

灌草镶嵌坡面土壤紧实度变异及水文连通度的影响

徐莉^{1,2}, 刘宇^{1,3}, 张忠启¹, 赵亮², 蒋军乐⁴

(1.江苏师范大学 地理测绘与城乡规划学院, 江苏 徐州 221116; 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; 3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.河北科技大学, 石家庄 050018)

摘 要:在半干旱区,灌草镶嵌的植被分布通过改变水文连通度和使牲畜移动路径更为集中,从而可能改变土壤紧实度的坡面格局。为探究灌草镶嵌坡面土壤紧实度的空间变异及水文连通度的影响,在芦河流域选择典型坡面开展调查。沿坡面布设 93 个样点测定土壤紧实度,探究灌丛—草地镶嵌的坡面土壤紧实度沿坡面的变化。同时以水文连通度为灌草镶嵌格局的表征,阐释土壤紧实度与水文连通度的关系。结果表明:灌丛下和灌丛间草地土壤紧实度沿坡顶至坡底方向均呈现先增加后减小的趋势,即坡中部位置土壤紧实度最高;同一坡位,灌丛下土壤紧实度低于灌丛间草地土壤紧实度;灌丛土壤紧实度随累积汇流面积的增加而减小,而草地土壤紧实度随累积汇流面积的增加而增加。灌丛、草地斑块拦截上坡来沙能力的差别和牲畜移动路径在灌丛间草地更集中是导致这种空间分异的重要原因。

关键词:景观连通度;灌丛—草地镶嵌景观;土壤侵蚀;土壤紧实度;半干旱区

中图分类号:S152; K903

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)05-0133-05

Variation of Soil Compaction and the Impacts of Hydrological Connectivity on Shrub-Grass Mosaic Slope

XU Li^{1,2}, LIU Yu^{1,3}, ZHANG Zhongqi¹, ZHAO Liang², JIANG Junle⁴

(1.School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2.Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modelling, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4.School of Information Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: In semi-arid areas, the vegetation distribution inlaid with grass and shrubs will significantly change this pattern. Hydrological connectivity is an effective indicator for erosion risk. Therefore, the hydrological connectivity concept is used to characterize the shrub-grass mosaic hillslope. And then the response of the soil compaction on the hillslope to the hydrological connectivity was explored. A hillslope with shrub-grass mosaic, which is typical in the Luhe River Basin, was selected as study site to investigate the impact of vegetation pattern and hydrological connectivity on the variation of soil compaction. Soil compactness of 93 points for shrub and grass patches respectively was surveyed on the hillslope. The results showed that at the same slope position, soil compactness of shrub patches was lower than that of grassland patches, the maximum difference of soil compactness between shrub patches and grass patches was 23.66 kg/cm², and the minimum difference was 1.49 kg/cm²; the soil compactness of shrub and grassland increased first and then decreased from the upslope to the foot of the slope; the soil compactness of shrub soil decreased with the increase of flow accumulation, while soil compactness of grassland increased with the increase of flow accumulation. Difference in capacity of sediment retention and regulation of livestock movement routes are important causes

收稿日期:2019-10-21

修回日期:2019-12-15

资助项目:国家自然科学基金面上项目(41671186);中国科学院大科学培育专项项目(121311KYSB20170004)

第一作者:徐莉(1994—),女,江苏如皋人,硕士研究生,研究方向为区域生态系统观测与模拟。E-mail:jsnu_xl@126.com

通信作者:刘宇(1981—),男,贵州六盘水人,博士,副研究员,主要从事景观格局与生态过程、生态系统评估研究。E-mail:liuyu@igsrr.ac.cn

for the spatial variation of soil compactness, as well the soil compactness difference between shrub patches and grass patches.

