科学通报 2011 年 第 56 卷 第 34 期：2917 ~ 2922
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

毛乌素沙地南缘沙丘表面径流特征

吴永胜[①②], 哈斯[①③*], 乌格特茉勒[①]

① 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;
② 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020;
③ 北京师范大学资源学院, 北京 100875
* 联系人, E-mail: hasi@bnu.edu.cn

2011-03-02 收稿, 2011-07-14 接受
国家自然科学基金(41171002, 40771020)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

摘要 为探明生物土壤结皮在半干旱沙地生态系统有限降水资源再分配过程中所扮演的重要角色, 对毛乌素沙地南缘沙丘生物土壤结皮表面径流进行了实验观测. 结果表明在观测期间的 6 次降雨事件中产生径流 2 次. 不同类型生物土壤结皮的径流量差异较大, 径流量由小到大依次为浅色藻类结皮、深色藻类结皮、苔藓结皮, 显示径流量随生物土壤结皮的发育呈增加的趋势. 径流在次降雨量中所占的百分比由浅色藻类结皮经深色藻类结皮至苔藓结皮依次增加, 显示不同类型生物土壤结皮对降水的再分配比例有差异. 生物土壤结皮表面径流受降雨量、降雨强度、雨前结皮表面的水分饱和程度及生物土壤结皮发育程度的共同影响. 生物土壤结皮在沙丘表面的发育改变了半干旱沙地生态系统水分的空间分布, 加大了水分和养分等资源的异质性. 因此, 暴雨季节对生物土壤结皮进行适当的人为干扰活动有益于半干旱沙地生态系统的资源均衡.

关键词
毛乌素沙地
沙丘
生物土壤结皮
径流

由于沙土的高入渗率(其入渗率能够达到 300 mm h^{-1}), 干旱沙区往往被认为是不可能产生径流的[1]. 由细菌、真菌、蓝绿藻、地衣和苔藓等孢子植物类群与土壤形成的有机复合体在沙丘表面的发育显著影响了水分在沙土中的入渗速率, 使沙丘表面产生径流成为了可能. 生物土壤结皮在沙丘表面的形成和发育对当地水分循环产生深远的影响[2], 它对降雨入渗或径流影响的研究是其水文学研究的热点问题. 然而, 生物土壤结皮对降雨入渗或径流影响的研究存在较大争议. 有报道认为生物土壤结皮减少水分入渗, 促进径流的产生[3~10]. 而有些报道则认为生物土壤结皮增加水分入渗, 减少径流的产生[11~13]. 也有少量报道认为生物土壤结皮对水分入渗或径流的影响不显著[14,15]. 腾格里沙漠沙坡头人工植被恢复区生物土壤结皮对水分入渗影响的研究发现, 其形成和发育对降水起到一定的拦截作用, 阻止了水分向深层土壤的入渗[16~20]. 模拟降雨观测结果显示, 只有当昼夜降雨强度超过 40 mm 时才有地表径流产生, 而这种降雨事件在年降雨量不足 200 mm 的干旱沙区是十分罕见的[17~19], 自然降水往往被地表全部吸收, 无地表径流现象. 因此, 生物土壤结皮对区域水分入渗或径流影响的认识停留在它把有限的降水资源的拦截上. 综上所述, 生物土壤结皮对水分入渗或径流影响的研究存在较大争议, 它对水分入渗或径流的影响需更多的实证研究.

我国干旱和半干旱地区有大面积的沙漠和沙地分布, 几乎涵盖了从极端干旱到半干旱的不同气候区. 经几十年的防沙治沙和生态修复, 在固定或半固定沙丘表面生物土壤结皮广泛发育. 目前生物土壤结皮对水分入渗或径流影响的研究集中在广袤的干旱区, 对年降雨量接近 400 mm 的半干旱沙区生物土壤结皮在当地水分循环过程中所扮演的重要角色却

英文版见: Wu Y S, Hasi E, Wugetemole. Characteristics of surface runoff in a sandy area in southern Mu Us sandy land. Chinese Sci Bull, 2011, 56, doi: 10.1007/s11434-011-4728-0

鲜为人知. 本文观测了半干旱沙区生物土壤结皮表面的径流特征, 确定了径流在次降雨量中所占的百分比, 讨论了其产流影响因素. 研究结果不仅加深了对生物土壤结皮在半干旱区水分再分配过程中所发挥重要作用的认识, 而且对受损生态系统的合理利用和生态修复也具有重要的意义.

