

王德金,赵文智,周宏.河西走廊中部荒漠砾幕特征及其对土壤水分入渗的影响[J].中国沙漠,2020,40(6):233-241.

河西走廊中部荒漠砾幕特征及其 对土壤水分入渗的影响

王德金^{1,2}, 赵文智¹, 周宏^{1,2}

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 临泽内陆河流域研究站/内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 荒漠砾幕由一层紧密堆积的嵌入在泡状细颗粒物质的土层中的碎屑物组成,对稳定荒漠生态系统具有重要作用。基于野外调查和原位土壤入渗试验,分析了河西走廊临泽绿洲北部荒漠砾幕特征及其对土壤入渗的影响。结果表明:(1)荒漠砾幕平均厚度为0.50 cm,平均砾石粒径为4.61 mm,平均砾石覆盖度为52.7%。(2)相比于砾幕下方土壤剖面,砾幕质量含水量较低,仅为0.3%;砾幕砾石含量较高,为41.64%,沿山丘-绿洲方向呈增加趋势;样地表层容重一般大于下层容重。(3)砾幕能够降低土壤水分入渗,砾幕去除后,稳定入渗率将从 $2.35\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 增加至 $3.69\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。(4)砾幕稳定入渗率与砾幕厚度、砾幕砾石含量呈极显著负相关,与砾石覆盖度、砾幕质量含水量呈显著正相关,与砾幕砾石粒径呈正相关。

关键词: 荒漠砾幕; 砾石覆盖层; 水分入渗; 盘式入渗仪; 临泽绿洲

文章编号: 1000-694X(2020)06-233-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00083

中图分类号: S157.9

文献标志码: A

0 引言

荒漠砾幕(又称荒漠砾石覆盖层, Desert Pavement)由一层紧密堆积的碎屑物组成,这些碎屑物嵌入在黏粒或粉粒富集的泡状土层(Av)之中^[1]。作为世界干旱区常见的景观特征^[2],荒漠砾幕在澳大利亚、美国西南部(尤其是亚利桑那州和加利福尼亚州)、中东、北非、中亚、蒙古、俄罗斯和中国西北内陆盆地等地均有分布。荒漠砾幕按成因可分为冲积型和残积型两种,冲积型砾幕以混合成分和不同来源的砾石为特征,残积型砾幕以局部基岩暴露的角状碎片为特征,风化较少^[3]。

荒漠砾幕在水文、生态中起着重要作用^[4]。荒漠砾幕能够降低地表水分渗透、增加地表径流,进而影响生态结构和景观演化,对未来荒漠生态和环境演变具有重要的指示作用^[2,5-6]。同时,荒漠砾幕能够保护地表土壤和沉积物免受侵蚀^[7-8]。近20年来,国外关于荒漠砾幕的研究集中在北美莫哈维沙

漠^[6,9]和索诺兰沙漠^[10]、北非利比亚高原^[11-12]、中东内盖夫沙漠^[4,13]、澳大利亚艾尔湖区^[14]、印度塔尔沙漠^[7]等地,研究主要包括荒漠砾幕的特征^[7,9]、形成演化^[6,15]、地表修复^[11,16-17]、生态水文效应^[1,18-19]等。相比而言,国内关于荒漠砾幕的研究较少,主要涉及形成演化^[8],尤其缺乏对荒漠砾幕水文效应方面的研究。

荒漠砾幕的水文特性主要反映在降低地表土壤水分入渗和减少地表蒸发。Hamerlynck等^[18]认为只有在降水量较大、降水频率较低的降水事件中,水分才能通过砾幕对深层土壤水分产生补给。砾幕水分入参与多种因素有关,如地表砾石覆盖度、砾幕碎屑物、砾幕发育年龄等。Abrahams等^[20]认为水分入参与砾石覆盖度之间存在负相关关系。Peosen等^[21]认为当砾幕受到干扰时,两者呈负相关关系,若砾幕未受干扰,两者呈正相关关系。Hamerlynck等^[18]认为水分入参与砾幕碎屑有关,均一度较好的小碎屑及其下方泡状土层能够有效阻止

收稿日期:2020-05-25; 改回日期:2020-08-25

资助项目:国家自然科学基金重点项目(41630861)

作者简介:王德金(1988—),男,甘肃金昌人,博士研究生,研究方向为生态水文。E-mail: Wangdj@lzb.ac.cn

通信作者:赵文智(E-mail: zhaowzh@lzb.ac.cn)

水分入渗。Young等^[1]认为随着砾幕发育年龄的增加,水分入渗率降低,土壤储水量增加。然而,Li等^[19]采用人工降雨对砾幕进行的水文特性研究,发现砾幕去除与否对径流和水分入渗没有显著性差异,碎屑层不是入渗和降雨径流的限制层。

在河西走廊地区,分布着大面积荒漠砾幕,对维持荒漠生态系统的稳定具有重要作用。然而,关于荒漠砾幕的特征及其水文效应方面的研究相对较少。本文以河西走廊中部临泽绿洲北部荒漠为例,调查了地表砾幕的特征,分析了荒漠砾幕对土壤水分入渗的影响。研究可为进一步了解荒漠砾幕的水文效应提供参考依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于河西走廊中部临泽绿洲北部荒漠(图1),地理坐标为39°25′—39°42′N、99°57′—100°20′E,平均海拔1350 m。区域气候属典型的干旱荒漠气候,年平均气温7.6℃,最高气温39℃,最