Keywords: landscape connectivity; shrub-grass mosaic; soil compactness; semiarid environment

土壤紧实度是衡量土壤质量的重要物理指标^[1], 决定土壤入渗速率, 影响土壤侵蚀强度^[2]。有关土壤紧实度的研究多集中在农田, 关注耕作方式、作物类型、自然因素等对农田土壤紧实度的作用与影响^[3-7], 以及紧实度变化对土壤理化性质、农作物生长发育及作物产量和品质等影响^[8-10]。景观连通度是影响土壤侵蚀过程的重要因素^[11]。景观连通度包括景观结构连通度和景观功能连通度^[12]。对土壤侵蚀过程而言, 景观结构连通度指产生的径流、泥沙输送至目的地的畅通程度^[13-14]。在小区和坡面尺度上, 径流源区的连通对侵蚀的发生和发展有重要影响^[11]。从坡顶至坡底, 汇水面积逐渐增加, 水文连通度也随之增强, 从而增强土壤侵蚀强度, 加大表土的剥离程度。与此同时, 接收到的上坡输送的泥沙、凋落物碎屑等也在不断增加。在植被覆盖、微地形阻碍体等具备一定拦截能力的地表阻滞体存在的条件下, 会形成较为疏松的沉积体^[15]。

干旱区生态系统是典型的斑块镶嵌结构, 灌草斑块镶嵌植被格局较为常见。在干旱半干旱环境中, 灌丛植被更容易导致坡面水流的汇聚^[16], 从而改变坡面的水文连通格局, 促进高水文连通区提前在靠近上坡的位置形成, 加强冲刷侵蚀^[17]而剥离表层疏松土壤。此外, 灌丛镶嵌的坡面, 由于灌丛斑块(尤其是带刺、较高大的灌丛)的存在, 会导致牲畜在坡面的移动路径由较为分散转变为相对集中。这些因素共同作用, 可能会塑造出与单一草被不同的水文连通格局和侵蚀—沉积空间异质性格局, 导致土壤紧实度的空间异质性。基于以上认识, 本研究试图通过格网化的调查, 揭示半干旱地区灌丛—草地镶嵌坡面上土壤紧实度的空间变异及水文连通度的影响。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究选择位于黄河二级支流东芦河流域的人工灌丛坡面开展研究。东芦河流域位于陕西省榆林市靖边县城南, 上游部分区域属延安市安塞区, 大部分位于靖边县内, 为无定河的一条支流。该流域地处毛乌素沙地南侧, 黄土丘陵沟壑区北缘, 为鄂尔多斯高原向黄土高原的过渡地带。气候属半干旱内陆性季风气候, 年平均气温为 7.8℃, 年平均气温日较差为

12.4℃, 无霜期 125 ~ 179 d。土壤类型主要以砂质风沙土、黄绵土为主, 土质疏松, 持水性能差, 抗侵蚀性低。东芦河流域内地带性植被以草本为主, 间有天然灌丛。草地广泛分布于黄土丘陵沟壑区的梁峁顶、沟坡上, 优势物种有针茅属、百里香属、蒿属等。这一带为大面积人工植被营造区。灌丛除分布于沟坡、谷坡和沟底的狼牙刺、黄刺玫、丁香等自然植被外, 以人工种植的柠条为主, 部分坡面种有沙棘。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤紧实度测定 本研究选择位于东芦河西侧的一个典型人工柠条灌丛—茅草镶嵌坡面布设调查样地(图 1)。为方便将地面测定的土壤紧实度与基于航拍制图获取的坡面位置、景观连通度相结合, 在每个采样点使用白色胶带设置十字形地面标识点。从坡顶至坡底共布设 17 行 93 个样点, 沿等高线方向和垂直于等高线方向间距均约 6 m。每个样点分别采集灌丛下和灌丛间草地土壤紧实度数据。

