

# 毛乌素沙地生物结皮对水分入渗和再分配的影响

熊好琴<sup>1</sup>, 段金跃<sup>2</sup>, 王妍<sup>1</sup>, 张新时<sup>3</sup>

(1. 西南林业大学 环境科学与工程系, 昆明 650224; 2. 昆明冶金高等专科学校 建工学院, 昆明 650033;  
3. 中国科学院 植物研究所 植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093)

**摘要:** 生物结皮的发育影响着干旱半干旱区小尺度土壤水文过程。对两种自然降雨条件下(降雨量为 8.5 mm 和 14.8 mm)的 3 种放牧管理类型(持续放牧地、围栏 5 a 禁牧区、围栏 15 a 禁牧区)有、无生物结皮土壤的降雨入渗速率和再分配规律进行了测定。结果如下: (1) 入渗速率禁牧 5 a 和禁牧 15 a 样地的有结皮土壤的入渗速率极显著低于无生物结皮土壤。持续放牧样地上, 生物结皮发育很差, 其对土壤的入渗速率无显著影响。(2) 入渗深度自然降雨为 8.5 mm 的次日在持续放牧区能入渗到 15~20 cm, 而在禁牧 5 a 和禁牧 15 a 围栏区仅能入渗到 10~15 cm。自然降雨为 14.8 mm 的次日在持续放牧区能入渗到 30~40 cm, 在禁牧 5 a 和禁牧 15 a 围栏区能入渗到 20~25 cm。在无雨条件下, 禁牧 15 a 围栏区 50 cm 以下土壤水分状况较禁牧 5 a 和持续放牧区更差。测定结果表明: 生物结皮的形成降低了水分的入渗速率和自然降雨的下渗深度, 使下渗水分减少, 渗透深度变浅, 由此可见当地高频率(84.6%)的小降雨(< 10 mm)事件只能对浅根系的草本有效, 这将使得草本植物生长旺盛而深根系半灌木油蒿生长不良, 逐渐衰退。

**关键词:** 生物结皮; 入渗; 土壤含水量; 植被演替

中图分类号: S152.7; S154

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)04-0082-06

## Effects of Biological Soil Crust on Water Infiltration and Redistribution in the Mu Us Sandland, Inner Mongolia, Northern China

XIONG Hao-qin<sup>1</sup>, DUAN Jin-yue<sup>2</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>, ZHANG Xin-shi<sup>3</sup>

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;  
2. Faculty of Architectural Engineering, Kunming Metallurgy College, Kunming 650033, China; 3. State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

**Abstract:** In arid and semiarid environments, microbiotic soil crust on the soil surface plays the major role in ecosystem processes, particularly in soil water flows, and therefore, is very important for landscape structure and function. In this paper, we examined three grazing treatments such as continuous year-long livestock grazing (grazing), grazing excluded for 5 years (5-yr enclosure) and grazing excluded for 15 years (15-yr enclosure), the effects of soil crust on water infiltration and redistribution were analyzed. The water infiltration rate for both in 5-yr and 15-yr enclosures is as follows: bare area > soil with microbiotic crust, which showed that the presence of microbiotic soil crust reduced infiltration. The microbiotic soil crust cover had a significant negative influence on the infiltration for rainfall events (< 14.8 mm), restricting the infiltration depth to less than 40 cm and increasing soil moisture content just beneath the soil profile of 40 cm, whereas it was not as strong or clear for larger rainfall events. The high frequencies (84.6%) of small rainfall events (< 10 mm) in the Mu Us Sandland and the inhibition effect on rainfall infiltration caused by the microbiotic soil crust result in the decreased soil moisture in deeper soil layers, which makes deep-rooted subshrub *Artemisia ordosica* decline and facilitates shallow-rooted herbaceous species. These encouraging results imply that grazing exclusion may be efficient to reduce the existing *Artemisia* encroachment and facilitate the recovery toward the potential climax steppe grassland in the Mu Us Sandland.