1 研究区与方法

1.1 研究区

实验在北京师范大学陕西靖边风沙科学实验站进行(图 1). 实验站位于陕西省榆林地区靖边县北部(108°50′E, 37°38′N), 属于毛乌素沙地南缘, 鄂尔多斯高原向陕北黄土高原的过渡地区, 海拔 1350 m. 本区属温带季风半干旱气候, 多年平均降水量 395 mm, 主要集中在夏、秋两季, 降水变率大, 最大降水量达 745 mm(1964 年), 最小降水量仅 205 mm(1965 年), 多年平均蒸发量 2485 mm, 为年平均降水量的 6.3 倍, 多年平均干燥指数 2.3. 研究区处在暖温性草原带, 是典型草原向森林草原的过渡带; 固定和半固定沙丘上生长着大量的沙生植物, 构成了占优势的沙生植被, 有油蒿(*Artemisia ordosica*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、软毛虫实(*Corispermum puberulum*)、沙竹(*Psammochloa villosa*)等; 在固定沙丘上常出现一定数量的草原植物种, 如短花针茅(*Stipa breviflora*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides*)等. 区内土壤成土母质为风成沙、黄土和湖积物, 主要土壤类型有流动风沙土、固定风沙土和草甸土.

1.2 方法

在人工植被恢复区, 分别在浅色藻类结皮(LC)、深色藻类结皮(DC)和苔藓结皮(MC)上布置径流小区, 生物土壤结皮的基本特征见表 1. 径流小区由外径 40 cm, 高 15 cm 的 PVC 管制成(图 2). 具体操作是在上述 PVC 管的侧面中间位置用电钻打直径为 2.5 cm 的口, 之后把直径为 2.5 cm, 长 5 cm 的 PVC 管与其相接, 形成一个出水口, 用胶粘住接口防止其漏水, 并把 PVC 管的底部磨成刀口, 尽量减少径流小区的厚度对结皮表面及下层土壤造成的影响. 布置径流小区时先用水喷湿结皮表面, 目的在于减少径流小区对结皮表面的破坏, 之后把 PVC 管垂直按入沙丘表面, 直到径流小区的出水口与地面处于同一个平面, 保证管内收集的径流能够自然流出出水口. 出水口通过软管与小区下部的收集瓶相连, 每次降雨结束后收集瓶中的径流, 用雨量筒直接测量其径流量. 每种结皮类型设 3 个重复, 考虑到结皮在较小尺度上的异质性, 同一类型结皮表面的径流小区布设在最近的位置. 降雨量、降雨强度及降雨历时利用自记雨量计(RG1, Delta-T, Cambridge, UK)测定. 不同类型生物土壤结皮表面径流差异用单因素方差分析(ANOVA)方法, 统计检验的显著性水平 P=0.05.