土壤紧实度指土壤颗粒间间隙的大小, 也称土壤硬度或土壤穿透阻力。一般用金属柱塞或探针压入土壤时的阻力表示, 它是衡量地表状况的一个重要指标^[18]。坡面主要景观类型为灌丛—草地镶嵌景观。灌丛具有一定拦截泥沙能力, 能形成泥沙沉积体。灌丛间草地泥沙拦截能力低。因此可能导致灌丛下和灌丛间草地土壤紧实度的差别。因此, 分别测定了灌丛下、灌丛间草地的土壤紧实度。本研究采用型号为 WJSD-750-II 土壤紧实度仪测定土壤紧实度。因为土壤侵蚀对土壤表层影响较大, 所以选取土壤紧实度测定深度为 10 cm。每个样点重复测三次取平均值。根据样点的位置, 利用 ArcGIS 空间分析工具克里金插值模块获取土壤紧实度的坡面分布图。

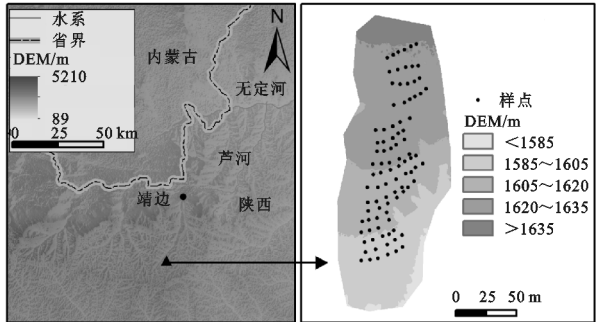


图 1 样地位置示意图

1.2.2 坡面表面模型构建及水文连通度计算 坡面

表面模型构建基于大疆精灵 3Standard 四旋翼无人机获取 RGB 照片制作。整个坡面人工灌丛高度大致在 1.5 m 以下,无人机飞行高度设置为 15 m,航向重叠设 90%,旁向重叠设为 60%。使用 GS Pro 软件规划航线,航线规划完成后上传航线数据至无人机。为保证图像的质量,采用悬停拍照模式,共获得覆盖整个坡面的 280 张航拍照片。使用 Agisoft Photoscan 软件构建数字表面模型(DSM)和生成整个坡面的正射影像。具体处理的流程包括照片对齐(Align Photos)、构建密集点云(Build Dense cloud)、构建网格(Build Mesh)、生成数字表面模型(DSM)和生成正射影像图。其中 DSM 分辨率为 3 cm,正射影像为 2 cm。经处理去掉灌丛植被后生成坡面 DEM,分辨率与 DSM 一致。

水文连通度量化了坡面任意位置与上坡通过径流连通的程度^[19]。这里采用累积汇流量表征了水文连通度。因此,水文连通度指坡面上任意一个位置的上坡累计汇流面积,即每个栅格单元累积汇流量是指上游汇流区内流入该栅格单元的栅格的总数与栅格

面积的乘积,即累积汇流面积^[20]。其假定规则栅格处有一个单位径流量,根据区域地形水流方向数据计算有多少栅格上的径流流入该栅格,即表明有多少个单位径流量汇入该栅格单元,从而得到每个栅格上坡来水量^[21]。这里采用八邻单流向算法计算累积汇流量。利用 ArcGIS 水文分析工具中累积汇流模块计算累积流量。利用 Excel 2016 软件中数据分析工具进行相关性分析、差异比较。

2 结果与分析

2.1 土壤紧实度的坡面空间变异

灌丛下土壤紧实度呈下降趋势,灌丛间草地土壤紧实度呈上升趋势(图 2)。坡面灌丛下土壤紧实度最大值为 37.93 kg/cm²,最小值为 17.78 kg/cm²,变幅为 20.15 kg/cm²,变异系数为 0.19;草地土壤紧实度最大值为 43.22 kg/cm²,最小值为 20.12 kg/cm²,变幅为 23.1 kg/cm²,变异系数为 0.22。总体上灌丛土壤紧实度低于草地,灌丛间草地土壤紧实度的变异程度亦高于灌丛。

