

流沙固定过程中土壤-植被系统演变 对水环境的影响*

肖洪浪 李新荣 段争虎 李涛 李守忠
(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙坡头沙漠研究试验站,兰州 730000)

摘要 横穿腾格里沙漠的防风固沙体系始建于1956年,确保了包兰铁路近半个世纪的畅通无阻。在几十年的土壤-植被系统演变中,花棒+柠条+油蒿-干旱砂质新成土的人工系统演变为油蒿+雾冰藜+小画眉草-筒育正常干旱土的半天然、天然系统;生物结皮发育、结皮层形成改变了降水的再分配过程;在20~500 cm深度的干旱层因灌木的排水作用而形成,低等植物也开始与草本和灌木竞争水分,深根系的灌木很难得到降水的补给,逐渐退出了防护体系;土壤-植被系统趋于更薄的活动层。水环境的这些变化正影响着整个防护体系的结构和功能。

关键词 土壤-植被系统,水环境,生物结皮,干旱层,流沙固定
中图分类号 S152.75

研究区位于腾格里沙漠东南缘,104°57' E, 37°27' N,海拔1310~1350 m。年均气温9.6℃,年均降水量186.2 mm。该区是黄土高原与阿拉善高原、荒漠草原与草原化荒漠的过渡带。固沙前格状流动沙丘相对高度7~20 m,以3~4 m a⁻¹的速度向东南方向前移。人工植被分区分批于50、60、70和80年代建植,覆盖度维持在20%~40%。然而,土壤-植被系统的演变中,由于水环境的日益恶化,灌木的覆盖度从20%以上降低到6%,草本和生物结皮所占面积比增大,防护体系的结构、功能和效益正在发生变化。区内土壤、植被等相关研究开始于60年代,70年代末以来在土壤水分、植被动态、地貌形态、风沙物理等专业领域进行了较为深入的研究^[1]。80年代中以后,土壤-植被-大气连续体(SPAC)的水分平衡成为防护体系稳定性研究的核心问题^[2~4],群落演变动力机制等得到研究^[5,6]。本文的目的是剖析土壤-植被系统演变导致的水分分配格局和过程的变化对系统水环境产生的重要影响。

1 研究方法

野外调研分别在1956、1964、1972、1981和1987年建植的无灌溉人工植被区进行。植被监测样方位于各年代的迎风坡中下部,相同年代3个重复,样方大小10 m×10 m为灌木调查,大样方内设3个1 m×1 m的小样方为草本调查。每月调查物种数量、生长量、高度、冠幅和覆盖度等。

土壤水分的监测于每月的5日、15日和25日在各年代固沙区选4个沙丘,对应于植被样方分别在 各沙丘迎风坡、背风坡和丘间地用土钻在0~1、1~5、5~10、10~15、15~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120、120~160、160~200、200~240、240~280、280~320、320~360、360~400、400~450、450~500 cm的深度取样,每样3个重复,烘干法测定土壤含水量。养分样取于1998年不同固沙年代的植被监测样方内,分别按生物结皮和发生层次0~5、5~10、10~30、30~50、50~70、70~100 cm层取样至1 m深度。所有土壤、植物样品的理化分析由中国科学院寒区旱区环境与工程研究所分析测试中心完成。

降雨入渗实验分别设在50、60、80年代建植的人工植被区沙丘的迎风坡,样方为2 m×2 m大小。人工模拟降水采用多喷头洒水器从1 m高度处均匀喷水,降水强度控制在20~30 mm h⁻¹之间,地表无积水

* 国家十五攻关计划(2002BA517A11)、中国科学院重要方向项目(KZCX3-SW-324)、国家自然科学基金项目(49890330)资助

收稿日期:2002-07-01;收到修改稿日期:2002-12-09

和产流现象。每次降水5 mm, 逐渐增至60 mm。每次降水过后30 min采用剖面法取样, 从结皮层到湿润锋以下5 cm处, 每5 cm间隔取6个重复样, 烘干法测定土壤含水量。

2 结果与讨论

2.1 流沙固定过程中土壤-植被系统演变

流沙固定后植物群落从最初的花棒(*Hedysarum scoparium*) + 柠条(*Caragana korshinskii*) + 油蒿(*Artemisia Ordosica*) 人工灌木群落向油蒿+ 雾冰藜(*Bassia dasyphylla*) + 小画眉草(*Eragrostis poaeoides*) 的天然群落的演变, 深根系的群落逐渐为浅根系群落所取代, 草本倾向于淘汰灌木, 低等植物的水分竞争又威胁着草本植物的水资源保障。流沙固定后干旱砂质新成土趋向于一种区域性的土壤类型——筒育正常干旱土, 在结皮层深厚的背风坡已见碳酸钙的白色沉积。土壤-植被系统怎样朝向地带性的景观演变尚需进一步的监测。

