doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.034

黄土高原生物结皮斥水性及其沿降水梯度变化特征研究

孙福海[1]　肖　波[1,2]　姚小萌[1]　李胜龙[1]　王国鹏[1]　马　爽[1]

(1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193;
2. 中国农业大学农业农村部华北耕地保育重点实验室, 北京 100193)

摘要: 为探明黄土高原生物结皮土壤斥水性的影响因素及其沿降水梯度的变化特征,在黄土高原沿降水梯度布设了 8 个采样区,每个采样区选择恢复年限相近的草地或林地,采用滴水穿透时间法和微型盘式入渗仪法测定了生物结皮与无结皮土壤的斥水时间和斥水系数,分析了生物结皮对斥水性的影响及其与结皮特性、土壤属性和年均降水量的相关性。结果表明,与无结皮土壤相比,黄土高原生物结皮土壤的斥水时间和斥水系数分别增加了 54.85 倍和 5.80 倍,但两者沿降水梯度的变化规律相似,均呈自南向北先减小、后稳定的变化趋势,且生物结皮土壤斥水性的空间变异性高于无结皮土壤;生物结皮土壤的斥水时间和斥水系数与结皮厚度、粉粒含量、黏粒含量、有机质含量、年均降水量呈显著的正相关关系($P \leqslant 0.032$),与苔藓生物量和砂粒含量呈显著的负相关关系($P \leqslant 0.030$);非线性回归表明,生物结皮土壤的斥水时间和斥水系数均可用结皮厚度和苔藓生物量进行模拟($R^2 = 0.97$, NSE 不小于 0.99)。研究表明,黄土高原生物结皮的发育显著增加了土壤斥水性,且斥水性沿降水梯度从南到北呈先减小、后逐渐稳定的空间变化趋势,年均降水量主要通过改变生物结皮厚度、苔藓生物量和有机质含量等理化性质而间接影响土壤斥水性。

关键词: 斥水时间; 斥水系数; 黄土高原; 降水梯度; 藓结皮

中图分类号: S152.7　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)07-0304-09　　**OSID**:

Effects of Biocrust Covering on Soil Water Repellency and Its Variations along Precipitation Gradient on Chinese Loess Plateau

SUN Fuhai[1]　XIAO Bo[1,2]　YAO Xiaomeng[1]　LI Shenglong[1]　WANG Guopeng[1]　MA Shuang[1]

(1. *College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing* 100193, *China*
2. *Key Laboratory of Arable Land Conservation in North China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing* 100193, *China*)

Abstract: Soil water repellency (SWR) is an important indicator of soil physical property, and closely correlated to the processes of soil erosion and hydropedological processes. It was conducted to understand the effects of biocrusts on SWR and its variation characteristics, as well as its influencing factors in the Loess Plateau of China. SWR was assessed by using water drop penetration time (W_{DPT}) and water repellency index (R_i) method. Along the 292 ~ 595 mm precipitation gradient, eight sampling sites were selected and the restoration age were similar at each survey sites. The SWR of biocrusts and the adjacent bare soil on each sampling site were measured by W_{DPT} method and mini-disc infiltrometer, respectively. In the meantime, biocrusts thickness, moss biomass, moss density, bulk density, soil mechanical composition and soil organic matter were also measured to analyze its correlations with the SWR. The results showed that W_{DPT} and R_i between biocrusts and bare soil were significant at each sampling sites ($P < 0.05$). The W_{DPT} and R_i of biocrusts was average increased by 54.85 and 5.80 times as compared with the corresponding soils without biocrusts. Whether it was on the biocrusts or bare soil, the W_{DPT} and R_i showed a similar trend, which was decreasing from south to north along the precipitation gradient in the Loess Plateau of China. In addition, the spatial variability of biocrusts SWR was higher than that of bare

收稿日期: 2019-10-06　修回日期: 2020-02-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41671221)和中国科学院"西部引进人才"项目(2019)

作者简介: 孙福海(1997—),男,博士生,主要从事土壤物理与水土保持研究,E-mail: sunfh@cau.edu.cn

通信作者: 肖波(1981—),男,副教授,博士生导师,主要从事土壤物理与水土保持研究,E-mail: xiaobo@cau.edu.cn

soil. There was a positively relationship between the W_{DPT} and R_i of biocrusts and biocrusts thickness, silt content, clay content, soil organic matter and annual average precipitation ($P \leqslant 0.032$). In addition, there was a negative correlation between the W_{DPT} and R_i of the biocrusts and the biomass and sand content ($P \leqslant 0.030$). No-linear regression demonstrated that the W_{DPT} and R_i of biocrusts could be simulated by biocrusts thickness and biomass. The simulated coefficients of determination (R^2), root mean squared error (RMSE) and the Nash – Sutcliffe efficiency (NSE) of biocrusts W_{DPT} was 0.97, 5.89 s and 0.99, respectively. Correspondingly, the simulated result of biocrusts R_i was better than that of W_{DPT} with the R^2 of 0.97, RMSE of 1.10 and NSE of 1.00. In general, the W_{DPT} and R_i of biocrusts was decreasing from south to north along the precipitation gradient on the Loess Plateau of China, and the SWR of soil surface can be increased by the biocrusts. The W_{DPT} and R_i distribution of biocrusts was satisfactorily simulated by biocrusts thickness and biomass. The annual average precipitation could indirectly affect the biocrusts SWR by altering the crust thickness, biomass, and soil organic matter.

Key words: water drop penetration time; water repellency index; Loess Plateau; precipitation gradient; moss biocrusts

0　引言

土壤斥水性是指水分不能或很难湿润土壤颗粒表面的现象,具体表现为水珠滞留在土壤表面,长时间不能入渗或铺展,是土壤重要的物理属性之一[1]。土壤斥水性的存在对水文过程产生重要影响,不仅增加地表径流和土壤侵蚀[2]、降低土壤的入渗和持水能力[3],从而导致指状流的产生和土壤水分分布的不均匀[4],而且还降低土壤对污染物的过滤能力、抑制种子的发芽和植物的生长,进而导致地下水污染和作物减产[5]。斥水性的产生和严重程度受土壤性质(如含水率、有机质含量、土壤质地和生物膜等)的综合影响[6-7]。