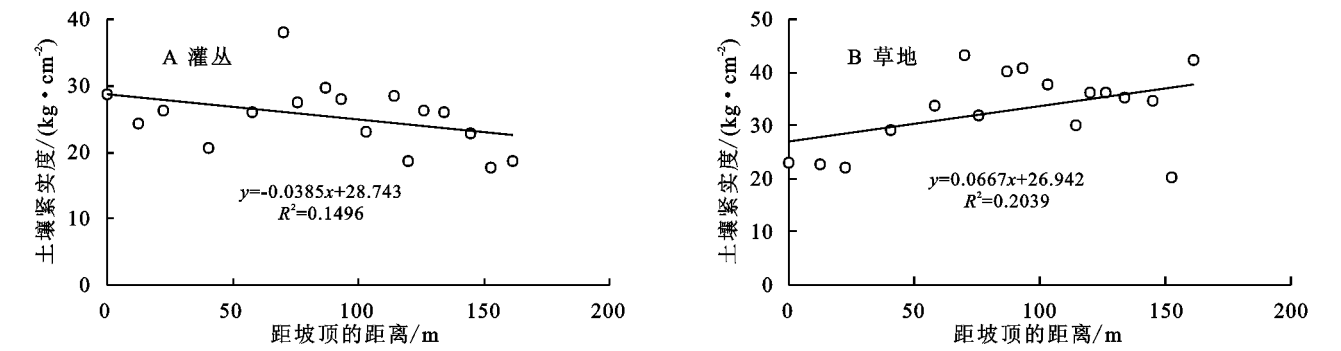


图 2 灌丛与草地紧实度的沿坡位的变化

灌丛间草地和灌丛下土壤紧实度的空间分异存在差别。利用灌丛与灌丛间草地的土壤紧实度实测数据分别进行插值,得到仅有灌丛、草地两种情况下土壤紧实度值的空间分布(图 3)。坡面灌丛土壤紧实度表现为从坡顶至坡中位置增大,坡中至坡底位置逐渐减小,最小值范围出现在下坡位置,坡面整体上表现为先增大后减小,坡中位置土壤紧实度值达到最高,介于 27~29 kg/cm²。草地的土壤紧实度的空间分布表现为坡中位置最大(40~47 kg/cm²),向上坡和坡底方向逐渐减小。与灌丛不同的是,草地土壤紧实度最小值分布在上坡位置。

灌丛和灌丛间草地土壤紧实度的差异随坡位而异。如图 4 所示,差值为草地土壤紧实度减去灌丛土壤紧实度,在上坡位置灌丛土壤紧实度高于草地,从坡中至坡底草地土壤紧实度都不同程度地高于灌丛。从坡顶至坡底方向,灌丛—草地间差值整体上趋向于增加,

即越往坡底方向,两者土壤紧实度差值越大。灌丛—草地同一坡位的土壤紧实度最大差值位于坡底,达 23.66 kg/cm²,最小差值位于上坡,仅为 1.49 kg/cm²。

2.2 土壤紧实度坡面分异与水文连通度的关系

土壤侵蚀对表土的剥蚀可增加土壤紧实度,水文连通度高意味着土壤侵蚀强度高^[22-23]。在本研究中,灌丛和灌丛间草地斑块土壤紧实度与水文连通度的关系表现相反。如图 5 所示,从上坡至下坡,灌丛下土壤紧实度与表达水文连通度的累积汇流面积之间呈负相关,而灌丛间草地的土壤紧实度与累积汇流面积呈正相关。从坡顶至坡底方向,汇流面积逐渐增加,即接收更多的上方来水量,坡面径流侵蚀能力随之增强,坡产沙量增加^[24],灌丛由于具有更好的泥沙拦截功能,更有利于形成松散的泥沙堆积体,从而使得灌丛下土壤紧实度随汇流面积的变化与草地表现出不同的变化趋势。