低气温-27.3℃;年降水量116.8 mm,年潜在蒸散量2390 mm;年平均风速3.2 m·s⁻¹,历史最大风速>17 m·s⁻¹。土壤类型以灰棕漠土和灰漠土为主。常见植物有泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)、红砂(*Reaumuria songarica*)、灌木亚菊(*Ajania fruticulosa*)、蒙古韭(*Allium mongolicum*)等;若遇到降水发生,地表可能会出现大量一年生植被,如籽蒿(*Artemisia sieversiana*)、画眉草(*Eragrostis pilosa*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、虎尾草(*Chloris virgata*)、白茎盐生草(*Halogeton arachnoideus*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置和取样

在山丘-绿洲间的荒漠内,沿NE-SW方向依次选取5块样地(图1),样地大小为100 m×100 m。表1和图2显示了5个样地的地理位置、地表特征、剖面形态和植被特征。样地1地表平坦,被荒漠砾幕覆盖,植被覆盖度20%~35%,土壤剖面呈Av-Bk系列,偶尔存在Btk层,Av层土壤结构呈中度块状、

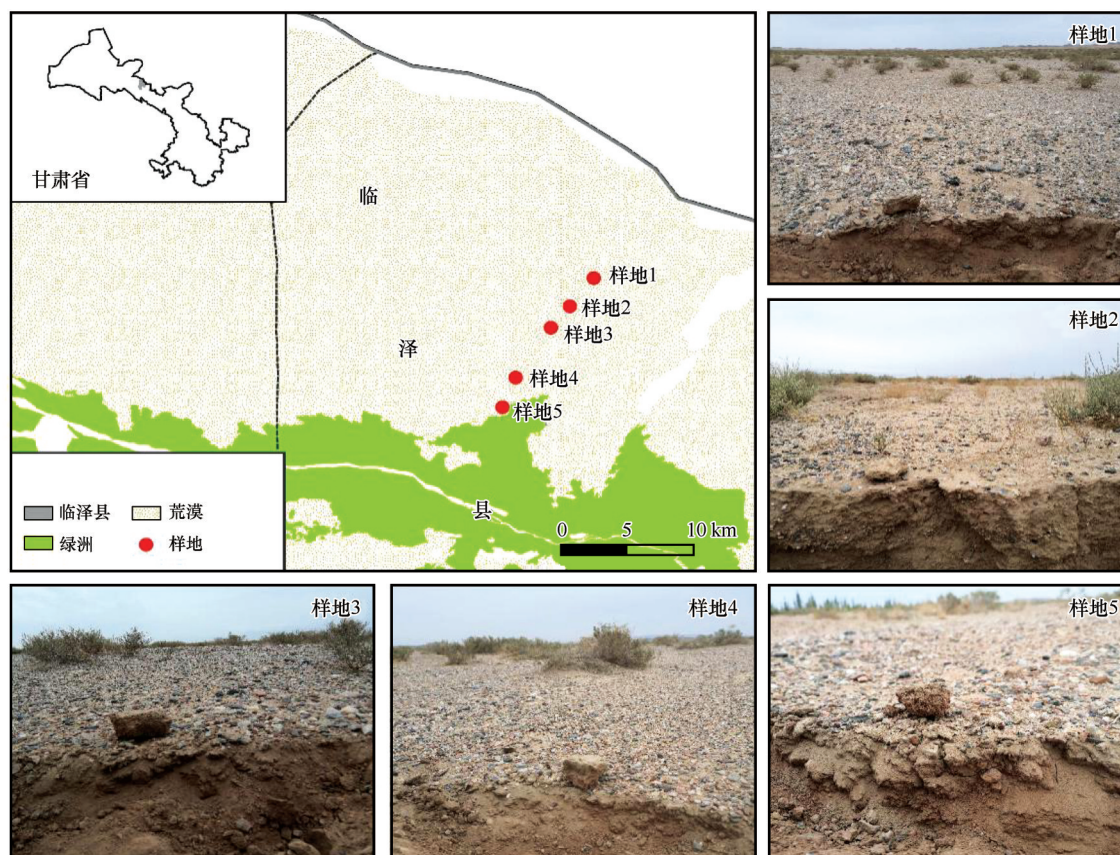


图1 研究区和采样位置

Fig.1 Location of study area and sample sites

表 1 样地位置及地表特征

Table 1 Position and surface features at each sample site

编号	地理坐标	地表特征	植被特征
样地 1	39°29′24.95″N 100°10′49.98″E	地表倾斜较小,存在风沙侵蚀和流水痕迹	植被覆盖度 20%~35%,植被主要包括泡泡刺、红砂、蒙古韭、籽蒿、画眉草、狗尾草等
样地 2	39°28′12.45″N 100°09′50.65″E	地表平坦,存在明显风沙侵蚀和流水痕迹,有洪水沟道存在	植被覆盖度 20%~30%,植被主要包括泡泡刺、灌木亚菊、红砂、籽蒿、画眉草、白茎盐生草等
样地 3	39°27′18.06″N 100°09′04.92″E	地表平坦,存在风沙侵蚀,无流水痕迹	植被覆盖度 15%~30%,植被主要包括泡泡刺、红砂、蒙古韭、籽蒿、画眉草、狗尾草、白茎盐生草、刺沙蓬等
样地 4	39°25′10.15″N 100°07′38.40″E	地表平坦,存在风沙侵蚀,无流水痕迹	植被覆盖度约 10%~20%,植被主要包括泡泡刺、红砂、蒙古韭、骆驼刺、籽蒿、画眉草、狗尾草、虎尾草、白茎盐生草等
样地 5	39°23′54.95″N 100°07′06.27″E	地表平坦,存在风沙侵蚀和人为干扰痕迹,无流水痕迹	植被覆盖度 15%~30%,植被主要包括泡泡刺、红砂、籽蒿、画眉草、刺毛碱蓬、白茎盐生草、戈壁针茅、刺沙蓬、芨芨草等