**Key words:** biological soil crust; infiltration; soil moisture; vegetation succession

收稿日期: 2011-01-13

修回日期: 2011-03-13

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(40435014); 西南林业大学生态学重点学科项目; 西南林业大学重点科研基金项目(111033)

作者简介: 熊好琴(1977-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 生态恢复与重建。E-mail: xionghaoqin@163.com

通信作者: 张新时(1934-), 男, 院士, 博士生导师, 研究方向: 全球生态学。E-mail: xinshiz@yahoo.com

在干旱半干旱沙区,水是植物生长最主要的限制性因子之一。对于我国北方干旱半干旱毛乌素沙地来说,降水是区域水文循环中最重要的水源补给来源。在降水一定的情况下,对降水入渗和水分在植被根际区再分配的研究显得十分重要。而降雨入渗、土壤水分的深层渗透等土壤水文过程都是以土壤表层为介质不断地发生和转化的<sup>[1]</sup>,因而表层土壤在水文循环中起着极其重要的作用。生物结皮(以下简称结皮)作为土壤表面的一个特殊层次,是由苔藓、地钱、蓝绿藻、地衣、真菌和细菌,以及很多景观中常见的非维管束植物成分组成的与表层土壤有着密切关系的复杂集合<sup>[2]</sup>。在全球干旱半干旱地区都有分布,其在土壤物理过程(团聚)、土壤水文(降雨拦截与降雨入渗)、土壤侵蚀(水蚀、风蚀)和土壤生态(养分循环、种子萌发和无脊椎动物生存)等方面起着重要的作用<sup>[2-3]</sup>。结皮潜在影响着干旱半干旱区局部尺度土壤水文过程和循环动态<sup>[4-5]</sup>。因此,受到国内外研究者的广泛关注<sup>[4,6-9]</sup>。但是有关结皮对干旱半干旱区土壤水文过程的影响研究结论不一,其中一个长期以来都具争议性的问题是结皮对降雨入渗的影响<sup>[5,10]</sup>。有相当多的文献报道结皮的存在增加降雨入渗减少径流<sup>[11-14]</sup>;或者减少入渗增加径流<sup>[4,7-8,15-17]</sup>。但是,也有研究表明结皮的存在对降雨入渗和径流没有影响<sup>[18-19]</sup>。

在退化毛乌素沙地围栏禁牧恢复区,结皮大量发育,盖度达到20%~30%,改变了沙质地表的覆盖状况,这种情况很可能引起小尺度土壤水文过程的变化。有关围栏禁牧恢复过程中结皮的形成对土壤水分入渗的影响,不同学者由于试验方法、立地条件及结皮本身组成不同得出的结论存在分歧<sup>[20-22]</sup>,且现有的一些研究也只是对模拟降雨条件下结皮对毛乌素沙地土壤水分状况的影响做了研究<sup>[7]</sup>,这个结果并不能代表自然降雨条件下土壤水分状况。为此本文特别针对两种有代表性的自然降雨条件(降雨量为8.5 mm和14.8 mm)下的3种放牧管理类型(持续放牧地、围栏5 a禁牧区、围栏15 a禁牧区)有无结皮状况的土壤降雨入渗和再分配规律进行研究,以阐明干旱半干旱毛乌素沙地的小尺度土壤水文生态特征,为该区水土保持与植被恢复演替提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究地位于中国科学院植物研究所鄂尔多斯沙地草地生态站(39°29′37″N,110°11′29″E)附近,该站位于内蒙古鄂尔多斯高原毛乌素沙地的东北缘。这里的生态环境十分脆弱和敏感,是我国土地荒漠化最

活跃的地区之一<sup>[23]</sup>。气候属于典型的半干旱气候,年平均降雨量大约360 mm,其中60%~80%集中在植物的生长季6~8月,年平均温度大约6.0~8.5℃,7月均温22℃,1月均温-11℃。全年大约有200 d风速大于5 m/s。海拔在1 200~1 600 m。土壤属于沙栗钙土,大部分区域覆盖着不同深度的沙。

## 2 研究方法

### 2.1 样地选择

(1)持续放牧样地(G)。一直处于自由放牧状态,为典型的以半灌木油蒿为主的退化沙质草场,植被盖度约15%,优势种为油蒿(*Artemisia ordosica* Krasch),高度约30 cm。地表生物结皮主要由蓝绿藻组成,盖度很低,5%左右,只在个别地方有星星点点的分布,厚度0.1~0.2 cm。

(2)围栏禁牧5 a样地(E5)。原为自由放牧的退化沙质草场,2001年开始实行围栏禁牧,至调查时已自然恢复了5 a。植被盖度约50%,优势种也是油蒿,高度约60 cm。地表生物结皮主要由苔藓和地钱组成,盖度约20%,厚度0.5~1 cm。