生物结皮是指生长在土壤表面及以下的藻类、地衣、苔藓、真菌和细菌等生物同土壤颗粒相互作用形成的复合层[8]。作为一种特殊的土壤表层,生物结皮具有不同于下层土壤的结构和性质,其对土壤物质循环和斥水性产生极大影响[9]。目前,国内外已有较多关于生物结皮对土壤斥水性影响的研究。FISCHER 等[10]研究表明,生物结皮土壤斥水性的变化与结皮中的优势种有关,藻结皮的斥水性随着生物结皮的发育而逐渐增加,但随着结皮演替,藓类逐渐代替藻类成为优势种,生物结皮土壤的斥水性逐渐降低。张培培等[7]研究发现,生物结皮提高了土壤的斥水性,且斥水性随着结皮的演替而逐渐减低。郭成久等[11]认为,藓结皮的发育显著提高了土壤的斥水性,同时藓结皮的斥水性随着火烧时间的增加而增加。生物结皮发育后可通过改变土壤表面对水分的亲和性,进而影响土壤斥水性[7]。此外,区域气候条件(如降水和温度)可通过控制有机质的矿化作用、土壤质地、pH 值等因素间接导致不同区域土壤斥水性的差异。

土壤斥水性是影响土壤入渗的重要因素。我国黄土高原地区土地退化较为严重,为有效控制水土流失,黄土高原实施了退耕还林(草)工程,随着该工程措施的大力推进,生物结皮成为该区域最具特色的微自然景观[9]。我国黄土高原由南到北年均降水量和年均温度逐渐降低,土壤质地逐渐粗化,土壤水分含量、土壤有机碳和土壤团聚体稳定性逐渐降低[12-13]。这些变化势必导致生物结皮的发育状况、土壤理化性质和植被恢复在区域尺度上的变化,进而造成生物结皮土壤斥水性的变化[6]。目前,黄土高原生物结皮土壤斥水性研究主要集中在不同结皮发育阶段和外界干扰等方面[7],对黄土高原区域尺度上生物结皮土壤斥水性的变化研究较少,影响因素尚不明晰。基于此,本研究针对黄土高原地区发育的生物结皮,沿降水梯度布设一条样线,采用滴水穿透时间法和微型盘式入渗仪法对比研究生物结皮与无结皮土壤的斥水时间和斥水系数,明确生物结皮和无结皮土壤斥水性沿降水梯度的变化特征,分析结皮特性、土壤理化性质和气候对生物结皮土壤斥水性的影响,为研究黄土高原生物结皮对土壤水文过程的影响提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　采样点选择

基于黄土高原 98 个气象站点 30 年(1981—2010 年)降水数据,在黄土高原沿降水梯度由南向北进行采样,共 8 个采样区(图 1,采样区 1 ~ 8 从南到北依次为铜川市宜君县、延安市安塞区、子长县史家畔乡、绥德县田庄镇、绥德县赵家砭村、榆林市小壕兔乡、鄂尔多斯市伊金霍洛旗、鄂尔多斯市达拉特旗。下同)。年均降水量从南端采样区 1(铜川市宜君县)的 595 mm 下降到北端采样区 8(鄂尔多斯市达拉特旗)的 292 mm。黄土高原的土壤主要是风成黄土,8 个采样区中从铜川市宜君县到绥德市赵家

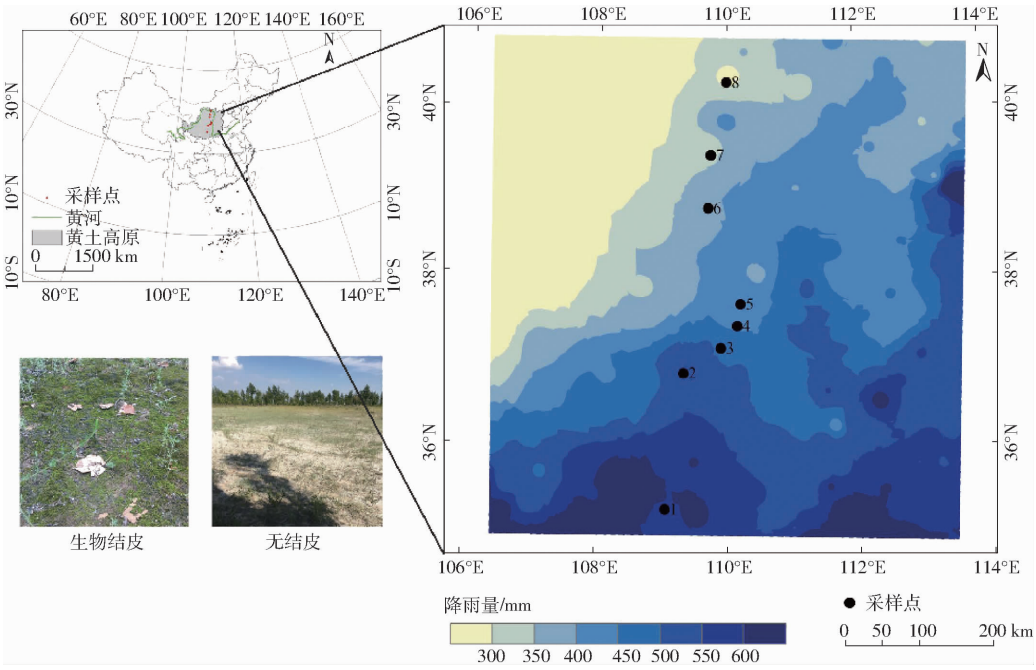

图 1 采样区示意图

Fig. 1 Sketch map of sampling sites

砭乡的土壤类型均为黄绵土,从榆林市小壕兔乡到鄂尔多斯市达拉特旗的土壤类型均为风沙土。

2017 年 7 月进行了样品的野外采集。在每个采样点采集 2 种典型地表覆盖类型(生物结皮和无结皮)的土壤样品。为了减小土地利用类型对研究的影响,选择大致相同退耕年限的自然演替草地或林地作为代表采样点(表 1)。采样时,选取发育良好且具有代表性的藓结皮作为研究样地,并在其周围选择无结皮样地(原状土)作为对照,每个采样点的坡度和坡向要相近或一致。

表 1 样线各采样点基本信息

Tab. 1 Basic information of each sampling site of transect

采样区	海拔/m	结皮盖度/%	年均温/℃	年均降水量/mm	地貌类型	土地利用类型
1	1 252	20	7.4	595	山间平地	林地
2	1 161	20	7.8	539	山间平地	林地
3	945	40	9.3	488	坡地	草地
4	867	80	9.1	444	坡地	草地
5	904	20	8.5	430	坡顶平地	草地
6	1 285	75	7.0	383	沙土平地	林地
7	1 317	60	5.5	340	沙土平地	草地
8	1 063	55	6.2	292	沙土平地	林地