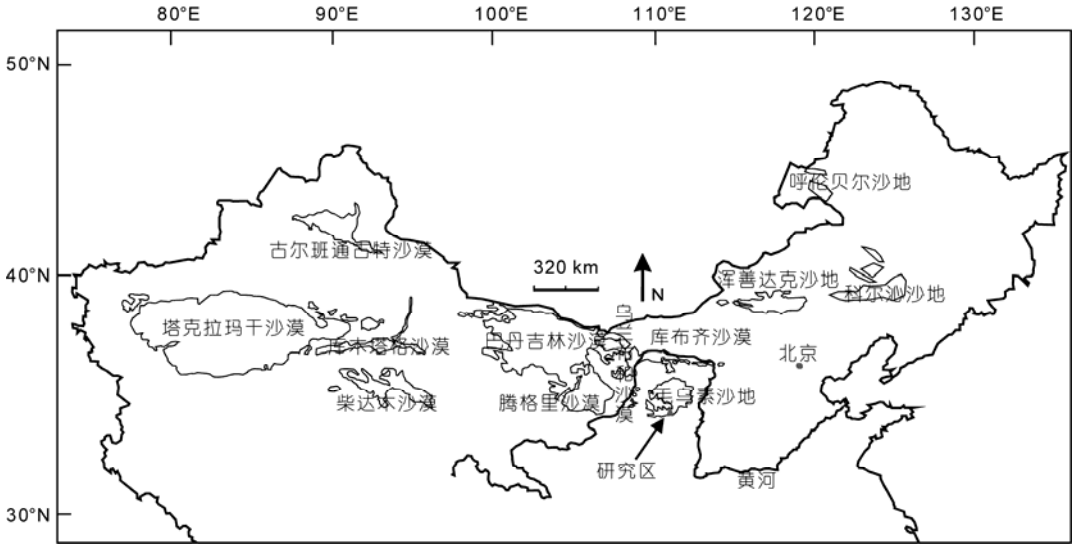


图 1 实验站地理位置图

表 1　生物土壤结皮的基本特征

类型	编号	所处坡面坡度(°)	生物土壤结皮的特征
浅色藻类结皮	LC	26	结皮表面呈浅灰色, 表面较光滑, 厚度 3~5 mm, 抗剪强度约 0.3~0.5 kg cm^{-2}, 主要生物组分为颤藻属(*Oscillatoria* spp.)、鞘丝藻属(*Lyngbya* spp.)
深色藻类结皮	DC	27	结皮表面呈黑褐色, 表面较粗糙, 厚度 5~8 mm, 抗剪强度有所提高, 约 1.0 kg cm^{-2}, 主要生物组分为颤藻属(*Oscillatoria* spp.)、鞘丝藻属(*Lyngbya* spp.), 机械组成中细沙和粉沙等细颗粒含量与浅灰色藻类结皮相比有所增加
苔藓结皮	MC	27	结皮表面长有苔藓植物, 干旱缺水时呈深颜色, 雨后呈鲜绿色, 厚度和抗剪强度显著提高, 分别为 10~12 mm 和 2.1 kg cm^{-2}, 主要苔藓植物为双色真藓(*Bryum dichotomum* Hedw)、真藓(*Bryum argenteum* Hedw), 细颗粒含量与前两者相比进一步增加, 与物理结皮或藻类结皮相比具有很强的抗压能力



图 2　径流收集装置图

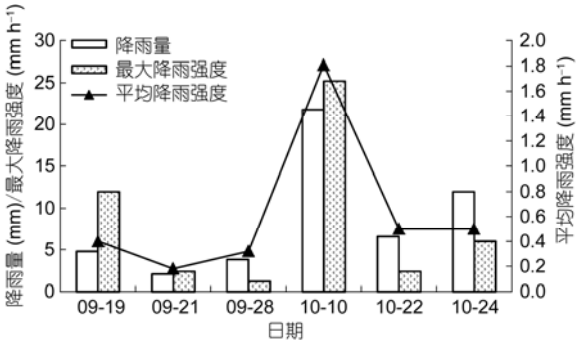


图 3　观测期间研究区降雨特征

2　结果与分析

2.1　降雨特征

实验期间共观测到降雨 6 次, 总降雨量为 51.1 mm(图 3). 次降雨量的最小值为 2.1 mm, 最大值为 21.8 mm; 降雨量大小分别为 4.8, 2.1, 3.8, 21.8, 6.6 和 12 mm. 降雨量级的分布频率为 3~5.9 mm 降雨事件 2 次, 0~2.9, 6~9.9, 10~19.9 和 20~29.9 mm 的降雨事件各 1 次. 各降雨事件的平均降雨强度分别为 0.4, 0.18, 0.32, 1.81, 0.5 和 0.5 mm h^{-1}, 最大降雨强度分别为 12, 2.4, 1.2, 25.2, 2.4 和 6 mm h^{-1}, 出现雨强大于 6 mm h^{-1} 的降雨次数为 3 次, 占总降雨次数的 50%. 最大降雨量、平均降雨强度和最大降雨强度均发生在 10 月 10 日的降雨事件中. 总体来看, 观测期间的降雨特征表现为出现较大降雨事件的次数虽不多, 但较大降雨事件的降雨量在总降雨量中所占的比重较大.