(3)围栏禁牧15 a样地(E15)。原为自由放牧的退化沙质草场,1991年开始围封,至调查时已自然恢复了15 a。植被盖度约60%,优势种有达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica* (Laxm.) Schindl.)、油蒿、本氏针茅(*Stipa bungeana* Trin.),高度约45 cm。地表生物结皮主要由苔藓和黑色地衣组成,盖度约25%~30%,厚度1~1.5 cm。

### 2.2 土壤渗透性和降雨入渗及再分配测定

(1)土壤入渗速率。采用渗透筒法<sup>[24]</sup>,渗透筒是用塑料管自制的,内径5 cm,总高度15 cm。分别在上述3种放牧管理类型(持续放牧、围栏禁牧5 a和15 a)区域选择15个样地(每种类型5个样地)。在每个样地内各设置3对有结皮和无结皮土壤样点,共45对。用渗透筒采取原状土,取土深度为10 cm(其上5 cm用于盛水),底部用垫有滤纸的金属底筛盖好,带回室内待测。为了便于比较,将测得的入渗速率换算成10℃时的渗透系数( $K_{10}$ )。

(2)降雨量。在3种类型的15个样地各设置3个自制的雨量收集器,漏斗直径20 cm,离地面高度70 cm,雨停后将承水瓶中雨水倒入量筒读数,计算出降水量,再算平均值。

(3)降雨入渗深度和再分配。降雨停止后立即采用挖剖面的方式记录上述3种类型15个样地土壤湿润锋的深度,每个样地取5个剖面。降雨结束后次日,在每个样地选取3个点进行土壤分层取样。用土

钻每隔 10 cm 取一个土样, 取样深度至 120 cm, 装铝盒, 带回室内烘干测定。所取样点均选择梁地和沙丘顶部相对平缓处, 且位于植株间的空隙, 以消除坡度和植被对降雨入渗和再分配的影响。

2.3 数据分析

同一放牧管理类型的有结皮和无结皮土壤间的入渗速率差异的比较采用配对样本 *t* 检验。不同放牧管理类型间有结皮或无结皮土壤间渗透性的比较用 LSD 单因素方差分析。应用 SPSS 13.0 软件对数据进行分析。

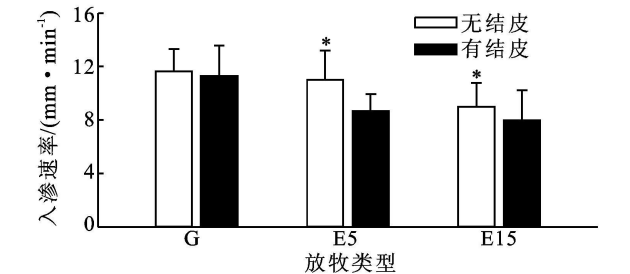
3 结果与分析

3.1 土壤入渗速率

对于禁牧 5 a 围栏区, 其结皮的存在极显著降低土壤入渗速率( $t=18.796, df=14, P<0.001$ ); 对于禁牧 15 a 围栏区, 有结皮的土壤入渗速率同样极显著低于无结皮土壤( $t=11.639, df=14, P<0.001$ ), 这与干旱半干旱环境下很多有关结皮减少水分入渗的研究结果一致<sup>[4, 28-31]</sup>。而该结果与结皮增加降雨入渗或者对入渗没有影响的很多研究结果不一致, 原因可能是因为毛乌素沙地土壤含沙量>80%。Warren 2003 年的研究表明对于含沙量>66% 的沙土, 结皮的存在将降低水分入渗速率<sup>[32]</sup>。而在持续放牧区上, 结皮发育很差, 只在个别地方星星点点分布一些蓝绿藻结皮, 其对土壤的入渗速率没有影响(图 1)。

在 3 种放牧管理类型区域内, 同样是无结皮土壤, 其入渗速率也不相同。禁牧 15 a 的无结皮土壤渗透性(8.99 mm/min) 要显著小于禁牧 5 a(10.99 mm/min) 和持续放牧样地(11.63 mm/min) ( $P=0.006, 0.015$ ); 而禁牧 5 a 和持续放牧样地之间差异