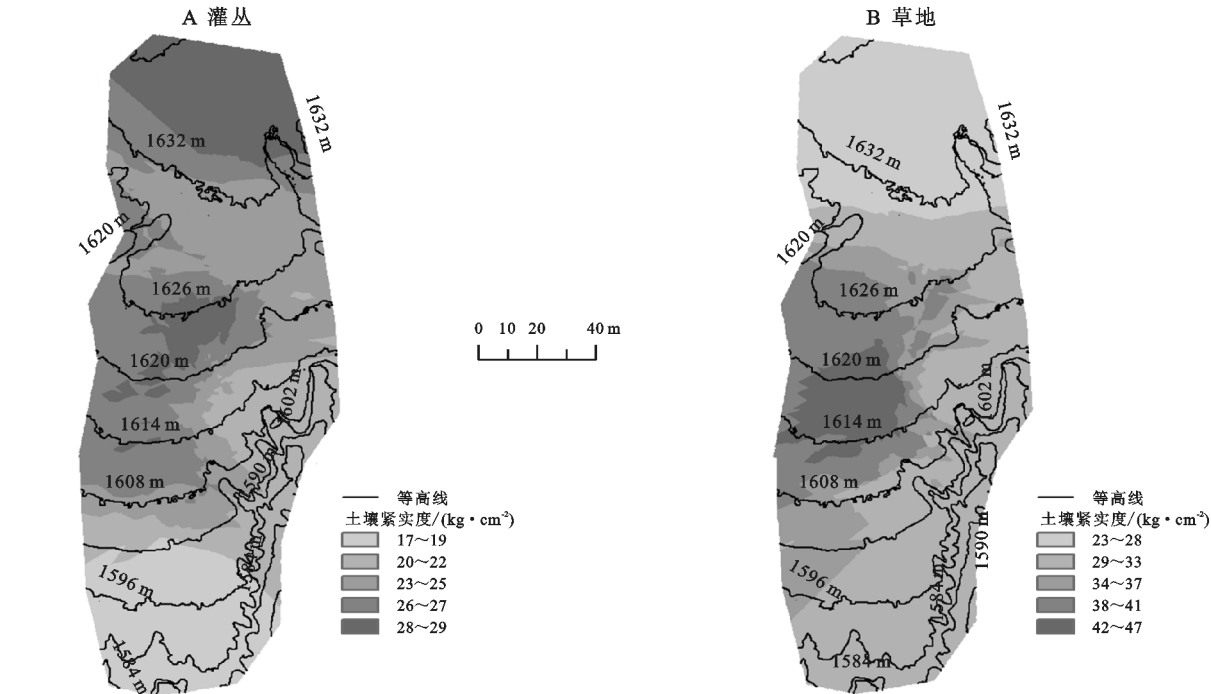


图 3 土壤紧实度空间分布

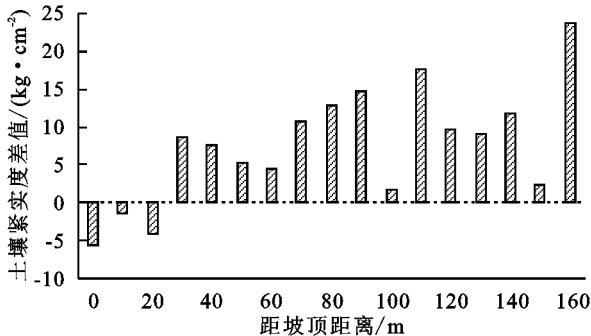


图 4 不同坡位灌丛和草地土壤紧实度差值

3 讨论

土壤紧实度是较为重要的土力学性质,是受土壤机械组成、有机质含量及土壤水分等因子影响的综合指标^[25],它直接影响到土壤的可蚀性^[26]。在黄土区,土壤

紧实度从表层向深层增加^[27]。土壤侵蚀导致表土的流失,从而使土壤紧实度增加。已有研究表明,坡面侵蚀总体趋势表现为从分水岭向下由小变大,再由大变小,自分水岭到坡脚划分为微弱侵蚀带—侵蚀强烈带—冲刷带—堆积带^[23]。本研究中灌丛间草地的土壤紧实度在空间尺度上表现为中坡位置最大,上坡与下坡位置较小。降雨侵蚀过程是降雨能量对地面做功的表现,做功的最初表现形式是雨滴的击溅侵蚀^[28]。已有研究表明,当植被高度超过 1 m 时,会增强雨滴的溅蚀能力^[29]。这与本研究中上坡位置灌丛下土壤紧实度高于灌丛间草地土壤紧实度的结果相一致。除上坡位置,灌草镶嵌坡面灌丛间草地的土壤紧实度均不同程度高于灌丛下土壤紧实度。灌丛相对于草地具有更强的泥沙拦截能力,也有较高的凋落物量,易形成较厚的松散堆积体^[30]。

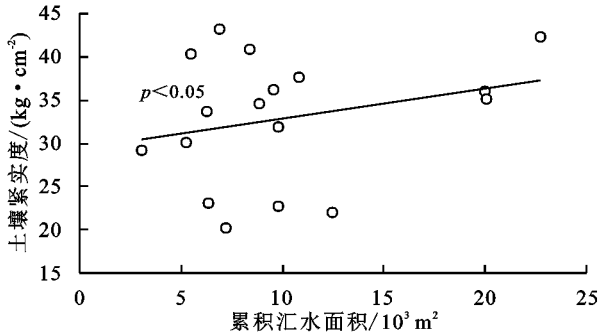