2.2　径流特征

生物土壤结皮表面径流分别发生在 10 月 10 日(p=21.8 mm)和 10 月 24 日(p=12 mm)的降雨事件中(图 4). 不同类型生物土壤结皮表面的径流量有差异. 当次降雨量为 21.8 mm 时, 生物土壤结皮表面的径流量依次为 LC: 1.9±0.5 mm, DC: 3.4±0.6 mm 和 MC: 3.5±0.5 mm. LC 样地径流量与 DC 和 MC 样地径流量之间差异显著(P<0.05), DC 和 MC 样地径流量之间差异不显著(P>0.05). 当次降雨量为 12 mm 时, 生物土壤结皮表面的径流量依次为 LC: 1.1±0.3 mm, DC: 1.1±0.5 mm 和 MC: 1.7±0.6 mm, 不同类型生物土壤结皮表面的径流量之间差异不显著(P>0.05). 不同类型生物土壤结皮表面的径流在次降雨量中所占的百分比不尽相同, 其变化规律与径流量的变化规律趋于一致. 在产生径流的两次降雨事件中, 径流在次降雨量中所占百分比分别为 LC: (8.8±2.4)%, DC: (15.8±2.9)%, MC: (15.9±2.2)%和 LC: (9.2±2.7)%, DC: (9.3±4.3)%, MC: (14.0±5.2)%, 显示不同类型生物土壤结皮对降水的再分配比例不同.

3　讨论

3.1　降雨对径流的影响

在 6 次降雨事件中共收集径流 2 次, 说明不是在每次降雨事件中都能产生径流. 由图 3 和 4 可见, 产

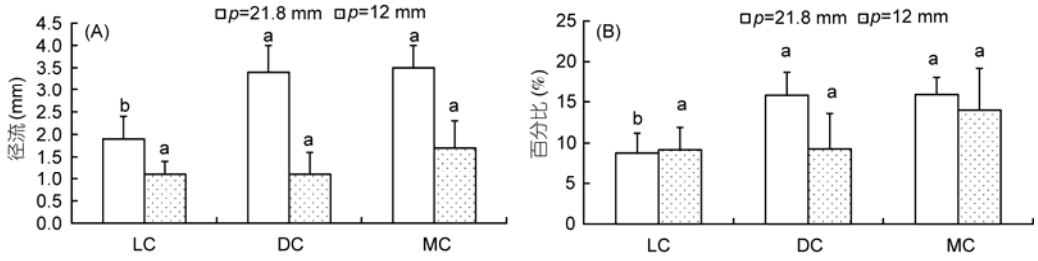


图 4 生物土壤结皮表面径流量(A)和径流在次降雨量中所占的百分比(B)

同一系列不同的小写字母表示差异在 P=0.05 的水平上显著

生径流的 2 次降雨事件的次降雨量均较高, 说明次降雨量的大小是影响生物土壤结皮表面是否产生径流的重要因素. 另外, 产生径流的两次降雨事件的最大降雨强度和平均降雨强度均较大. 虽然 9 月 19 日最大降雨强度(12 mm h^{-1})较高, 大于 10 月 24 日最大降雨强度(6 mm h^{-1}), 但前者未产生径流, 后者却收集到了径流, 说明瞬间降雨强度不是影响结皮表面是否产生径流的唯一因素. Yair[1]在内盖夫沙漠(Negev desert)地区的研究中得出, 生物土壤结皮在干旱缺水时, 即便瞬间降水强度超过 12 mm h^{-1} 也不会产生径流, 而结皮表面相对湿润的时候却能产生径流. 我们的研究也观测到了此类现象. 对平均降雨强度的分析发现, 虽然 9 月 19 日、10 月 22 和 24 日平均降雨强度较接近, 但只在 24 日降雨事件中收集到了径流, 说明 24 日降雨事件中的地表径流与 22 日的降雨事件有关. 虽然 22 日降雨事件中未观测到地表径流现象, 但此次降雨湿润了结皮表面, 为 24 日的径流提供了必要的前提, 使其在接下来的降雨事件中更容易产生径流. 概括起来, 毛乌素沙地南缘沙丘生物土壤结皮不是抗水性的, 在干旱缺水的时候能够吸收大量的水分, 甚至瞬间降雨强度达到 12 mm h^{-1} 时也未观测到径流现象. 当结皮表面湿润或饱和的时候, 在较小的降雨事件(雨强为 6 mm h^{-1})中也能产生径流.