1.2 土样采集与测定

每个样点用标准环刀(高 5 cm,体积 100 cm^3)采集生物结皮与无结皮土壤样品带回实验室,自然风干后,用以研究生物结皮和无结皮土壤的斥水时间和斥水系数。

土壤斥水时间(Water drop penetration time):使用滴水穿透时间法测定斥水时间,用来反映斥水持久性。用标准滴定管将 3 滴(每滴约 0.05 mL)蒸馏水滴到土壤样品的表面,用秒表记录水滴完全渗入土壤所需的时间,即为斥水时间,并根据斥水时间将斥水性分为无斥水性(0 ~ 5 s)、轻微斥水性(5 ~ 60 s)、强烈斥水性(60 ~ 600 s)、严重斥水性(600 ~ 3 600 s)以及极度斥水性(> 3 600 s)5 个等级[14]。每个采样点各 5 个重复,取平均值,上述过程在室温(25℃)下进行,下同。

土壤斥水系数(Repellency index):采用微型盘式入渗仪法(Mini disk infiltrometer,美国 Decagon 公司,上部包含两个室,上部的气泡室控制虹吸过程,下室的水渗透到土壤中,底部为直径 5 cm 不锈钢多孔圆盘,总高 32 cm)测定斥水系数。将微型盘式入渗仪放置于环刀样品上端,保证仪器与样品表面接触良好,其后分别测定 95% 乙醇和纯水的入渗过程,并每隔 30 s 记录入渗量,每个采样点各 3 个重复,斥水系数计算公式为[15]

$$R_i = 1.95 \frac{\dfrac{I_e}{\sqrt{t_e}}}{\dfrac{I_w}{\sqrt{t_w}}}$$

式中 I_e——酒精溶液的累计入渗量,mm

I_w——纯水的累计入渗量,mm

t_e——酒精溶液的入渗时间,s

t_w——纯水的入渗时间,s

在采集测定斥水性土样的同时,采集土样用于土壤机械组成、容重、有机质含量和苔藓生物量等指

标的测定。采用干燥法测定苔藓生物量，每个采样点 5 个重复，取平均值；采用游标卡尺测量生物结皮 4 个方向的厚度并取平均值，每个采样点 5 个重复；采用环刀法测定土壤容重，每个采样点 5 个重复，取平均值；采用重铬酸钾外加热法测定有机质含量，每个采样点 3 个重复，取平均值；采用马尔文 MS2000 型激光粒度仪测定土壤机械组成，并按美国制进行分级（砂粒粒径 0.05 ~ 2 mm、粉粒粒径 0.002 ~ 0.05 mm 和黏粒粒径 0 ~ 0.002 mm），每个采样点 3 个重复，取平均值。各样点土壤样品的基本信息见表 2。

表 2　各采样点土壤的基本理化性质

Tab. 2　General characteristics of soil samples

采样区	处理	结皮厚度/mm	苔藓生物量/（g·m^{-2}）	苔藓密度/（株·cm^{-2}）	容重/（g·cm^{-3}）	砂粒质量分数/%	粉粒质量分数/%	黏粒质量分数/%	有机质质量比/（g·kg^{-1}）
1	无结皮				(1.43 ± 0.01)^{Ca}	(19.07 ± 1.05)^{Fb}	(76.60 ± 1.00)^{Aa}	(4.34 ± 0.12)^{Aa}	(16.83 ± 2.46)^{Ab}
	生物结皮	(10.00 ± 1.00)^{AB}	(281.40 ± 101.98)^{D}	(47.96 ± 10.21)^{AB}	(1.42 ± 0.03)^{Aa}	(29.48 ± 7.70)^{Ea}	(67.17 ± 7.23)^{Ab}	(3.35 ± 0.49)^{Ab}	(49.02 ± 2.32)^{Aa}
2	无结皮				(1.28 ± 0.08)^{Da}	(21.68 ± 6.16)^{Fb}	(74.80 ± 5.96)^{Aa}	(3.52 ± 0.20)^{Ba}	(13.32 ± 2.86)^{Ab}
	生物结皮	(9.75 ± 1.50)^{AB}	(598.62 ± 177.89)^{C}	(51.88 ± 15.20)^{A}	(1.25 ± 0.06)^{Ba}	(44.20 ± 1.48)^{Da}	(53.95 ± 1.43)^{Bb}	(1.85 ± 0.05)^{Bb}	(37.55 ± 1.56)^{Aa}
3	无结皮				(1.19 ± 0.04)^{DEa}	(31.00 ± 1.04)^{Ea}	(66.28 ± 1.03)^{Ba}	(2.72 ± 0.02)^{Ca}	(10.18 ± 0.31)^{Ab}
	生物结皮	(8.00 ± 1.00)^{AB}	(629.35 ± 178.72)^{BC}	(29.95 ± 7.46)^{C}	(1.09 ± 0.07)^{Cb}	(42.08 ± 2.47)^{Da}	(55.84 ± 2.39)^{Bb}	(2.08 ± 0.08)^{Bb}	(35.89 ± 4.94)^{Aa}
4	无结皮				(1.11 ± 0.01)^{Ea}	(37.04 ± 1.25)^{Db}	(60.60 ± 1.19)^{Ca}	(2.35 ± 0.06)^{Da}	(15.08 ± 7.04)^{Ab}
	生物结皮	(7.00 ± 1.29)^{BC}	(672.49 ± 158.82)^{BC}	(46.99 ± 6.66)^{AB}	(1.10 ± 0.03)^{Ca}	(49.90 ± 8.10)^{CDa}	(48.45 ± 7.74)^{BCb}	(1.66 ± 0.35)^{BCb}	(34.97 ± 16.86)^{Aa}
5	无结皮				(1.33 ± 0.08)^{Da}	(59.00 ± 5.13)^{Ca}	(39.54 ± 4.84)^{Da}	(1.46 ± 0.29)^{Ea}	(13.03 ± 4.55)^{Ab}
	生物结皮	(6.60 ± 1.82)^{BC}	(732.18 ± 168.16)^{ABC}	(29.47 ± 6.18)^{C}	(1.25 ± 0.03)^{Ba}	(55.83 ± 5.40)^{Ca}	(42.85 ± 5.18)^{Ca}	(1.32 ± 0.22)^{CDa}	(34.03 ± 14.14)^{Aa}
6	无结皮				(1.56 ± 0.07)^{ABa}	(75.26 ± 0.71)^{Ba}	(23.69 ± 0.68)^{Eb}	(1.05 ± 0.03)^{Fa}	(7.47 ± 1.67)^{Ab}
	生物结皮	(6.33 ± 0.58)^{BC}	(846.75 ± 163.87)^{ABC}	(46.81 ± 5.22)^{AB}	(1.49 ± 0.10)^{Aa}	(71.16 ± 1.68)^{Bb}	(27.99 ± 1.70)^{Da}	(0.85 ± 0.09)^{DEb}	(27.52 ± 2.78)^{Aa}
7	无结皮				(1.62 ± 0.07)^{Aa}	(79.68 ± 0.45)^{Ba}	(19.59 ± 0.40)^{Ea}	(0.73 ± 0.05)^{Gb}	(12.01 ± 5.65)^{Ab}
	生物结皮	(6.50 ± 1.52)^{BC}	(930.49 ± 219.32)^{AB}	(35.11 ± 5.28)^{BC}	(1.51 ± 0.06)^{Ab}	(75.45 ± 2.71)^{Bb}	(23.29 ± 2.86)^{DEa}	(1.25 ± 0.17)^{CDa}	(35.71 ± 8.79)^{Aa}
8	无结皮				(1.49 ± 0.03)^{BCa}	(92.20 ± 1.32)^{Aa}	(7.66 ± 1.24)^{Fb}	(0.13 ± 0.10)^{Hb}	(10.61 ± 1.18)^{Ab}
	生物结皮	(5.20 ± 1.30)^{C}	(1026.36 ± 314.19)^{A}	(49.96 ± 9.19)^{A}	(1.48 ± 0.03)^{Aa}	(84.17 ± 1.01)^{Ab}	(15.47 ± 0.88)^{Ea}	(0.36 ± 0.15)^{Ea}	(31.76 ± 5.24)^{Aa}