不显著( $P=0.207$ ), 之所以造成这种差异是由于围栏禁牧 15 a 后沙质草地植被盖度增加, 拦截细尘, 持水能力也增强, 因而入渗速率减小。对于 3 种放牧管理类型区域内有结皮土壤则是, 禁牧 15 a(7.97 mm/min) 和禁牧 5 a(8.65 mm/min) 的有结皮土壤渗透性都显著小于持续放牧沙地(11.28 mm/min) ( $P=0.017, 0.015$ ), 但禁牧 15 a 与禁牧 5 a 之间差异不显著( $P=0.473$ )。这可能是因为围栏禁牧后结皮充分发育, 而持续放牧区结皮发育很差。



G: 持续放牧样地; E5: 围栏禁牧 5 a 样地; E15: 围栏禁牧 15 a 样地, 下同。\* 表示差异显著, 配对 *t* 检验

图 1 三种放牧管理类型沙地土壤入渗速率  $K_{10}$

3.2 降雨入渗和再分配

表 1 是观测 2 次不同降雨量/降雨强度情况下降水的入渗深度。从表 1 中可以看出, 雨量为 8.5 mm 的降雨终止时在持续放牧区能入渗到 15–20 cm, 而在禁牧 5 a 和禁牧 15 a 围栏区仅能入渗到 10–15 cm。雨量为 14.8 mm 的降雨终止时在持续放牧区能入渗到 30–40 cm, 在禁牧 5 a 和禁牧 15 a 围栏区能入渗到 20–25 cm。

从表 2 可看出全年有 84.6% 的雨天降雨量小于 10 mm, 其中 69.4% 小于 5 mm。这 84.6% 的小于 10 mm 的降雨量占全年总降雨量的 42.0%。

表 1 三种放牧管理类型在不同降雨量下的降雨入渗深度

降雨量/mm			降雨日期	降雨历时/ (mm·h <sup>-1</sup> )	平均降雨强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	入渗深度/cm		
平均	最小量	最大量				G	E5	E15
8.5	6	11	2006-07-09	1.25	6.65	15~20	10~15	10~15
14.8	13	17	2006-07-25	1.00	14.80	30~40	20~25	20~25

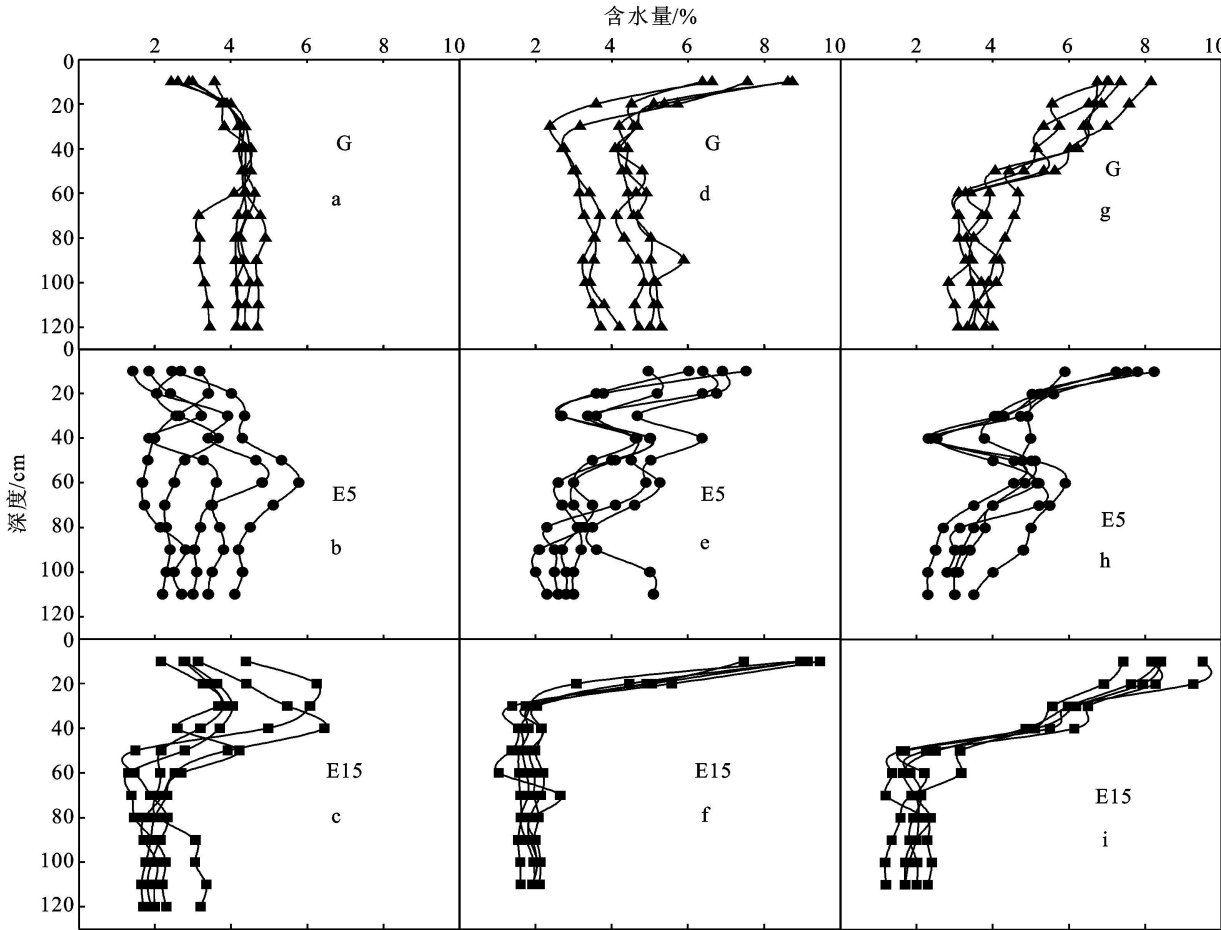
表 2 研究地月均降雨天数统计(1994–2005 年)