3.2 生物土壤结皮对径流的影响

不同类型生物土壤结皮的径流量差异较大(图 4), 说明沙丘表面径流不仅受降雨特征的影响, 还受结皮自身发育特征的影响. 结皮表面径流量的差异可能与生物土壤结皮生物和非生物组分的差异有关.

(ⅰ) 非生物因子的影响. 不同类型生物土壤结皮的机械组成有差异(表 2). 一方面, 大气环境中的细颗粒物被蓝绿藻的菌丝体、苔藓或地衣的假根或结皮表面的粗糙结构所捕获, 不断增加了结皮层的细颗粒物含量[2]. 另一方面, 生物土壤结皮的发育为荒漠表层土壤原生矿物的风化提供条件, 增加次生矿物成分, 降低土壤粒径, 增加了结皮中的细颗粒物含量[21]. 因此, 发育良好的生物土壤结皮含有更多的细颗粒物.

产生径流的时间和径流量的大小很大程度上取决于土壤的渗透力, 而渗透力受土壤空隙和径流在其中保持时间的影响[22]. 在降雨的时候, 黏附在结皮表面的细颗粒物堵塞结皮的空隙, 降低水分在结皮中的渗透速率或延长水分在结皮层中的保持时间, 阻止水分向深层的入渗, 进而产生径流[22,23]. 电子显微镜结果显示, 结皮表面 1~2 mm 处的空隙明显少于其下层部位的空隙, 降雨时细颗粒物的空隙堵塞作用减少了水分的入渗, 影响了地表径流[24]. 较多的

表 2 不同类型生物土壤结皮的机械组成(%) a)

类型	粗沙 1~0.5 mm	中沙 0.5~0.25 mm	细沙 0.25~0.0625 mm	粗粉沙 0.0625~0.031 mm	中粉沙 0.031~0.0156 mm	细粉沙 0.0156~0.0039 mm	黏土 0.0039~0.0005 mm
BS	0.00	26.92	73.08	0.00	0.00	0.00	0.00
LC	0.00	21.19	73.45	0.62	2.50	1.46	0.79
DC	0.00	17.79	72.19	3.92	3.39	1.89	0.83
MC	0.00	12.64	63.28	12.58	5.45	3.48	2.58

a) BS 代表裸沙

细颗粒物含量使结皮表层的空隙堵塞作用愈加明显，导致了发育良好结皮表面产生更多径流.

(ⅱ) 生物因子的影响. 不同类型生物土壤结皮生物组分的差异可能是影响结皮表面径流量的重要因素. 结皮中的生物体在产生径流过程中扮演着双重作用. 一方面，生物体能够吸收其体积 10 倍甚至更多的水分，吸水之后的生物体发生膨胀，堵塞结皮的空隙结构，影响了水分的入渗[25]. 另一方面，当结皮表面湿润以后，结皮中生物体所分泌的胞外多糖等化学物质遇水膨胀，吸收一定水分的同时，堵塞结皮中的空隙结构[26]. 据 Chenu[27]的报道，微生物体所分泌的胞外多糖等化学物质的含量能够达到其细胞重量的 10%~500%. 结皮中生物体所分泌的大量胞外多糖等化学物质吸水膨胀后堵塞土壤环境中的空隙，降低地表的渗透系数，减少水分入渗，促进径流的产生[24,25,28]. 此外，结皮中的生物体多分布在结皮表面，蓝绿藻的菌丝体作为一个丝状结构与苔藓或地衣相比其堵塞空隙的能力不明显，而后者的生物体较大，能够充分的堵塞结皮中的空隙. 苔藓植物还能够直接吸收水分，或将把水分捕获在其叶状结构上，通过其特殊的叶子结构把水分吸收或传输到其根部[2]. 因此，发育良好的苔藓结皮能够把更多的水分拦截在结皮表面，阻止水分入渗到深层土壤.

综上所述，生物土壤结皮的表面径流受降雨量、降雨强度、结皮表面的水分饱和程度及生物土壤结皮发育的共同影响. 虽然我们的研究是对生物土壤结皮表面径流的初步观测，但已经对生物土壤结皮在半干沙地生态系统有限降水资源的再分配作用有了新的认识，对受损沙地生态系统的合理利用和生态修复过程具有深远的意义.