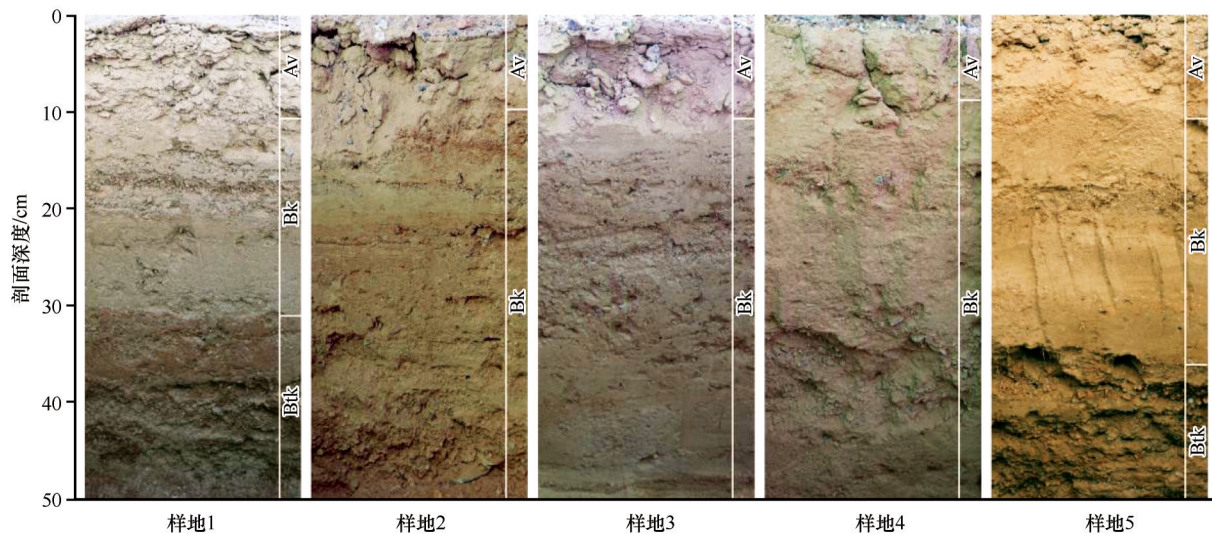


图 2 不同样地的土壤剖面(加入剖面分类)

Fig.2 Soil profile at each sample site

中度棱柱状和片状结构。样地 2 位于干沟一侧,干沟宽度可超过 8 m,地表为荒漠砾幕所覆盖,植被覆盖度达 30%,土壤剖面为 Av-Bk 系列,Av 层土壤结构呈中度块状、中度棱柱状和中度片状。样地 3 地表无明显的流水痕迹,地表为荒漠砾幕所覆盖,地表植被覆盖度 15%~30%,土壤剖面为 Av-Bk-(Btk),Av 层呈中度块状、中强棱柱状和中度片状结构。样点 4 地表平坦,为荒漠砾幕所覆盖,植被覆盖度为 10%~20%,土壤剖面系列为 Av-Bk 系列,有时夹杂有 Btk 层,Av 层土壤结构存在中度棱柱状和中度块状结构。样地 5 距绿洲最近,存在细沟侵蚀,地表存在车辙印和人工培植的梭梭,土壤系列为 Av-Bk 系列,土壤偏红,Av 层土壤结构为块状、中等片状和中等棱柱状结构。

每个样地内设置样线 1 条,间隔 1 m 设置小样方 (10 cm× 10 cm),样方共计 40 个。每个样方内,采用直尺测量砾幕厚度,测量 3 次并取平均值。测量完毕后,将小样方内砾幕样品带回试验室过筛(2 mm 圆孔土壤筛),随机选取 200 颗砾石(>2 mm),采用游标卡尺测定砾石的长轴(d_a)、中轴(d_b)和短轴(d_c),按如下公式^[22]计算砾石粒径。

$$d = \sqrt[3]{d_a d_b d_c} \tag{1}$$

入渗试验于 2019 年 9—10 月进行,试验前 10 d 内无降水发生。每个样地内进行 10 组土壤水分入渗试验,每组试验包括砾幕覆盖和砾幕去除两种处理。入渗试验前在地表平铺一层湿润沙(<2 mm),采用盘式入渗仪(高度 100 cm,底盘直径 17 cm)在 -1 cm 水头下进行土壤水分入渗试验,采用 Philip 模

型对试验结果进行拟合^[23],计算稳定入渗率,计算公式如

$$I(t) = S \cdot t^{1/2} \quad (2)$$

式中: $I(t)$ 为单位面积的累计入渗率; t 是累计入渗时间; S 是吸水系数。通过模拟可以估计出吸水系数。

对上式求导可得到入渗率的表达式为:

$$i(t) = \frac{1}{2} S \cdot t^{-1/2} \quad (3)$$

式中: $i(t)$ 为入渗率。当水流稳定时,入渗率即为稳定入渗率,它数值上等于或接近于饱和导水率。

入渗试验前,对地表进行拍照,取样大小为10 cm×10 cm样方,裁剪处理后采用数字图像处理法提取砾石覆盖度^[24]。数字处理法的基本步骤为:

①光学和几何校正;②识别砾石特征;③图像二值化;④采用全局阈值法进行阈值风格分割;⑤采用Matlab 2016b软件计算已处理图像的黑白像素数目;⑥通过计算黑白像素数目估算砾石覆盖度。