注：同列不同小写字母表示同一采样点生物结皮和无结皮处理之间差异显著（$P < 0.05$）；不同大写字母表示不同采样区生物结皮或无结皮处理之间差异显著（$P < 0.05$）。下同。

1.3　数据处理

采用描述性统计方法对比生物结皮和无结皮土壤的斥水特征（平均值、最大值、最小值、标准差和变异系数 C_V）。当 $C_V \leqslant 10\%$ 时为弱变异，当 $10\% < C_V < 100\%$ 时为中等程度变异，当 $C_V \geqslant 100\%$ 时为强变异。实验数据使用 Microsoft Excel 2016 进行处理与分析，采用 IBM SPSS 22.0 进行生物结皮和无结皮土壤斥水特征的单因素方差分析、斥水特征与其影响因子的 Pearson 相关分析、斥水特征与其影响因子的线性和非线性回归分析和斥水特征模拟。斥水特征模拟方程相关性、预测误差和有效性分别用决定系数（Coefficient of determination，R^2）、均方根误差（Root mean square error，RMSE）和纳什系数（Nash - Sutcliffe efficiency，NSE）进行评价，通过

OriginPro 2019 作图。

2 结果与分析

2.1 生物结皮对斥水性的影响

生物结皮和无结皮土壤的斥水时间(W_{DPT})和斥水系数(R_i)如图 2(图中不同小写字母表示生物结皮和无结皮处理之间差异显著($P<0.05$),下同)所示。生物结皮土壤的斥水时间为 44.77 s,表现为轻微斥水性,无结皮土壤的斥水时间小于 5 s,不具有斥水性。生物结皮与无结皮土壤的斥水系数分别为 19.32 和 2.81。与无结皮土壤相比,生物结皮土壤的斥水时间和斥水系数分别增加了 54.85、5.80 倍,统计分析表明,生物结皮与无结皮土壤的斥水时间($F=57.637$, $P<0.001$)和斥水系数($F=10.358$, $P=0.002$)均有显著差异。黄土高原生物结皮的发育显著提高了表层土壤的斥水性。

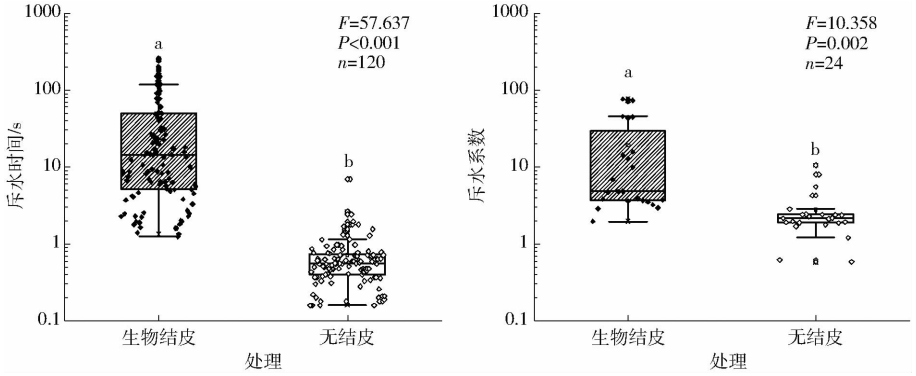

图 2 生物结皮和无结皮土壤的斥水时间与斥水系数

Fig. 2 W_{DPT} and R_i of biocrusts and bare soil

2.2 生物结皮土壤斥水时间和斥水系数的变化趋势

生物结皮的发育显著影响土壤斥水性。由图 3 可知(图中不同大写字母表示不同采样区生物结皮或无结皮处理之间差异显著($P<0.05$),下同),生物结皮土壤的斥水时间和斥水系数沿降水梯度的变化趋势较为相似,从宜君县(采样区 1)到田庄镇(采样区 4),生物结皮的斥水时间和斥水系数随着年均降水量的降低而逐渐降低。从田庄镇到达拉特旗(采样区 8)生物结皮的斥水时间和斥水系数随年均降水量的变化较小,大体呈减小趋势;无结皮土壤的斥水时间和斥水系数沿降水梯度的变化较小,从宜君县到达拉特旗,土壤斥水时间和斥水系数大体呈减小趋势。除采样区 6 的斥水系数,各采样区生物结皮与无结皮的斥水时间和斥水系数均存在显著差异。