3.3 生物土壤结皮水分再分配作用的生态学意义

在植物多以斑块状分布的荒漠地区，表面径流是生态系统水分、养分和种子等物质转移和再分配的主要途径[22,23,29,30]. 在强降雨事件中，生物土壤结皮能把次降雨量 8.8%~15.9%的降水资源以地表径流的形式进行重新分配. 加上研究区年降雨量的 80%集中在夏、秋两季，且多以暴雨的形式出现[31]，因此随降雨强度的增加生物土壤结皮对降水资源的再分配比例可能还会增加.

生物土壤结皮在沙丘表面的发育改变了当地水分分布格局，对半干旱沙地生态系统功能和过程产生深远的影响. 首先，生物土壤结皮表面所产生的径流流向沙丘下部区域或其他斑块区域，加大了半干旱沙地生态系统水分的空间异质性，使分布在该区域的生物体得到更多的水分，进而影响该区域种子萌发率、生物多样性及其分布格局[1,29,32]. 其次，生物土壤结皮能够固定大气环境中的 CO_2 和氮[33,34]. 生物土壤结皮所固定的部分养分溶于水中，通过地表径流被重新分配到沙丘下部区域或下一个斑块区域，加大了半干旱沙地生态系统的养分异质性，使分布在该区域的生物体得到更多的养分和水分，进而影响半干旱沙地生态系统的功能和过程[22,35]. 此外，生物土壤结皮在沙丘坡面上的大面积发育为产生径流提供了较大汇水面积，增加了地表在强降雨事件中被侵蚀的可能. 小面积生物土壤结皮在水资源再分配过程中所扮演的重要角色体现在其发育加大了水分和养分的空间异质性上. 因此，暴雨季节对生物土壤结皮进行适当的放牧等人为干扰有益于半干旱沙地生态系统的资源均衡.

致谢 感谢北京师范大学陕西靖边试验站工作人员给予的大力支持.

参考文献

1 Yair A. Effects of biological soil crusts on water redistribution in the Negev Desert, Israel: A case study in longitudinal dunes. In: Belnap J, Lange O L, eds. Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management. Berlin: Springer-Verlag, 2001. 304–314
2 Belnap J. The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles. Hydrol Proc, 2006, 20: 3159–3178
3 Yair A. Runoff generation in a sandy area—The Nizzana sands, Western Negev, Israel. Earth Surf Proc Land, 1990, 15: 597–607
4 Eldridge D J. Cryptogam cover and soil surface condition: Effects on hydrology on a semiarid woodland soil. Arid Soil Res Rehab, 1993, 7: 203–217
5 Kidron G J, Yair A. Rainfall-runoff relationship over encrusted dune surfaces, Nizzana, Western Negev, Israel. Earth Surf Proc Land, 1997, 22: 1169–1184
6 Eldridge D J, Zaady E, Shachak M. Infiltration through three contrasting biological soil crusts in patterned landscapes in the Negev, Israel. Catena, 2000, 40: 323–336