土壤-植被系统演变过程中, 微生物、土壤养分等亦在不断的发展和积累。裸露的流沙上已经有微生物存在, 参与微弱的有机质积累过程。植被建立后一个稳定的环境形成, 大气过程(如降尘、降雨等)所携带的养分得以保存下来; 植被系统每年提供枯枝落叶量逐渐达到 $35 \sim 44 \text{ g m}^{-2}$ 。植被固沙区结皮层(0~6 cm)每kg干土微生物个数达到 8.80×10^6 , 近70%由细菌组成; 同深度的流沙仅 0.38×10^6 , 且98%为放线菌。反映出从流沙到结皮微生物群系得到较快发展(表1), 生物过程增强, 土壤有机质积累明显, 在39年固沙地迎风坡结皮层有机质 9.20 g kg^{-1} , 高出同厚度流沙 0.86 g kg^{-1} 的10多倍^[7](表2)。值得关注的是结皮层微生物和养分富集也强化了水分的表聚作用, 加剧了生物系统浅层化, 这种水分、养分、土壤和植被的表层化过程影响着整个防护体系的结构和功能。

表1 不同土壤中微生物数量

Table 1 Microbe amount in different soils ($\times 10^6 \text{ kg}^{-1}$)

土壤类型 Soil type	土层深度 Depth (cm)	细菌 Microbes	真菌 Fungi	放线菌 Actinomyces	总数 Total	土壤有机质 O. M. (g kg^{-1})
固定风沙土	0~1	6196.10	10.18	20.10	6226.38	11.73
	1~6	2537.48	5.43	22.79	2565.70	4.77
	6~16	63.11	1.54	6.70	71.35	1.13
流动风沙土	0~1.2	23.40	0.40	50.43	74.23	0.70
	1.2~6	95.23	0.60	214.75	310.58	0.72
	6~16	261.65	0.50	40.16	302.31	0.66

表2 流沙固定过程中土壤表层(0~10 cm)养分的变化

Table 2 Nutrient content in soil surface layer in process of shifting sand fixation

植被 Vegetation	固沙时间 Time (a)	沙丘部位 Dune position	有机质 O. M.	全养分 Total nutrient (g kg^{-1})			有效养分 Available nutrient (mg kg^{-1})		
			(g kg^{-1})	N	P	K	N	P	K
人工	0(流沙)	混合样	0.86	0.06	0.13	15.50	7.05	3.08	95.45
	14	背风坡	2.48	0.20	0.20	20.92	34.11	3.30	207.50
	30	背风坡	4.33	0.16	0.27	20.92	14.58	3.91	149.40
	39	背风坡	8.14	0.31	0.34	20.92	25.40	8.91	199.20
	39	丘间地	11.07	0.32	0.33	20.92	34.97	10.61	157.70
	39	迎风坡	9.20	0.26	0.29	20.92	29.48	6.56	224.10
	26	迎风坡	5.36	0.23	0.25	16.93	3.29	4.81	140.27
天然		迎风坡	4.20	0.30	0.29	18.12	22.30	4.43	189.24

腾格里沙漠中零星的灌木覆盖度仅在 1% 以下。50 年代中期开始, 先后引种了数十种耐旱、抗风沙的灌木和半灌木品种建立防护体系^[1, 8]。植被变化可分为三个阶段, 并随降水量的变化有 7~ 8 年的波动期: 人工植被建立后的前 15 年, 灌木层片有较快地发展, 植被覆盖度在 15%~ 25%, 以灌木为主; 固沙后的 6~ 10 年便有天然物种的侵入和定居。在 15~ 32 年期间, 覆盖度 30% 左右, 草本覆盖度逐渐超过灌木覆盖度; 25 年以后天然侵入的物种增至 10 种左右, 其后再无明显的变化。32 年以后, 群落覆盖度逐渐增加到 35% 以上, 灌木覆盖度降低到 6%~ 9%, 并呈暂时稳定; 草本覆盖度保持在灌木的 3~ 5 倍以上, 以灌木为主的人工植被已被草本为主的天然植被所取代(图 1)。灌木仅有油蒿能够天然更新, 在流沙固定后的第 9 年侵入并定居。灌木和草本植物的这一相对变化过程可以认为是水分竞争和水环境适应的结果。