入渗试验后,在入渗点旁开挖50 cm深的土壤剖面,分别采集砾幕及其下方0~3、3~6、6~10、10~15、15~25、25~35、35~50 cm土壤剖面样品,并带回实验室处理。采用烘干法(105℃,8 h)测定土壤质量含水量。采用筛分法(2 mm圆孔土壤筛)测定砾

石含量,选取过筛后>2 mm的砾石样品,采用6种规格的土壤筛(孔径为2.5、3、4、5、10、20 mm的圆孔土壤筛)做过筛处理并称重,计算不同粒径范围内的砾石含量,即砾石粒级。此外,利用环刀在土壤剖面0~5(含砾幕)、5~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm上采样,装袋封存后带回实验室,采用烘干法(105℃,8 h)测定土壤容重。测定完毕后,采用权重法(以土壤分层为准)计算土壤剖面质量含水量、土壤剖面砾石含量和下层(5~50 cm)土壤容重。

1.2.2 数据分析

利用IBM SPSS软件进行Pearson相关性分析和方差分析,采用LSD进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 砾幕特征

2.1.1 砾幕厚度

图3A显示,砾幕平均厚度为0.50 cm,介于0.10~1.03 cm,呈正态分布,其中厚度0.40~0.65 cm的砾幕占60.50%。5个样地内(表2),样地4砾幕厚度最大(0.61 cm),样地1砾幕厚度最小(0.39 cm),其余样地砾幕厚度从大到小依次为样地3>样地2>样地5。

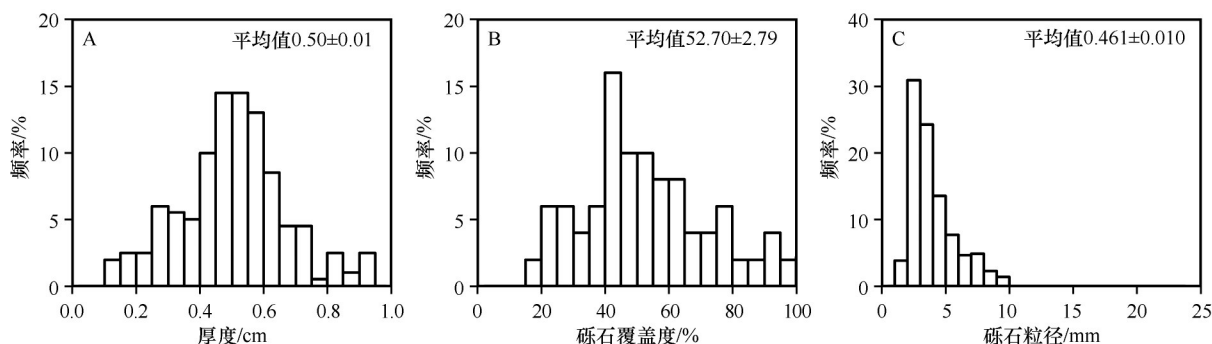


图3 砾幕的厚度、砾石覆盖度和砾石粒径

Fig.3 Thickness, gravel coverage and gravel size of desert pavement

2.1.2 砾石覆盖度

图3B显示,砾石覆盖度平均为52.70%,介于19.48%~97.63%,呈偏态分布,峰值位于40%~45%,占18%。5个样地内(表2),样地1砾石覆盖度高达76.58%,其余样地砾石覆盖度相对较低,介于38.44%~52.86%。

2.1.3 砾石粒径

图3C显示,砾幕平均砾石粒径为4.61 mm,介于1.70~31.69 mm,呈偏态分布,其中2~4 mm粒径范围

内的砾石颗粒占55.10%。5个样地内(表2),砾幕砾石粒径偏小且差异不大,样地2砾石粒径最大(5.18 mm),样地5砾石粒径最小(4.19 mm),其余区域砾石粒径从大到小依次为样地3>样地1>样地4。

2.2 土壤剖面特征

2.2.1 土壤质量含水量

砾幕质量含水量仅为0.30%,低于砾幕下方土壤剖面质量含水量。砾幕及其下方土壤剖面质量含

表 2 砾幕及其下方土壤剖面的物理参数

Table 2 Physical parameters of desert pavement and its lower soil profile

指标	土层位置	样地 1	样地 2	样地 3	样地 4	样地 5
厚度/cm	砾幕	0.39±0.03	0.48±0.01	0.54±0.02	0.61±0.03	0.44±0.03
砾石覆盖度/%	砾幕	76.58±5.05	47.29±4.47	52.86±2.84	38.44±6.16	48.34±5.33
砾石粒径/mm	砾幕	4.63±0.019	5.18±0.25	4.77±0.27	4.30±0.19	4.19±0.22
质量含水量/%	砾幕	0.53±0.10	0.24±0.03	0.22±0.03	0.23±0.04	0.28±0.03
	土壤剖面	2.16±0.26	1.74±0.12	1.62±0.25	2.30±0.28	1.88±0.12
砾石含量/%	砾幕	30.61±3.49	31.37±1.92	41.94±2.68	49.90±6.68	54.37±3.37
	土壤剖面	18.60±1.95	18.40±1.64	20.93±1.83	8.97±1.30	15.66±3.18
土壤容重/(g·cm ⁻³)	表层	1.73±0.02	1.58±0.02	1.76±0.03	1.69±0.03	1.80±0.05
	下层	1.65±0.02	1.62±0.02	1.65±0.02	1.58±0.04	1.72±0.02

数值为平均值±标准误;土壤剖面为砾幕下方 0~50 cm 土壤剖面;表层土壤容重为 0~5 cm 土壤容重,包含砾幕;下层土壤容重为 5~50 cm 土壤剖面的平均容重。