降雨量 分级/mm	月 份												总计	百分比/%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
0~1	0.9	1.5	1.9	1.7	1.5	2.8	2.6	3.4	3.4	1.7	0.8	0.9	23.1	
1~5	0.4	1.1	1.2	1.6	2.4	2.2	3.8	3.5	3.0	1.5	0.7	0.6	22.0	84.6
5~10	0	0	0.5	0.4	1.0	1.2	1.6	1.6	2.0	1.0	0.6	0	9.9	
10~20	0	0	0	0.5	0.5	0.6	1.7	1.6	0.5	0.1	0	0	5.5	8.5
20~30	0	0	0	0	0.2	0.3	0.5	0.8	0.1	0	0	0	1.9	2.9
>30	0	0	0	0.1	0.1	0.2	1.3	0.6	0.2	0.1	0	0	2.6	4.0
总计	1.3	2.6	3.6	4.3	5.7	7.3	11.5	11.5	9.2	4.4	2.1	1.5	65	100.0

在毛乌素沙地全年有 84.6% 的日降雨量小于 10 mm, 全年降雨量的 42% 次降雨量小于 10 mm, 且其中 69.4% 小于 5 mm。郭柯等在毛乌素沙地的研究表明, <1 mm 的降雨对流动沙地都没有效果;

< 5 mm 的降雨在固定沙地下渗的深度只有 5 cm 左右, 雨后绝大部分的雨水被蒸发掉, 对固定沙地灌木根系层土壤水分的补充基本没有效果<sup>[25]</sup>。Sala & Lauenroth 的研究表明, 半干旱区小降雨事件 (< 5 mm) 对草本植物有显著的生态作用<sup>[26]</sup>。而姚德良等对沙坡头的研究表明, 小于 8 mm 的降水均属于无效降水, 这部分水只能湿润干沙层, 很快蒸发<sup>[27]</sup>。同时, 李新荣等在沙坡头的研究也表明, 当发生 < 10 mm 的降水事件时, 结皮可以完全将降水截留至结皮和表土层<sup>[28]</sup>。因此, 本研究选择了一个单次降雨为 8.5 mm 的降雨事件来代表降雨量在 5~ 10 mm 范围

