity. When hydrological connectivity reached a high level, the horizontal/vertical ratio approached 1, indicating a close-to-circular shape of the shrub patches. (4) Finally, the sediment retention and carbon sequestration rate decreased along with the slope position decrease. By quadratic curve fitting analysis it is found that the sediment retention and carbon sequestration rate increased along with the increased hydrological connectivity, which implies that hydrological connectivity drives the self-optimization of plant morphologies and further improves the effectiveness of soil carbon sequestration and sediment retention.

This research provides references for vegetation structure optimization and ecological renovation in arid area of the Loess Plateau.

Key words: hydrological connectivity; shrub morphology; sediment retention; soil carbon sequestration; the Loess Plateau

(责任编辑 钟雨倩)