水量呈单峰分布,最大值为 2.57%,出现在 15~25 cm 土层中(图 4A)。5 个样地内(表 2),砾幕质量含水量均偏低,最大值出现在样地 1(0.53%),最小值出现在样地 3(0.22%);砾幕下方土壤剖面质量含水量相对较高,介于 1.74%~2.30%,最大值出现在样地 4 (2.30%),最小值出现在样地 3(1.62%)。

2.2.2 砾石含量

为分析砾幕及其下方土壤剖面的砾石特征,将粒径>2 mm 的颗粒视为砾石。图 4B 所示,砾幕砾石含量相对较高,占 41.64%;砾幕下方土壤剖面砾石含量相对较低,为 15.17%。5 个样地内(表 2),砾幕砾石含量较高,沿山丘-绿洲方向呈增加趋势,样地 5 砾石含量最高,为 54.37%,样地 1 砾石含量最低,为 30.61%。砾幕下方剖面砾石含量较低,样地 3 含

量最高,为 20.93%,样地 4 含量最低,为 8.97%。

为进一步分析砾幕及其下方土壤剖面砾石含量特征,将砾石粒径进行分级(表 3)。统计结果显示,砾幕和砾幕下方土壤剖面的砾石粒级具有明显差异。砾幕砾石粒级以 5~10 mm 为主,占 34.98%; 10~20 mm 次之,占 23.63%。砾幕下方土壤剖面砾石粒级以 5~10 mm 为主,占 25.11%;3~4 mm 和 2~2.5 mm 次之,分别占 19.00% 和 17.04%。5 个样地内,砾幕及其下方土壤剖面的砾石粒级变化的规律相似(表 3)。砾幕砾石粒级以 5~10 mm 为主,占 29.14%~ 37.38%;10~20 mm 次之,占 20.95%~27.06%。砾幕下方土壤剖面砾石粒级以 5~10 mm 为主,占 21.81%~30.82%;3~4 mm 和 2~2.5 mm 次之,分别介于 16.81%~21.50% 和 14.12%~20.47%。

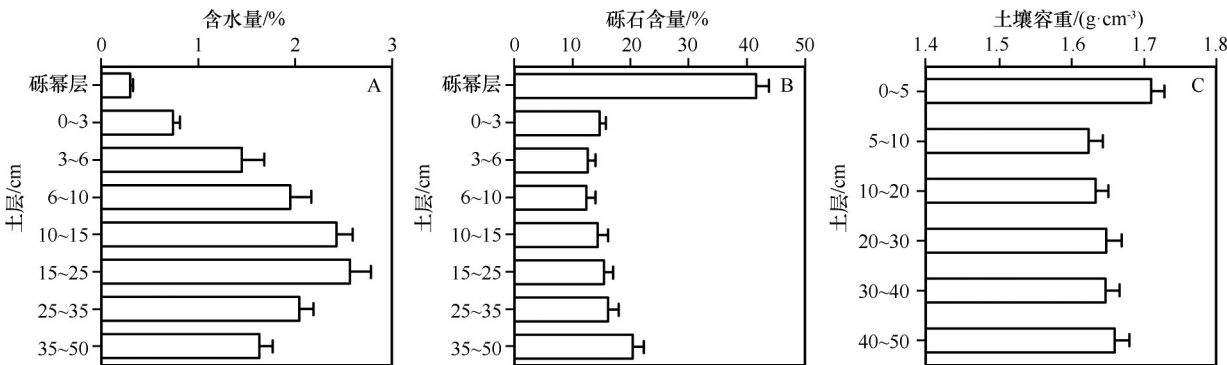


图 4 砾幕及其下方土壤剖面的质量含水量、砾石含量和容重

Fig.4 Mass water content, gravel mass content and bulk density of desert pavement and its lower soil profile

2.2.3 土壤容重

图 4C 显示,表层土壤容重较大,为 1.71 g·cm⁻³; 下层土壤容重较小,介于 1.62~1.66 g·cm⁻³。表 2 结

果表明,除样地 2 外,其余样地表层土壤容重均大于 下层土壤容重。表层土壤容重中,样地 5 容重最大, 为 1.80 g·cm⁻³,样地 2 容重最小,为 1.58 g·cm⁻³。下

表3 砾幕及其下方土壤剖面砾石粒径分级(单位:%)

Table 3 Gravel size grading of desert pavement and its lower soil profile (Unit: %)

样地	位置	土层						
		2~2.5 mm	2.5~3 mm	3~4 mm	4~5 mm	5~10 mm	10~20 mm	>20 mm
样地1	砾幕	8.73±0.23	6.70±0.20	12.82±0.43	8.31±0.29	29.14±1.40	27.06±1.58	7.24±0.96
	土壤剖面	20.47±0.53	14.05±0.30	21.50±0.45	11.05±0.20	21.81±0.50	8.72±0.31	2.41±0.21
样地2	砾幕	8.99±0.28	7.16±0.27	14.45±0.52	10.30±0.45	35.59±0.84	20.95±1.33	2.56±0.61
	土壤剖面	19.26±0.43	12.24±0.22	20.02±0.45	10.28±0.20	24.29±0.44	9.38±0.27	4.53±0.35
样地3	砾幕	6.70±0.46	6.29±0.41	10.72±0.50	7.28±0.41	34.61±1.26	26.27±1.66	8.13±0.86
	土壤剖面	14.14±0.29	11.52±0.23	16.81±0.37	9.93±0.21	25.17±0.50	15.38±0.55	7.04±0.24
样地4	砾幕	4.11±0.14	5.46±0.34	14.69±1.21	10.65±0.88	35.89±3.09	23.67±2.86	5.53±0.96
	土壤剖面	17.27±0.16	12.11±0.11	18.21±0.19	9.65±0.10	23.48±0.35	12.79±0.29	6.50±0.30
样地5	砾幕	5.39±0.30	5.60±0.34	13.71±0.74	11.01±0.58	37.38±1.84	21.18±1.79	5.72±1.35
	土壤剖面	14.12±0.37	10.72±0.26	18.19±0.47	11.21±0.33	30.82±1.22	14.05±0.77	0.89±0.08
平均	砾幕	6.38±0.14	6.1±0.15	13.32±0.38	9.67±0.31	34.98±0.99	23.63±0.87	5.91±0.44
	土壤剖面	17.04±0.20	12.16±0.13	19.00±0.21	10.47±0.11	25.11±0.33	12.01±0.23	4.21±0.13