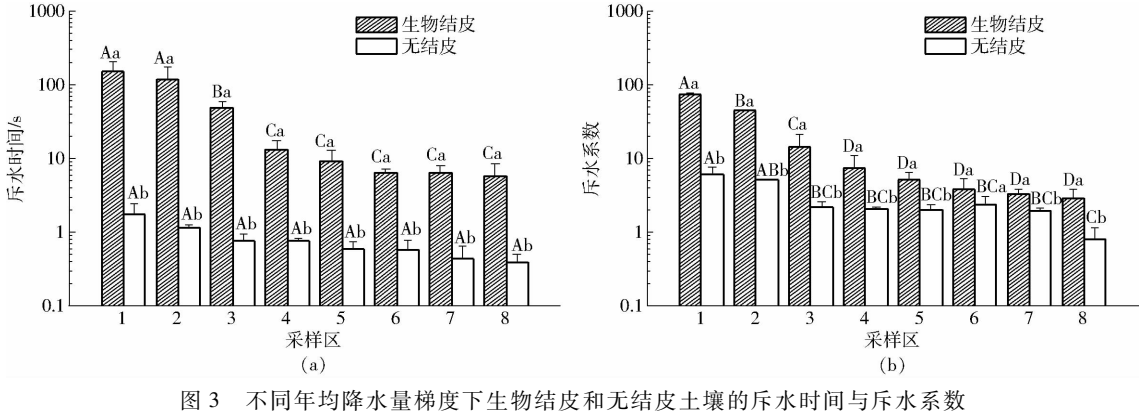

图 3 不同年均降水量梯度下生物结皮和无结皮土壤的斥水时间与斥水系数

Fig. 3 W_{DPT} and R_i of biocrusts and bare soil under different annual precipitation gradients

生物结皮和无结皮土壤斥水时间的变化范围分别为 5.70 ~ 149.50 s 和 0.39 ~ 1.74 s(图 3a),生物结皮和无结皮土壤斥水时间的最大值与最小值之比分别为 26.23、4.46 倍。生物结皮土壤斥水时间的变异系数为 128%,与无结皮土壤相比增加了 1.30 倍,生物结皮和无结皮土壤斥水时间沿降水梯度的空间变异性分别为强变异和中等程度变异。在年均降水量 292 ~ 595 mm 区间,生物结皮土壤斥水时间由南向北递减速率为 0.47 s/mm。

由图 3b 可知,生物结皮和无结皮土壤斥水系数的变化范围分别为 2.88 ~ 73.22 和 0.80 ~ 6.01,生物结皮和无结皮土壤斥水系数的最大值与最小值之比分别为 25.42、7.51 倍。生物结皮和无结皮土壤斥水系数的变异系数分别为 135% 和 63%,分别为

强变异和中等程度变异。在年均降水量 292 ~ 595 mm 区间内，生物结皮土壤斥水系数由南向北递减速率为 0.23/mm。

2.3 生物结皮土壤斥水性空间变化趋势的影响因素及模拟

生物结皮土壤的斥水性受结皮特性、土壤性质和降水量的共同影响。从表 3 可以看出，在各因子间，生物结皮土壤的斥水时间和斥水系数均与结皮厚度、粉粒含量、黏粒含量、有机质含量及年均降水量呈显著正相关关系（$P \leqslant 0.032$）；与苔藓生物量和砂粒含量呈显著负相关关系（$P \leqslant 0.030$）；而与年均温之间无显著的相关关系（$P > 0.05$）。

表 3　生物结皮土壤斥水时间和斥水系数与结皮性质、土壤理化性质、气候的 Pearson 相关系数

Tab. 3　Pearson correlation coefficient between W_{DPT} and R_i of biocrusts and biocrusts properties, soil physical and chemical properties and climate

指标	斥水时间		斥水系数	
	r	*P*	*r*	*P*
结皮厚度	0.951 **	< 0.001	0.907 **	0.002
苔藓生物量	−0.853 **	0.007	−0.865 **	0.006
苔藓密度	0.366	0.373	0.387	0.343
容重	−0.091	0.831	0.012	0.977
砂粒质量分数	−0.785 *	0.021	−0.757 *	0.030
粉粒质量分数	0.779 *	0.023	0.749 *	0.032
黏粒质量分数	0.836 **	0.010	0.852 **	0.007
有机质质量比	0.838 **	0.009	0.883 **	0.004
年均降水量	0.880 **	0.004	0.852 **	0.007
年均温	0.148	0.726	0.078	0.854
海拔	0.277	0.507	0.325	0.431

注：* 表示在 0.05 水平上显著相关；** 表示在 0.01 水平上显著相关。

由表 4（D 为结皮厚度，mm；B 为苔藓生物量，g/m^2；S_{and} 为砂粒质量分数，%；S_{ilt} 为粉粒质量分数，%；C_{lay} 为黏粒质量分数，%；S_{OM} 为有机质质量比，g/kg；P_r 为年均降水量，mm。下同）可知，生物结皮土壤斥水时间随着黏粒含量的增大呈幂函数增大（$R^2 = 0.68$，RMSE 为 28.02 s）；随结皮厚度、粉粒含量和年均降水量的增加均呈指数函数增大（$R^2 \geqslant 0.79$，RMSE 小于等于 24.77 s）；随着苔藓生物量和砂粒含量的增大，分别呈线性函数和指数函数减小（$R^2 \geqslant 0.68$，RMSE 小于等于 28.04 s）。

生物结皮土壤斥水系数随着苔藓生物量和砂粒含量的增加均呈指数函数减小（$R^2 = 0.82$，RMSE 小于等于 9.55，表 4）；与生物结皮土壤斥水时间相同，生物结皮土壤斥水系数随着结皮厚度、粉粒含量、有机质含量及年均降水量的增加均呈指数函数增加（$R^2 \geqslant 0.76$，RMSE 小于等于 10.88，表 4）。

表 4　生物结皮土壤斥水时间和斥水系数与影响因素的关系

Tab. 4　Relationship between W_{DPT} and R_i of biocrusts and influencing factors

指标	回归方程	R^2	RMSE	NSE
斥水时间	$W_{DPT} = 0.12e^{0.71D}$	0.98	6.11 s	0.99
	$W_{DPT} = -0.21B + 196.90$	0.68	28.04 s	0.73
	$W_{DPT} = 1\,070.98e^{-0.07S_{and}}$	0.75	25.01 s	0.78
	$W_{DPT} = e^{0.08S_{ilt}}$	0.79	24.77 s	0.79
	$W_{DPT} = 15.48C_{lay}^{1.90}$	0.68	28.02 s	0.73
	$W_{DPT} = 7.81S_{OM} - 234.72$	0.65	29.34 s	0.70
	$W_{DPT} = 0.19e^{0.01P_r}$	0.91	15.04 s	0.92
斥水系数	$R_i = 0.01e^{0.87D}$	0.96	7.75	0.90
	$R_i = 230.37e^{-0.004B}$	0.82	9.55	0.84
	$R_i = 767.48e^{-0.08S_{and}}$	0.82	9.49	0.85
	$R_i = 0.20e^{0.09S_{ilt}}$	0.82	9.42	0.85
	$R_i = 4.83C_{lay}^{2.25}$	0.78	10.44	0.81
	$R_i = 0.17e^{0.12S_{OM}}$	0.76	10.88	0.80
	$R_i = 0.03e^{0.01P_r}$	0.97	6.76	0.92