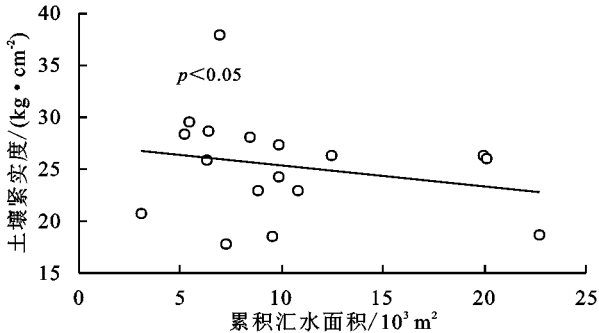


图 5 土壤紧实度与累积汇流面积关系

本研究所选的灌丛—草地镶嵌斑块结构是干旱半干旱地区典型的景观结构,具有与纯草地景观不同的水文响应特征。已有研究表明灌丛景观与草地相比有更高的径流系数^[31],因为灌丛景观径流向灌丛

间汇聚^[32],形成较高的水文连通度,且灌丛间入渗率低于灌丛区^[33];本研究区存在一定的放牧活动,由于柠条灌丛的存在,牲畜移动路径往往呈现出镶嵌于灌丛间的网状结构,这会形成牲畜对灌丛间草地区域的

较强的践踏,加剧土壤的板结,同时促进裸地斑块之间的水文连通,最终增大灌丛与灌丛间草地土壤紧实度差异。

4 结论

通过对东芦河流域典型人工柠条—草地镶嵌坡面灌丛和灌丛间草地土壤紧实度的调查分析,探讨景观连通度对土壤紧实度的影响。研究结果表明:人工灌丛坡面灌丛下与灌丛间草地斑块的土壤紧实度在坡面尺度都呈现先增加再降低的变化趋势,即中坡位置的土壤紧实度值都较上坡、下坡位置高;同一坡位置草地土壤紧实度都不同程度地高于灌丛,二者最小差值位于上坡位置,最大差值位于下坡位置。在灌丛—草地镶嵌的坡面,景观连通度对土壤紧实度的影响表现为草地土壤紧实度与水文连通度正相关,而灌丛下土壤紧实度与水文连通度呈负相关。

参考文献:

- [1] 王海宇,张月珍,董平国.土壤密实度对单点源入渗土壤水分再分布影响研究[J].干旱区资源与环境,2019,33(2):146-151.
- [2] 郭建英,董智,李锦荣,等.放牧强度对荒漠草原土壤物理性质及其侵蚀产沙的影响[J].中国草地学报,2019,41(3):74-82.
- [3] Glab T. Effect of soil compaction and N fertilization on soil pore characteristics and physical quality of sandy loam soil under red clover/grass sward[J]. Soil and Tillage Research, 2014,144:8-19.
- [4] 王金贵,王益权,徐海,等.农田土壤紧实度和容重空间变异性研究[J].土壤通报,2012,43(3):594-598.
- [5] Arvidsson J, Håkansson I. Response of different crops to soil compaction—Short-term effects in Swedish field experiments[J]. Soil and Tillage Research, 2014,138:56-63.
- [6] 陈秀琴,杜国强,杨德军.大柳塔矿区农田砂壤土含水率对土壤紧实度的影响及模型研究[J].生态与农村环境学报,2018,34(1):74-80.
- [7] 张有利,李娜,王孟雪,等.不同整地方式对风沙土玉米地土壤紧实度的影响[J].水土保持研究,2015,22(1):97-99.
- [8] Zheng H, Zheng J, Luo Y, et al. Change characteristic of soil compaction of long-term different tillage methods in cropland [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(9):63-70.
- [9] 石磊,王娟铃,许明祥,等.陕西省农田土壤紧实度空间变异及其影响因素[J].西北农业学报,2016,25(5):770-778.
- [10] 葛畅,刘慧琳,张世文,等.耕作方式和土壤类型对皖北旱作农田土壤紧实度的影响[J].水土保持研究,2018,25(5):89-94.
- [11] Cammeraat E. Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response of a semi-arid catchment in southeast Spain [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2004,104(2):317-332.
- [12] Bracken L J, Wainwright J, Ali G A, et al. Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, pathways and future agendas [J]. Earth-Science Reviews, 2013,119:17-34.
- [13] Mayor Á G, Bautista S, Small E E, et al. Measurement of the connectivity of runoff source areas as determined by vegetation pattern and topography: A tool for assessing potential water and soil losses in drylands [J]. Water Resources Research, 2008,44(10):W10423.
- [14] 刘宇,赵亮.基于过程—效应—功能—服务级联机制的森林减沙服务传输研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(4):883-892.
- [15] Fryirs K. (Dis)Connectivity in catchment sediment cascades: a fresh look at the sediment delivery problem [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013,38(1):30-46.
- [16] Nouwakpo S K, Williams C J, Al-Hamdan O Z, et al. A review of concentrated flow erosion processes on rangelands: Fundamental understanding and knowledge gaps [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2016,4(2):75-86.
- [17] Abrahams A D, Parsons A J, Wainwright J. Effects of vegetation change on interrill runoff and erosion, Walnut Gulch, southern Arizona [J]. Geomorphology, 1995,13(1/4):37-48.
- [18] 杨世琦,吴会军,韩瑞芸,等.农田土壤紧实度研究进展[J].土壤通报,2016,47(1):226-232.
- [19] 刘宇.土壤侵蚀研究中的景观连通度:概念、作用及定量[J].地理研究,2016,35(1):195-202.
- [20] Svoray T, Markovitch H. Catchment scale analysis of the effect of topography, tillage direction and unpaved roads on ephemeral gully incision [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2009,34(14):1970-1984.
- [21] 周启鸣,刘学军.数字地形分析[M].北京:科学出版社,2006.
- [22] Pilon C, Jr, Moore P A, Pote D H, et al. Long-term effects of grazing management and buffer strips on soil erosion from pastures [J]. Journal of Environmental Quality, 2017,46(2):364-372.
- [23] 肖培青,郑粉莉,姚文艺.坡沟产沙关系及其侵蚀机理研究进展[J].水土保持研究,2004,11(4):101-104.