数值为平均值±标准误;土壤剖面为砾幕下方0~50 cm土壤剖面。

层土壤容重中,样地5容重最大,为 $1.72 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,样地4容重最小,为 $1.58 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

2.3 砾幕对土壤入渗的影响

2.3.1 土壤水分入渗

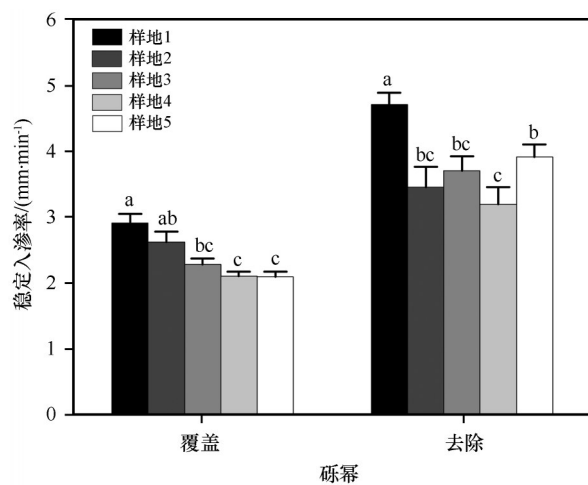
砾幕去除前后,土壤水分入渗发生了明显变化(图5)。当砾幕覆盖时,稳定入渗率为 $2.35 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$;当砾幕去除后,稳定入渗率为 $3.69 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,是砾幕覆盖时的1.6倍。这表明砾幕能够限制土壤水

分入渗。对比不同样地,当砾幕覆盖时,稳定入渗率沿山丘-绿洲方向降低,其中样地1最高($2.83 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$),样地5最低($2.05 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$);当砾幕去除后,稳定入渗率在样地1最高($4.57 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$),在样地4最小($3.12 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)。

方差分析结果(图5)表明,砾幕去除前后,5个样地内稳定入渗率的显著性发生了明显变化。当砾幕覆盖时,样地1与样地2存在显著差异,与其他样地间不存在显著差异;样地2与样地4、样地5存在显著差异,而与样地3不存在显著差异;样地3、样地4和样地5相互之间不存在显著差异。当砾幕去除后,样地1与其他样地间均存在显著差异;样地2与样地3、样地4或样地5不存在显著差异;样地3与样地4或样地5不存在显著差异;而样地4和样地5之间不存在显著差异。

2.3.2 砾幕与土壤水分入渗的相关性

Pearson相关分析(表4)表明,稳定入渗率与砾幕的厚度和砾石含量呈极显著负相关;与砾幕的砾石覆盖度、质量含水量呈显著正相关;与砾幕砾石粒径相关性较大,但不存在显著性;而与表层容重无显著相关性。这说明砾幕的厚度和砾石含量能够显著降低土壤水分入渗,而砾幕的砾石覆盖度、砾幕质量含水量则能显著促进土壤水分入渗;砾幕砾石颗粒大小虽能促进土壤水分入渗,但效果不显著。总之,砾幕物理性质对土壤水分入渗影响较大。



不同小写字母表示差异显著, $P < 0.05$

图5 砾幕覆盖和砾幕去除两种条件下稳定入渗率变化

Fig.5 Steady-state infiltration rate under desert pavement covered and removed conditions

表 4 稳定入渗率和砾幕物理性质的相关性
Table 4 Correlation analysis between steady-state infiltration rate and desert pavement

指标	Pearson 相关系数
厚度	-0.644**
砾石覆盖度	0.361*
砾石粒径	0.609
质量含水量	0.333*
砾石含量	-0.455**
表层容重	-0.160

**表示显著性水平为 $P<0.01$, *表示显著性水平为 $P<0.05$ 。

3 讨论

荒漠砾幕是干旱区常见的景观特征,其形成与非生物演化有关^[6]。随着时间的推移,地表起伏减少,地表碎屑破碎、密度增加、磨圆度降低、碎屑物质逐渐嵌入到由细颗粒物组成的泡状土层之中,最终形成一个互锁的碎屑网络结构^[11]。在本研究中,临泽绿洲北部荒漠砾幕的厚度为 0.50 cm、砾石覆盖度为 52.70%、碎屑粒径为 4.61 mm,但在不同区域内有所差异。这种差异可能因微地貌差异所致。由于所处微地貌环境不同(表 1),地表碎屑物质来源和分化程度不同。如果遇到山洪暴发,大量冲积物被冲积到低洼区域,导致地表形态和物质组成发生变化。此外,由于研究区地处巴丹吉林沙漠边缘,风沙活动会携带大量沙尘,在数千年的加积过程中,地表砾石最终被加积物质所裹挟,在特殊作用下形成具有泡状土层。Moharana 等^[7]在调查位于焦特布尔附近的塔尔沙漠时也认为荒漠砾幕的形成可能经历了不同的地貌过程,导致了地表砾幕在空间上表现出较大的变异性。