基于以上生物结皮斥水性与结皮性质、理化性质、降水量之间的关系，运用非线性回归方法建立生物结皮的斥水时间和斥水系数的模拟方程（表 5）。生物结皮的斥水性与生物结皮特性密切相关，本研究选取与黄土高原生物结皮斥水时间（图 4a）和斥水系数（图 4b）呈显著相关的结皮厚度与苔藓生物量进行拟合。从拟合方程的 R^2、RMSE 和 NSE 来看，生物结皮土壤斥水时间的拟合效果略低于生物结皮土壤斥水系数的拟合效果（图 4）。

表 5　生物结皮土壤斥水时间和斥水系数的预测方程

Tab. 5　Relationships between W_{DPT}, R_i and its affecting factors

指标	回归方程	R^2	RMSE	NSE
斥水时间	$W_{DPT} = 0.241B^{-0.073}e^{0.684D}$	0.97	5.89 s	0.99
斥水系数	$R_i = 0.155e^{0.646D-0.001B}$	0.97	1.10	1.00

3　讨论

土壤斥水性是土壤重要的物理属性，其影响因素较多，如有机质含量、土壤含水率、pH 值、质地和生物膜等均能对土壤斥水性产生较大影响[6,16]。土壤有机质是影响土壤斥水性的主要因素之一，其中诱发斥水性的主要组分为脂肪族烃和两性分子[6]，而不同地区诱发斥水性的有机质主要组分不同，在草地中，土壤腐殖质是影响土壤斥水性的重要因素，而在林地中，斥水性主要受脂类物质的影响[17]。土壤颗粒组成也是影响斥水性的重要环境因子，一方面细颗粒可通过对斥水性物质的吸附，以及自身的亲水/疏水特征影响土壤斥水性[10]。另一方面，土壤粒径越大土壤孔隙度越高，相应的斥水性越

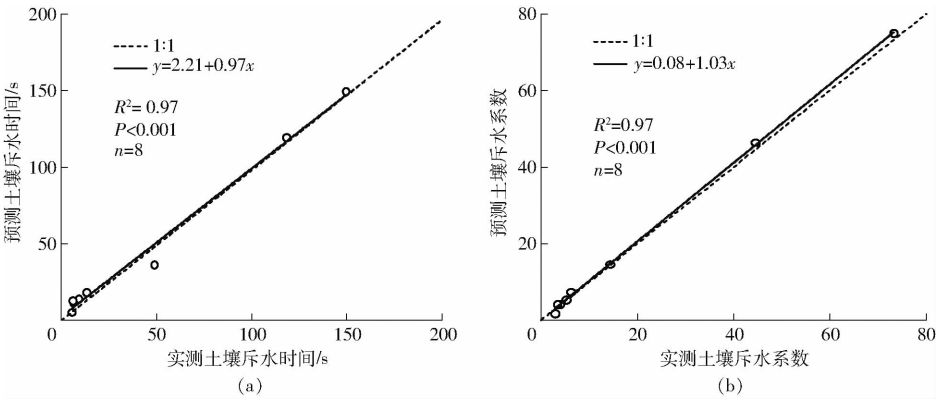

图 4 生物结皮土壤斥水时间和斥水系数实测值与预测值的比较

Fig. 4 Comparison between measured and predicted W_{DPT} and R_i of biocrusts

低[18]。另外,pH 值可通过影响水分扩散率和疏水性物质含量(特别是胡敏酸)间接影响土壤斥水性,斥水性土壤可能具有较低的 pH 值[19-20]。除此之外,土壤中的担子菌类的菌丝体、曲霉菌和放线菌等微生物通过产生具有斥水性的次生代谢产物进而影响斥水性[21]。

本研究中,黄土高原无结皮土壤未发生斥水现象,而生物结皮发育后显著增加了土壤斥水性,其平均斥水时间和斥水系数分别比无结皮土壤增加了 54.85、5.80 倍。这主要是由于生物结皮形成后改变了表层土壤的理化性质,其不仅细化土壤,增加有机质含量,而且降低土壤 pH 值[9]。因此本研究选取上述指标研究其对土壤斥水性的影响。首先,生物结皮发育后增加了土壤粗糙度[22],有利于土壤表面获得更多的降尘,进而增加了粉粒和黏粒含量,降低了表层土壤孔隙度。其中黏粒可能与土壤中的斥水性化合物结合形成有机-无机复合体,吸附稳定的斥水物质,降低其分散速度,有利于其积累,进而增加土壤斥水性[18]。其次,生物结皮的发育增加了土壤有机质,其来源一方面为生物结皮中生物组分通过固氮和固碳作用增加土壤有机质含量[9];另一方面生物结皮的发育为土壤动物活动提供了良好的条件,其排泄物等间接增加土壤有机质含量[18]。张雪辰[23]研究表明,粪便在腐解过程中会产生大量的有机 C═O 组分,而有机 C═O 组分易引发土壤斥水性。最后,生物结皮作为土壤与大气交界面的组分,对土壤降水-入渗-产流过程产生重要影响。生物结皮发育过程中,其物质组成的改变引起表面粗糙度和孔隙度的变化,间接影响土壤斥水性,从而对入渗产生影响[24]。生物结皮中的藻类物质可分泌胞外多糖,而胞外多糖具有疏水性,形成一层具有疏水特性的膜状物,堵塞了地表孔隙结构,不利于水分入渗[10],同时生物结皮中微生物能够产生斥水性次生代谢产物,其中细菌能够产生大量的胞外聚合物,而胞外聚合物吸水后膨胀形成不透水层堵塞土壤孔隙,阻碍水分的下渗,提高了土壤斥水性[21]。边丹丹等[25]研究发现,生物结皮发育后显著增加了土壤表层微生物及细菌数量。此外,pH 值与土壤斥水性密切相关[26],生物结皮形成后土壤 pH 值一般呈降低趋势,从而间接导致土壤斥水性增加[9]。