- [21] 任家璇.城市化对典型极端气候事件的影响分析:以辽宁省为例[D].辽宁大连:辽宁师范大学,2018.
- [22] 谢安,孙永罡,白人海.中国东北近 50 年干旱发展及对全球气候变暖的响应[J].地理学报,2003,58(S1):75-82.
- [23] 李文亮,张冬有,张丽娟.黑龙江省气象灾害风险评估与区划[J].干旱区地理,2009,32(5):754-760.
- [24] 徐虹,张丽娟,姜蓝齐.黑龙江省公元 612—2000 年主要气象灾害时空规律研究[J].自然灾害学报,2014,23(3):107-118.
- [25] 潘华盛,历超,吴玉影,等.黑龙江省夏季极端降水和暴雨变化规律的分析[J].黑龙江气象,2013,30(3):10-12,27.
- [26] 刘宇峰,原志华,李文正,等.1961—2013 年黄土高原地区旱涝特征及极端和持续性分析[J].地理研究,2017,36(2):345-360.
- [27] 李娟,董文杰,严中伟.中国东部 1960—2008 年夏季极端温度与极端降水的变化及其环流背景[J].科学通报,2012,57(8):641-646.
- [28] 谢志清,杜银,曾燕,等.江淮流域年极端降水事件分类特征及其致洪风险[J].中国科学:地球科学,2018,48(9):1153-1168.
- [29] 金龙海,肖建民,谢永刚.2003 年黑龙江省的洪涝灾害及其社会经济影响[J].自然灾害学报,2004,13(1):154-159.
- [30] 李占玲,王武,李占杰.基于 GPD 分布的黑河流域极端降水频率特征分析[J].地理研究,2014,33(11):2169-2179.
- [31] 李永生,张健,于梅,等.2013 年黑龙江省夏季洪涝灾害成因分析[J].气象与环境学报,2014,30(3):31-37.
- [32] 朱红蕊,于宏敏,姚俊英,等.黑龙江省水稻初霜冻灾害致灾因子危险性分析[J].灾害学,2012,27(2):96-99.

~~~~~

(上接第 137 页)

- [24] 张新和,郑粉莉,汪晓勇,等.上方汇水对黄土坡面侵蚀方式演变及侵蚀产沙的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2008,36(3):105-110.
- [25] Lipiec J, Hatano R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth[J]. Geoderma, 2003,116(1/2):107-136.
- [26] Parker D B, Michel T G, Smith J L. Compaction and water velocity effects on soil-erosion in shallow flow [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1995,121(2):170-178.
- [27] 高建华,张承中.不同保护性耕作措施对黄土高原旱作农田土壤物理结构的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(4):192-196.
- [28] 肖海,刘刚,赵金凡,等.雨滴机械打击和消散作用对土壤团聚体的破坏特征[J].土壤学报,2017,54(4):827-835.
- [29] Morgan R P C. Vegetative-based technologies for erosion control[M]//Eco-and ground bio-engineering:The use of vegetation to improve slope stability,Dordrecht: Springer, 2007.
- [30] 瞿王龙,杨小鹏,张存涛,等.干旱、半干旱地区天然草原灌木及其肥岛效应研究进展[J].草业学报,2015,24(4):201-207.
- [31] Bhark E W, Small E E. Association between plant canopies and the spatial patterns of infiltration in shrubland and grassland of the Chihuahuan desert, New Mexico[J]. Ecosystems, 2003,6(2):185-196.
- [32] Turnbull L, Wainwright J, Brazier R E. A conceptual framework for understanding semi-arid land degradation: Ecohydrological interactions across multiple-space and time scales[J]. Ecohydrology: Ecosystems, Land and Water Process Interactions, Ecohydrogeomorphology, 2008,1(1):23-34.
- [33] Wilcox B P, Breshears D D, Allen C D. Ecohydrology of a resource-conserving semiarid woodland: effects of scale and disturbance [J]. Ecological Monographs, 2003,73(2):223-239.