时对土壤水分状况的影响。在研究区降雨量为 10~ 20 mm 时的天数占总雨天的 8.5%, 其降雨量占总降雨量的 18.3%, 因此, 在 10~ 20 mm 范围内也选择了一次降雨量为 14.8 mm 的降雨事件来代表 10~ 20 mm 的降雨对土壤水分含量产生的影响。20~ 30 mm 范围的降雨天数只占雨天的 2.9%, 所以未选择此范围进行研究。另外对于 > 30 mm 的降雨事件, 虽然其只占雨天的 4%, 但其降雨量占总降雨量的 30.5%。经观测, > 30 mm 的降雨次日土壤水分的再分配深度都达到了 1 m 以下, 对深根系植物也获得了有效的水分补充, 因此也未对此进行取样。



a, b, c 是降雨量= 0.3 种放牧管理类型沙地土壤水分状况(测前一周无降雨, 2006 年 7 月 21 日测, n= 3)  
d, e, f 是降雨量= 8.5 mm, 3 种放牧管理类型沙地土壤水分再分配状况(测前 10 d 无降雨, 雨后次日测, n= 3)  
g, h, i 是降雨量= 14.8 mm, 3 种放牧管理类型沙地土壤水分再分配状况(测前 10 d 内无 > 4 mm 的降雨, 雨后次日测, n= 3)

图 2 毛乌素沙地三种放牧管理类型沙地土壤水分状况

从图 2 中可以看出, 在无雨条件下(图 2a, b, c), 持续放牧区在 0~ 10 cm 土层含水量较低(2.4%~ 3.6%), 20 cm 以下土壤水分含量较高(3.1%~ 4.9%); 在禁牧 5 a 围栏区 0~ 10 cm 土层含水量较低(1.4%~ 3.2%), 20 cm 以下土层土壤水分含量变化较大(1.6%~ 5.7%); 禁牧 15 a 围栏区 0~ 50 cm 土层土壤含水量较高(2.2%~ 6.5%), 50 cm 以下土层含水量较低(1.3%~ 3.4%)。在降雨量为 8.5 mm

的次日(图 2d, e, f), 降雨再分配深度在持续放牧区达到 30 cm, 而在禁牧 5 a 和禁牧 15 a 沙地仅达到 20 cm。在 14.8 mm 的降雨后次日(图 2g, h, i), 降雨再分配深度在持续放牧区达到 50 cm, 在禁牧 5 a 和禁牧 15 a 沙地分别达到 30 cm 和 40 cm。

通过对降雨前后 3 种放牧管理类型沙地土壤剖面水分状况的研究结果发现, 围栏禁牧 15 a 恢复区 50 cm 以下土层含水量在降雨前后都保持在 2% 左

右,说明小于 14.8 mm 的降雨对 15 a 围栏区 50 cm 以下土层的水分补给基本无效。而对于 5 a 围栏恢复区和持续放牧区 10–120 cm 土层土壤水分状况在降雨前后都比较好,含水量大约在 3%~4%。不过对于降雨前土壤水分条件基本相似以及土壤质地基本相同的持续放牧区和 5 a 恢复区来说,雨后(图 2d, e; 图 2g, h)两者的土壤水分状况还是有所不同。在同样的降雨条件下,5 a 恢复区降雨再分配深度要比持续放牧区的更浅,这其中的原因可能是由于禁牧 5 a 结皮得以发育,在土壤表面覆盖了一层 0.5~1 cm 的以苔藓为主的结皮,其降低了降雨的入渗速率,影响了降雨再分配深度。

## 4 讨论

在 15 a 围栏恢复区由于结皮的发育导致土壤入渗速率的降低,对降雨有拦截作用,再加上在毛乌素地区 84.6% 的天然降雨事件(其单次降雨<10 mm,雨量占总降雨量的 42%)对 15 a 禁牧区土壤水分的补充只能达到 30 cm 以上,这种浅层化趋势,减少了降雨对深层(30 cm 以下)土壤的有效补给。这个研究结果可能是禁牧 15 a 恢复区深根系半灌木油蒿衰退而浅根系草本盛行的原因。退化沙地禁牧后油蒿生长旺盛,5 a 以后油蒿盖度就从 16.2% 迅速增加到 32.9%,而且根系也迅速伸长,油蒿根系主要分布在 20–100 cm<sup>[33]</sup>,在沙丘上有的油蒿根系达到 1.5 m<sup>[8]</sup>,此时土壤水分状况很好(图 2b, e, h),集中在 2%~6%。随着禁牧时间的延长,在禁牧 15 a 恢复区 50 cm 以下土层水分状况相对较差(图 2c, f, i),含水量只有 1.3%~3.4%,在连续无>4.8 mm 的降雨的时候将导致深层沙土产生物理干旱,这将直接影响深根系半灌木油蒿对水分的吸收和利用,使油蒿吸收的水分相对减少,造成在禁牧 15 a 围栏区油蒿生长不良,逐渐衰退。而另一方面,结皮的形成延缓了水分的下渗深度,使下渗水分减少,渗透深度变浅,再加上高频率(69.4%)的小降雨事件(<5 mm)只对浅根系的草本有效,使得草本植物在禁牧 15 a 沙地上迅速增加蔓延。由此可以看出,经过长时间(15 a)的围栏禁牧促使毛乌素沙地土壤结皮充分发育,而结皮的发育又影响到土壤水分的入渗和再分配,最终影响到毛乌素沙地植被的演替,即深根系半灌木油蒿慢慢衰退而浅根系草本开始盛行。