研究结果显示,在黄土高原年均降水量 292 ~ 595 mm 范围内,生物结皮土壤的斥水时间和斥水系数整体上表现为年均降水量越低斥水性越低的规律,降水不仅是植被生长的主要生态限制因子,还是生物结皮土壤斥水性动态的控制因子[27]。究其原因,一方面土壤斥水性与粉粒含量、黏粒含量和有机质含量呈正相关关系[26]。本研究所选取的采样区植被恢复年限相近,降水量梯度差异表现为土壤颗粒组成、有机质积累、生物结皮发育等过程的差异,进而导致生物结皮土壤斥水性与年均降水量显著相关。黄土高原由南向北年均降水量逐渐降低,土壤质地逐渐粗化,土壤孔隙度逐渐增加,黏粒和有机质含量逐渐降低[28],因而间接降低了土壤斥水性。另一方面,生物结皮通过对扬尘和砂砾的捕获逐渐掩埋了土壤,结皮植株生长对光照的遮蔽使下层胞外聚合物和细胞发生腐解,导致结皮层厚度逐渐增加,而结皮层厚度的增加是土壤碳储量增加的重要原因,进而影响生物结皮土壤斥水性[10]。受降水梯度的影响,黄土高原土壤水分含量由南向北呈递减趋势,对于本研究的草地和林地来说,年均降水量较低的地区,生物结皮无法与高盖度的高等植物进行水分和养分资源的竞争,导致其发育程度较低,表现为结皮的厚度和植株密度较低[29]。而发育程度较低的生物结皮,其厚度、腐殖质含量和微生物含量一般较低,导致土壤斥水性降低[30-32]。

本研究表明,降水量对生物结皮土壤斥水性的解释程度略低于结皮厚度,结皮厚度能很好地解释生物结皮土壤斥水性的变异,其原因可能与结皮厚

度间接影响表层土壤有机质含量和生物量有关。降水量通过改变土壤水热状况影响生物结皮的发育过程中土壤质地、微生物、有机质含量等变化，进一步影响土壤斥水性的动态过程，这也可在一定程度上解释生物结皮对水分入渗的影响[33]。

4　结论

（1）黄土高原生物结皮显著增加了表层土壤斥水性，与无结皮土壤相比，黄土高原生物结皮土壤的斥水时间和斥水系数分别增加了 54.85 倍和 5.80 倍。

（2）黄土高原生物结皮和无结皮土壤斥水时间和斥水系数自南向北（以最南端铜川市宜君县为起点）呈先减小、后逐渐稳定的空间变化趋势，且生物结皮土壤斥水性的空间变异性高于无结皮土壤。

（3）黄土高原生物结皮土壤的斥水时间和斥水系数均受结皮厚度、苔藓生物量、砂粒含量、粉粒含量、黏粒含量、有机质含量及年均降水量的显著影响（$P<0.05$）；生物结皮土壤的斥水时间和斥水系数均可用结皮厚度和苔藓生物量进行模拟，R^2 均为 0.97，RMSE 分别为 5.89 s 和 1.10，NSE 分别为 0.99 和 1.00。

参　考　文　献

[1] BACHMANN J, HORTON R, VAN DER PLOEG R R, et al. Modified sessile drop method for assessing initial soil-water contact angle of sandy soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(2): 564 – 567.

[2] LEIGHTON-BOYCE G, DOERR S H, SHAKESBY R A, et al. Quantifying the impact of soil water repellency on overland flow generation and erosion: a new approach using rainfall simulation and wetting agent on soil[J]. Hydrological Processes, 2007, 21(17): 2337 – 2345.

[3] XIAO B, SUN F H, HU K L, et al. Biocrusts reduce surface soil infiltrability and impede soil water infiltration under tension and ponding conditions in dryland ecosystem[J]. Journal of Hydrology, 2019, 568: 792 – 802.

[4] 吴延磊，李子忠，龚元石. 两种常用方法测定土壤斥水性结果的相关性研究[J]. 农业工程学报，2007，23(7)：8 – 13.
WU Yanlei, LI Zizhong, GONG Yuanshi. Correlation of soil water repellency measurements from two typical method[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7): 8 – 13. (in Chinese)

[5] DE JONGE L W, MOLDRUP P, SCHJONNING P. Soil infrastructure, interfaces and translocation processes in inner space ("soil-it-is"): towards a road map for the constraints and crossroads of soil architecture and biophysical processes[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(8): 1485 – 1502.

[6] 陈俊英，张智韬，汪志农，等. 土壤斥水性影响因素及改良措施的研究进展[J]. 农业机械学报，2010，41(7)：84 – 89.
CHEN Junying, ZHANG Zhitao, WANG Zhinong, et al. Influencing factors and amelioration of soil water repellency[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 84 – 89. (in Chinese)

[7] 张培培，赵允格，王媛，等. 黄土高原丘陵区生物结皮土壤的斥水性[J]. 应用生态学报，2014，25(3)：657 – 663.
ZHANG Peipei, ZHAO Yunge, WANG Yuan, et al. Impact of biological soil crusts on soil water repellency in the hilly Loess Plateau region, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(3): 657 – 663. (in Chinese)

[8] BELNAP J. The world at your feet: desert biological soil crusts[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2003, 1(4): 181 – 189.

[9] 肖波，赵允格，邵明安. 陕北水蚀风蚀交错区两种生物结皮对土壤理化性质的影响[J]. 生态学报，2007，27(11)：4664 – 4670.
XIAO Bo, ZHAO Yunge, SHAO Ming'an. Effects of biological soil crust on soil physicochemical properties in water-wind erosion crisscross region, Northern Shannxi Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(11): 4664 – 4670. (in Chinese)

[10] FISCHER T, VESTE M, WIEHE W, et al. Water repellency and pore clogging at early successional stages of microbiotic crusts on inland dunes, Brandenburg, NE Germany[J]. CATENA, 2010, 80(1): 47 – 52.