7 Kidron G J, Yair A. Runoff-induced sediment yield over dune slope in the Negev desert 1: Quantity and variability. Earth Surf Proc Land, 2001, 26: 461–471
8 Kidron G J. Runoff-induced sediment yield over dune slope in the Negev desert 2: Texture, carbonate and organic matter. Earth Surf Proc Land, 2001, 26: 583–599
9 Kidron G J. Millimeter-scale microrelief affecting runoff yield over microbiotic crust in the Negev Desert. Catena, 2007, 70: 266–273
10 Yair A. Effects of surface runoff and subsurface flow on the spatial variability of water resources in longitudinal dunes. In: Veste M, ed. Arid Dune Ecosystems—The Nizzana Sands in the Negev Desert. Berlin: Springer press, 2008. 251–269
11 Greene R S B, Tongway D J. The significance of (surface) physical and chemical properties in determining soil surface condition of red earths in rangelands. Aust J Soil Res, 1989, 27: 213–225
12 Perez F L. Microbiotic crusts in the high equatorial Andes and their influence on Paramo soils. Catena, 1997, 31: 173–198
13 Seghieri J, Galle S, Rajot J L, et al. Relationships between soil moisture and growth of herbaceous plants in a natural vegetation mosaic in Niger. J Arid Environ, 1997, 36: 87–101
14 Eldridge D J, Tozer M E, Slangen S. Soil hydrology is independent of microphytic crust cover: Further evidence from a wooded semiarid Australian rangeland. Arid Soil Res Rehab, 1997, 11: 113–126
15 Williams J D, Dobrowolski J P, West N E. Microbiotic crust influence on unsaturated hydraulic conductivity. Arid Soil Res Rehab, 1999, 13: 145–154
16 Li X R, Zhang J G, Wang X P, et al. Study on soil microbiotic crust and its influences on sand fixing vegetation in arid desert region. Acta Bot Sin, 2000, 42: 965–970
17 Li T, Xiao H L, Li X R. Modeling the effects of crust on rain infiltration in vegetated sand dune in arid desert. Arid Land Res Manag, 2001, 15: 41–48
18 Li X R, Wang X P, Li T, et al. Microbiotic soil crust and its effect on vegetation and habitat on artificially stabilized desert dunes in Tengger Desert, North China. Biol Fert Soils, 2002, 35: 147–154
19 Li S Z, Xiao H L, Li X R, et al. Mechanical disturbance of microbiotic crusts affects ecohydrological processes in a region of revegetation-fixed sand dunes. Arid Land Res Manag, 2006, 20: 61–77
20 Wang X P, Li X R, Xiao H L, et al. Effects of surface characteristics on infiltration patterns in an arid shrub desert. Hydrol Proc, 2007, 21: 72–79
21 Chen R Y, Zhang Y M, Li Y, et al. The variation of morphological features and mineralogical components of biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert of Northwestern China. Environ Geol, 2009, 57: 1135–1143
22 Barger N, Herrick J E, Zee J V. Impacts of biological soil crust disturbance and composition on C and N loss from water erosion. Biogeochemistry, 2006, 77: 247–263
23 Shachak M, Lovett G M. Atmospheric deposition to a desert ecosystem and its implications for management. Ecol Appl, 1998, 8: 455–463
24 Eldridge D J, Greene R S B. Assessment of sediment yield by splash erosion on a semi-arid soil with varying cryptogam cover. J Arid Environ, 1994, 26: 221–232
25 Campbell S E. Soil stabilization by prokaryotic desert crust: Implication for Precambrian land biota. Origin life, 1979, 9: 335–348
26 Fishcer 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. Catena, 2010, 80: 47–52
27 Chenu C. Clay or sand polysaccharide associations as models for the interface between micro-organisms and soil: Water related properties and microstructure. Geoderma, 1993, 56: 143–156
28 Kidron G J, Yaalon D H, Vonshak A. Two causes for runoff initiation on microbiotic crusts: Hydrophobicity and pore clogging. Soil Sci, 1999, 164: 18–27
29 Belnap J, Welter J R, Grimm N B, et al. Linkages between microbial and hydrologic processes in arid and semiarid watersheds. Ecology, 2005, 86: 298–307
30 Eldridge D J, Zaady E, Shachak M. Mircophytic crusts, shrub patches and water harvesting in the Negev Desert: The Shikim system. Landsc Ecol, 2002, 17: 587–597
31 杨志鹏, 李小雁, 刘连友, 等. 毛乌素沙地固沙灌木树干茎流特征. 科学通报, 2008, 53: 939–945
32 Eldridge D J, Zaady E, Shachak M. Infiltration through three contrasting biological soil crusts in patterned landscapes in the Negev, Israel. Catena, 2000, 40: 323–336
33 Belnap J. Nitrogen fixation in biological soil crusts from southeast Utah, USA. Biol Fert Soils, 2002, 35: 128–135
34 Housman D C, Powers H H, Belnap J. Carbon and nitrogen fixation differ between successional stages of biological soil crusts in the Colorado Plateau and Chihuahuan Desert. J Arid Environ, 2006, 66: 620–634
35 Li X J, Li X R, Song W M, et al. Effects of crust and shrub patches on runoff, sedimentation, and related nutrient (C, N) redistribution in the desertified steppe zone of the Tengger Desert, Northern China. Geomorphology, 2008, 96: 221–232