参考文献:

[1] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 77–131.

- [2] Eldridge D, Greene R. Microbiotic soil crusts: a review of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia[J]. Australian Journal of Soil Research, 1994, 32(3): 389–415.
- [3] 李新荣, 贾玉奎, 龙利群, 等. 干旱半干旱地区土壤微生物结皮的生态学意义及若干研究进展[J]. 中国沙漠, 2001, 21(1): 4–11.
- [4] Eldridge D J, Zaady E, Shachak M. Infiltration through three contrasting biological soil crusts in patterned landscapes in the Negev, Israel[J]. Catena, 2000, 40(3): 323–336.
- [5] Belnap J. The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles[J]. Hydrological Processes, 2006, 20: 3159–3178.
- [6] 李守中, 肖洪浪, 罗芳, 等. 沙坡头植被固沙区生物结皮对土壤水文过程的调控作用[J]. 中国沙漠, 2005, 25(2): 228–233.
- [7] 吕盼忠, 杨佩国. 荒漠结皮对土壤水分状况的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(2): 76–79.
- [8] Wang X P, Li X R, Xiao H L, et al. Effects of surface characteristics on infiltration patterns in an and shrub desert [J]. Hydrological Processes, 2007, 21(1): 72–79.
- [9] Liu L C, Li S Z, Duan Z H, et al. Effects of microbiotic crusts on dew deposition in the restored vegetation area at Shapotou, northwest China [J]. Journal of Hydrology, 2006, 328(1/2): 331–337.
- [10] 李守中, 肖洪浪, 李新荣, 等. 干旱、半干旱地区微生物结皮土壤水文学的研究进展[J]. 中国沙漠, 2004, 24(4): 500–506.
- [11] Blackburn W H. Factors influencing infiltration and sediment production of semiarid rangelands in Nevada [J]. Water Resources Research, 1975, 11(6): 929–937.
- [12] Brotherson J D, Rushforth S R. Influence of cryptogamic crusts on moisture relationships of soils in Navajo National Monument, Arizona [J]. Great Basin Naturalist, 1983, 43(1): 73–78.
- [13] Eldridge D J. Cryptogam cover and soil surface condition: Effects on hydrology on a semiarid woodland soil [J]. Arid Land Research and Management, 1993, 7(3): 203–217.
- [14] George D B, Roundy B A, Clair L L S, et al. The effects of microbiotic soil crusts on soil water loss [J]. Arid Land Research and Management, 2003, 17(2): 113–125.
- [15] 李守中, 肖洪浪, 宋耀选, 等. 腾格里沙漠人工固沙植被区生物土壤结皮对降水的拦截作用[J]. 中国沙漠, 2002, 22(6): 612–616.
- [16] Kidron G J, Yair A. Rainfall-runoff relationship over encrusted dune surfaces, Nizzana, Western Negev, Israel [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1997,