[11] 郭成久，陈乐，肖波，等. 黄土高原苔藓结皮斥水性及其对火烧时间的响应[J]. 沈阳农业大学学报，2016，47(2)：212 – 217.
GUO Chengjiu, CHEN Le, XIAO Bo, et al. Soil water repellency of moss-dominated biological soil crusts and their response to fire duration on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2016, 47(2): 212 – 217. (in Chinese)

[12] 耿韧，张光辉，洪大林，等. 黄土高原农地草地林地土壤团聚体稳定性沿降水梯度的变化特征[J]. 农业工程学报，2019，35(3)：141 – 148.
GENG Ren, ZHANG Guanghui, HONG Dalin, et al. Variation characteristics of aggregate stability of cropland, grassland and woodland along precipitation gradient in Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(3): 141 – 148. (in Chinese)

[13] 孙龙，张光辉，栾莉莉，等. 黄土丘陵区表层土壤有机碳沿降水梯度的分布[J]. 应用生态学报，2016，27(2)：532 – 538.
SUN Long, ZHANG Guanghui, LUAN Lili, et al. Distribution of soil organic carbon in surface soil along a precipitation gradient in loess hilly area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(2): 532 – 538. (in Chinese)

[14] DEKKER L W, DOERR S H, OOSTINDIE K, et al. Water repellency and critical soil water content in a dune sand[J]. Soil

Science Society of America Journal, 2001, 65(6): 1667 - 1674.
[15] HALLETT P D, YOUNG I M. Changes to water repellence of soil aggregates caused by substrate-induced microbial activity [J]. European Journal of Soil Science, 1999, 50(1): 35 - 40.
[16] GRABER E R, TAGGER S, WALLACH R. Role of divalent fatty acid salts in soil water repellency[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(2): 541 - 549.
[17] MAO J F, NIEROP K G J, DAMSTÉ J S S, et al. Roots induce stronger soil water repellency than leaf waxes[J]. Geoderma, 2014, 232 - 234: 328 - 340.
[18] 杨昊天,刘立超,高艳红,等.腾格里沙漠沙丘固定后土壤的斥水性特征研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3): 674 - 682.
YANG Haotian, LIU Lichao, GAO Yanhong, et al. Characteristics of soil water repellency in stabilized sand dunes in the Tengger desert[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(3): 674 - 682. (in Chinese)
[19] 龚恩磊,王辉,胡传旺,等.酸性溶液对红壤水分入渗特征影响及其模拟研究[J].水土保持学报,2015,29(1): 48 - 51.
GONG Enlei, WANG Hui, HU Chuanwang, et al. Simulation and influence of acid solutions on the hydraulic characteristics of red soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1): 48 - 51. (in Chinese)
[20] 李自刚, 岳晓禹,李长滨,等.基于变量选择的堆肥胡敏酸含量近红外光谱分析[J/OL].农业机械学报,2017, 48(2): 300 - 304.
LI Zigang, YUE Xiaoyu, LI Changbin, et al. Near infrared spectral modeling analysis based on variable selection of composthemic acid content [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 300 - 304. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170240&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.040. (in Chinese)
[21] DOERR S H, SHAKESBY R A, WALSH R P D. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance[J]. Earth Science Reviews, 2000, 51(1): 33 - 65.
[22] 王国鹏,肖波,李胜龙,等.黄土高原水蚀风蚀交错区生物结皮的地表粗糙度特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2019,38(10): 3050 - 3056.
WANG Guopeng, XIAO Bo, LI Shenglong, et al. Surface roughness of biological soil crusts and its influencing factors in the water-wind erosion crisscross region on the Loess Plateau of China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019,38(10): 3050 - 3056. (in Chinese)
[23] 张雪辰. 禽畜粪便堆肥化过程碳氮转化规律及其受调控措施的影响[D].杨凌: 西北农林科技大学,2014.
ZHANG Xuechen. The transformation of organic carbon and nitrogen with different regulation technology during the livestock manure composting process[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)
[24] WHITNEY K M, VIVONI E R, DUNIWAY M C, et al. Ecohydrological role of biological soil crusts across a gradient in levels of development[J]. Ecohydrology, 2017, 10(2): e1875.
[25] 边丹丹, 廖超英, 孙长忠, 等. 黄土丘陵区土壤生物结皮对土壤微生物分布特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(4): 109 - 114.
BIAN Dandan, LIAO Chaoying, SUN Changzhong, et al. Effect of soil biological crust on the distribution of soil microorganisms in the loess hilly region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(4): 109 - 114. (in Chinese)
[26] 任长江, 赵勇, 龚家国, 等. 妫水河流域土壤斥水性分布与影响因素研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 237 - 244.
REN Changjiang, ZHAO Yong, GONG Jiaguo, et al. Spatial distribution and effects factors of soil water repellency in Guishui River Basin[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 237 - 244. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20171029&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.029. (in Chinese)
[27] CHANGR Y, JIN T T, LÜ Y H, et al. Soil carbon and nitrogen changes following afforestation of marginal cropland across a precipitation gradient in Loess Plateau of China[J]. PloS One, 2014, 9(1): e85426.
[28] 王海, 高永飞, 刘洪林, 等. 草原土壤斥水性与土壤理化因子的相关性分析[J]. 中国草地学报, 2019, 41(1): 68 - 74.
WANG Hai, GAO Yongfei, LIU Honglin, et al. Correlation analysis of soil water repellency and soil physical-chemical properties in grassland[J]. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(1): 68 - 74. (in Chinese)
[29] 张钦弟, 卫伟, 陈利顶,等. 黄土高原草地土壤水分和物种多样性沿降水梯度的分布格局[J]. 自然资源学报, 2018, 33(8): 1351 - 1362.
ZHANG Qindi, WEI Wei, CHEN Liding, et al. Spatial variation of soil moisture species diversity patterns along a precipitation gradient in the grasslands of the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(8): 1351 - 1362. (in Chinese)
[30] BELNAP J. The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles[J]. Hydrological Processes, 2006, 20(15): 3159 - 3178.
[31] 吴丽, 张高科, 陈晓国, 等. 生物结皮的发育演替与微生物生物量变化[J]. 环境科学, 2014, 35(4): 1479 - 1485.
WU Li, ZHANG Gaoke, CHEN Xiaoguo, et al. Development and succession biological soil crusts and the changes of microbial biomasses[J]. Environmental Science, 2014, 35(4): 1479 - 1485. (in Chinese)
[32] YOUNG I M, FEENEY D S, O'DONNELL A G, et al. Fungi in century old managed soils could hold key to the development of soil water repellency[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 45: 125 - 127.
[33] KIDRON G J. Runoff and sediment yields from under-canopy shrubs in a biocrusted dunefield[J]. Hydrological Processes, 2016, 30(11): 1665 - 1675.