在干旱区荒漠生态系统中,降水是土壤水分的主要来源^[15]。尽管砾幕地表会因夜间冷而增加土壤水分,但在强烈的日照下,砾幕水分会被迅速蒸发,因此,砾幕含水量较低^[25]。由于地表砾幕入渗率较低且限制地表蒸散^[18],而土壤中可补给的水分极少,只有在降水量较大、降水频率较低的降水事件中才能对深层土壤产生补给^[18]。然而,砾幕下方土壤剖面在冲洪积作用下形成的富含砾石碎屑的沉积层并不利于水分存储。因此,砾幕下方土壤剖面含水量也较低。即使如此,砾幕下方土壤剖面含水量在区域内分布也存在差异,例如位于样地 1、样地 4 要比样地 3 的含水量高。

荒漠砾幕的存在会降低地表土壤水分渗透,使得地表径流流入附近低洼区域或汇入侵蚀沟道^[1]。该研究发现当砾幕去除后,稳定入渗率会明显提高,是砾幕覆盖时的 1.3~1.8 倍。一方面,这种现象可能与砾幕下方土壤结构相关。砾幕地表为互锁的碎屑网络结构^[11],其下方土壤常常发育形成棱柱状、柱状或层状结构,因此会产生大量缝隙或裂隙,可为土壤水分入渗提供优先通道^[2]。另一方面,与砾幕物理结构有关。首先,砾幕厚度会限制土壤水分入渗。随着砾幕的发育,更多黏粒或粉粒物质被加积到砾幕中,砾幕结构更加紧密,降低了地表水分入渗。其次,砾幕砾石含量也能降低土壤水分入渗。由于砾石能在砾幕形成中起到骨架作用,砾石含量越高,砾幕结构越稳定;同时,较小的砾石碎屑具有较大的比表面积,使得与黏粒或粉粒物质结合更加紧密。因此,这种砾幕结构并不利于水分入渗。尽管 Young 等^[1]认为随着砾幕发育年龄的增加,土壤入渗率会降低,但是该研究去除了地表碎屑物,并没有考虑碎屑物在入渗中所起的作用。尽管 Hamerlynck 等^[18]认为均一度较好的小碎屑能够起到阻止水分入渗的作用,但没有揭示砾石含量与入渗之间的关系。第三,地表砾石覆盖度能够促进土壤水分入渗。尽管许多研究结果认为砾石覆盖度与入渗率之间存在正相关或负相关关系,但该研究结果表明砾石覆盖度与入渗呈正相关关系。Poesen 等^[21]也认为如果砾幕未受干扰,两者之间呈正相关关系。第四,砾幕含水量是否能够促进土壤水分入渗有待进一步研究。尽管土壤物理学认为初期含水量越低,土壤初始入渗越快,但在该研究中,并没有考虑初始入渗速率。而关于砾幕含水量影响稳定入渗率的一种解释是砾幕水分能够精确地控制着荒漠植物的分布和成土成因^[15],砾幕含水量可能作为砾幕性能的一种体现。

4 结论

区域内荒漠砾幕厚度薄(0.50 cm)、砾石粒径小(4.61 mm),地表砾石覆盖度变化范围大,介于 38.44%~76.58%。砾幕砾石含量占 41.64%,沿山丘-绿洲方向呈增加趋势。砾幕质量含水量极低,仅为 0.3%。然而,含砾幕的上层土壤容重却较大,为 1.71 g·cm⁻³。

垂直方向上,砾幕质量含水量低于其下土壤剖面质量含水量,砾幕砾石含量则高于其下土壤剖面

砾石含量。砾幕和砾幕下方土壤剖面的砾石粒级不同,砾幕砾石粒级以5~10 mm为主,10~20 mm次之;而砾幕下方土壤剖面砾石粒级以5~10 mm为主,3~4 mm和2~2.5 mm次之。除样地2外,其余样地上层土壤容重均高于下层土壤容重。

砾幕能够限制土壤水分入渗。砾幕去除前,稳定入渗率介于 $2.05\sim 2.83\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,沿山丘-绿洲方向呈减小趋势;而砾幕去除后,稳定入渗率明显提高,是砾幕去除前的1.3~1.8倍。砾幕物理性质影响土壤水分入渗。砾幕厚度和砾石含量均能显著降低稳定入渗率,而砾石覆盖度则显著提高稳定入渗率。砾幕砾石粒径与稳定入渗率相关性较大,但影响不显著。

参考文献:

- [1] Young M H, McDonald E V, Caldwell T G, et al. Hydraulic properties of a desert soil chronosequence in the Mojave Desert, USA[J]. *Vadose Zone Journal*, 2004, 3(3): 956-963.
- [2] Meadows D G, Young M H, McDonald E V. Influence of relative surface age on hydraulic properties and infiltration on soils associated with desert pavements [J]. *Catena*, 2008, 72 (1): 169-178.
- [3] Laity J. *Deserts and Desert Environments* [M]. New York, USA: Wiley-Blackwell, 2008.
- [4] Matmon A, Simhai O, Amit R, et al. Desert pavement-coated surfaces in extreme deserts present the longest-lived landforms on Earth [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2009, 121: 688-697.
- [5] Haff P K. Desert pavement: an environmental canary? [J]. *Journal of Geology*, 2001, 109(5): 661-668.
- [6] Pietrasiak N, Drenovsky R E, Santiago L S, et al. Biogeomorphology of a Mojave Desert landscape: configurations and feedbacks of abiotic and biotic land surfaces during landform evolution [J]. *Geomorphology*, 2014, 206: 23-36.
- [7] Moharana P C, Raja P. Distribution, forms and spatial variability of desert pavements in arid western Rajasthan [J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2016, 87(4): 401-410.
- [8] Wang X M, Cai D W, Sun J M, et al. Contributions of modern gobi desert to the Badain Jaran Desert and the Chinese Loess Plateau [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1-4.
- [9] Lebedeva M P, Golovanov D L, Shishkov V A, et al. Microscopic and tomographic studies for interpreting the genesis of desert varnish and the vesicular horizon of desert soils in Mongolia and the USA [J]. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 2019, 71(1): 21-42.
- [10] McAuliffe J R. Soil horizon development and the tempo and modes of vegetation change during the Holocene in a Sonoran Desert Basin, USA [J]. *Holocene*, 2019, 29(8): 1263-1272.
- [11] Adelsberger K A, Smith J R, McPherron S P, et al. Desert pavement disturbance and artifact taphonomy: a case study from the eastern Libyan Plateau, Egypt [J]. *Geoarchaeology*, 2013, 28 (2): 112-130.
- [12] Knight J, Zerboni A. Formation of desert pavements and the interpretation of lithic-strewn landscapes of the central Sahara [J]. *Journal of Arid Environments*, 2018, 153: 39-51.
- [13] Matmon A, Dody A, Finkel R A. 300-ky history of sand erosion in the Yamin Plain, Negev Desert, Israel [J]. *Israel Journal of Earth Sciences*, 2009, 58(1): 29-39.
- [14] Al-Farraj A. Desert pavement development on the lake shorelines of Lake Eyre (South), South Australia [J]. *Geomorphology*, 2008, 100(1): 154-163.
- [15] Wood Y A, Graham R C, Wells S G. Surface control of desert pavement pedologic process and landscape function, Cima Volcanic field, Mojave Desert, California [J]. *Catena*, 2005, 59 (2): 205-230.
- [16] Dietze M, Kleber A. Contribution of lateral processes to stone pavement formation in deserts inferred from clast orientation patterns [J]. *Geomorphology*, 2012, 139: 172-187.
- [17] O'Neill T A, Balks M R, López-Martínez J. Visual recovery of desert pavement surfaces following impacts from vehicle and foot traffic in the Ross Sea region of Antarctica [J]. *Antarctic Science*, 2013, 25(4): 514-530.
- [18] Hamerlynck E P, McAuliffe J R, McDonald E V, et al. Ecological responses of two Mojave desert shrubs to soil horizon development and soil water dynamics [J]. *Ecology*, 2002, 83 (3): 768-779.
- [19] Li C, Yin J, Miller J, et al. The role of the clast layer of desert pavement in rainfall-runoff processes [C]//Kansa, USA: World Environmental and Water Resources Congress, 2009: 6509-6516.
- [20] Abrahams A D, Parsons A J. Relation between infiltration and stone cover on a semiarid hillslope, southern Arizona [J]. *Journal of Hydrology*, 1991, 122: 49-59.
- [21] Poesen J, Ingelmo-Sanchez F, Múcher H. The hydrological response of soil surfaces to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1990, 15(7): 653-671.
- [22] 马永法, 李长安, 王秋良, 等. 江汉平原周老镇钻孔砾石统计及其与长江三峡贯通的关系 [J]. *地质科技情报*, 2007, 26(2): 42-46.
- [23] Philip J R. The theory of infiltration: 4. sorptivity and algebraic infiltration equations [J]. *Soil Science*, 1957, 84(3): 257-264.
- [24] Butler J B, Lane S N, Chandler J H. Automated extraction of grain-size data from gravel surfaces using digital image processing [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2001, 39 (5): 519-529.
- [25] Kaseke K F, Mills A J, Henschel J, et al. The effects of desert pavements (gravel mulch) on soil micro-hydrology [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2012, 169(5): 873-880.

Characteristics of desert pavement and its influence on water infiltration in the middle of the Hexi Corridor

Wang Dejin^{1,2}, Zhao Wenzhi¹, Zhou Hong^{1,2}

(1. Linze Inland River Basin Research Station / Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Desert pavement is a surface layer with closely packed gravel that insets in a thin fine-grained vesicular soil horizon, and is important for the stability of the desert ecosystem. Based on the data of the field investigation and situ soil water infiltration in the northern desert of Linze Oasis in the Hexi Corridor, the characteristics of desert pavement and its influence on water infiltration are analyzed in this study. The results show that: (1) desert pavement is 0.50 cm thick with 4.61 mm size gravel, and its surface gravel coverage average 52.7%. (2) Compared to the soil profile below the desert clast, the mass water content of pavement is lower and 0.3%, but the gravel content of pavement is higher and 41.64%, with the declining trend from hill to oasis. Except for Sample 2, the bulk density in upper soil profile (0–5 cm) with pavement clast is higher than it in lower soil profile (5–50 cm). (3) desert pavement can constrain the water infiltration, the steady-state infiltration increases from 2.35 mm·min⁻¹ to 3.69 mm·min⁻¹ when the pavement clast removed. (4) Steady-state infiltration of desert pavement has a significantly negative correlation with thickness and gravel content of pavement clast, a significantly positive correlation with gravel coverage and mass water content of pavement clast, and a positive correlation with grave size of pavement clast. This study is helpful to understand the hydrologic effect of desert pavement.

Key words: desert pavement; pavement clast; water infiltration; disk permeameter; Linze Oasis