- 22(12): 1169-1184.
- [17] 赵允格, 许明祥, 王全九, 等. 黄土丘陵区退耕地生物结皮对土壤理化性状的影响[J]. 自然资源学报, 2006, 21(3): 441-448.
- [18] Eldridge D J, Tozer M E, Slangen S. Soil hydrology is independent of microphytic crust cover: further evidence from a wooded semiarid Australian rangeland[J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 1997, 11(2): 113-126.
- [19] Williams J D, Dobrowolski J P, West N E. Microbiotic crust influence on unsaturated hydraulic conductivity[J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 1999, 13(2): 145-154.
- [20] 杨秀莲, 张克斌, 曹永翔. 封育草地土壤生物结皮对水分入参与植物多样性的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 853-856.
- [21] 张克斌, 卢晓杰, 李瑞. 北方农牧交错带沙地生物结皮研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(4): 147-151.
- [22] 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饱和导水率的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 35-40.
- [23] 张新时. 毛乌素沙地的生态背景及其草地建设的原则与优化模式[J]. 植物生态学报, 1994, 18(1): 1-16.
- [24] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [25] 郭柯, 董学军, 刘志茂. 毛乌素沙地沙丘土壤含水量特点: 兼论老固定沙地上油蒿衰退原因[J]. 植物生态学报, 2000, 24(3): 275-279.
- [26] Sala O E, Lauenroth W K. Small rainfall events: an ecological role in semiarid regions[J]. Oecologia, 1982, 53(3): 301-304.
- [27] 姚德良, 李家春, 杜岳, 等. 沙坡头人工植被区陆气耦合模式及生物结皮与植被演变的机理研究[J]. 生态学报, 2002, 22(4): 452-460.
- [28] 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[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 35(3): 147-154.
- [29] Li T, Xiao H L, Li X R. Modeling the effects of crust on rain infiltration in vegetated sand dunes in arid desert[J]. Arid Land Research and Management, 2001, 15(1): 41-48.
- [30] Li S Z, Xiao H L, Cheng G D, et al. Mechanical disturbance of microbiotic crusts affects ecohydrological processes in a region of revegetation-fixed sand dunes[J]. Arid Land Research and Management, 2006, 20(1): 61-77.
- [31] Wang X P, Li X R, Xiao H L, et al. Effects of surface characteristics on infiltration patterns in an arid shrub desert[J]. Hydrological Processes, 2007, 21(1): 72-79.
- [32] Warren S D. Synopsis: influence of biological soil crusts on arid land hydrology and soil stability, in Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 349-360.
- [33] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 等. 沙漠化的生物过程及退化植被的恢复机理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

(上接第81页)

#### 参考文献:

- [1] Gibbs J P. Wetland loss and biodiversity conservation[J]. Conservation Biology, 2000, 14: 314-317.
- [2] Boyer T, Polasky S. Valuing urban wetlands: A review of non-market valuation studies[J]. Wetlands, 2004, 24: 744-745.
- [3] 李春艳, 赵美鑫, 朱宏杰, 等. 哈尔滨松北城市湿地的生态系统服务功能和保护研究[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(S2): 243-247.
- [4] Faulkner S. Urbanization impacts on the structure and function of forested wetlands[J]. Urban Ecosystems, 2004, 7: 89-106.
- [5] 张明亮, 史同广, 王海霞. 近20年来开封湿地景观动态与保护对策[J]. 水土保持研究, 2007, 14(1): 198-201.
- [6] 郑小康, 李春晖, 黄国和, 等. 流域城市化对湿地生态系统的影响研究进展[J]. 湿地科学, 2008, 6(1): 87-95.
- [7] 顾丽, 王新杰, 龚直文, 等. 基于RS与GIS的北京近30年湿地景观格局变化分析[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(4): 65-71.
- [8] 黎聪, 李晓文, 郑钰, 等. 衡水湖国家级自然保护区湿地景观格局演变分析[J]. 资源科学, 2008, 30(10): 1571-1577.
- [9] 肖锐, 王学雷, 杨小琴, 等. 基于TM影像的湿地格局变化空间分析: 以洪湖市为例[J]. 华中师范大学学报, 2008, 42(2): 295-298.
- [10] 郑忠明, 李华, 周志翔, 等. 城市化背景下近30年武汉市湿地的景观变化[J]. 生态学杂志, 2009, 28(8): 1619-1623.
- [11] 汪一鸣. 宁夏平原湿地保护、利用的经验教训[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(6): 47-57.
- [12] 马建林, 何彤慧. 银川平原湿地的初步研究[J]. 宁夏大学学报: 自然科学版, 2002, 23(4): 377-380.
- [13] 国家林业局, 《湿地公约》履约办公室. 湿地公约履约指南[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [14] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [15] 刘颂, 李倩, 郭菲菲. 景观格局定量分析方法及其应用进展[J]. 东北农业大学学报, 2009, 40(12): 114-119.