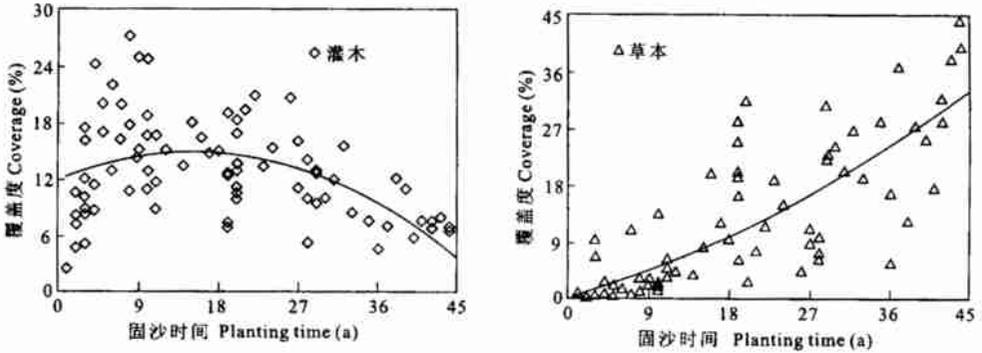


图 1 灌木和草本植物覆盖度随固沙年限的变化

Fig. 1 The change of coverage of shrubs and grasses with dune stabilization

2.2 土壤剖面发育导致的水分分配过程变化

在沙漠黄土的过渡地带具有较大的粉尘沉积速率, 粉尘的不断积累对土壤质地和剖面分化产生重大影响。按 1991~ 1998 年研究区年均粉尘沉积速率 $4\ 866\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 计算^[9], 粉尘年沉积厚度约 0.3~ 0.4 mm, 按粉尘占结皮层机械组成的 20%~ 30% 计算, 可形成结皮 1~ 2 mm (成土厚度)。以粉砂或者以粉砂和细沙的互层组成的结皮层逐渐形成。表土机械组成随固沙时间的增加而明显变细(表 3), 土体构型发生了明显的改变。

表 3 固定沙丘迎风坡土壤结皮层质地随固沙时间的变化

Table 3 Change of the soil texture of crust layers with time of dune stabilization on the windward slopes

人工植被年限 Years of artificial vegetation (a)	粒径 Particle size (%)		
	粘土 Clay (< 0.002 mm)	粉砂 Silt (0.002~ 0.05 mm)	砂粒 Sand (0.05~ 0.5 mm)
0 (流沙)	0.86	0.10	99.04
10	4.45	15.68	79.87
24	4.87	23.59	71.54
35	6.93	24.79	68.28
40	11.00	22.60	66.40

正是这种变化导致了土壤水分保持能力和入渗、再分配过程的变化, 改变了土壤- 植被系统的水环境。从流沙发育成结皮, 持水能力提高, 土壤有效水分从 5.51% 增加到 21.96% (表 4)。流沙条件下渗透 10 cm 的沙层, 需要 6.5 mm 降水, 而要渗透相同厚度的结皮层至少需要 26 mm 降水, 这样强度的降水每年仅有 0.4 d, 占年降水量的 6.6%。流沙固定后 25~ 30 年即可形成 6~ 8 cm 厚的结皮层, 80% 以上的降水集中在结皮层中耗于土壤蒸发、浅根系植物和低等植物的蒸腾, 多数的降水很难补给到结皮层以下的

表4 流沙与结皮层土壤物理性质对比^[7]

Table 4 Comparison of soil physical properties between shifting sand and crust

土壤类型 Soil type	最大吸湿水(v/v, %) Max. hygroscopic moisture	凋萎湿度(v/v, %) Wilting coefficient	毛管吸附水 (v/v, %) Capillary adsorbed water	孔隙率(%) Porosity	容重(g cm ⁻³) Bulk density	比重(g cm ⁻³) Specific gravity
流沙	0.73	0.99	6.50	40.07	1.62	2.70
结皮层	2.20	4.12	26.08	45.10	1.36	2.47

层次,以供根系较深的灌木利用。即使每年有一次40 mm左右的降雨,其补给到50 cm深度以下土层的水分也仅几毫米(图2)。土壤发育过程实质上是水分浅层化的再分配过程。

结皮层是流沙固定后风尘季节交替、并叠加了生物成土过程的沙、尘和生物沉积的互层。随着结皮层厚度增加,底层的生物特征逐渐减弱,表层的生物过程不断增强。因而,又将微生物和低等植物富集程度较高的表层称为生物结皮。生物结皮因低等植物种类的不同其厚度变化于几毫米到几十毫米,除了无机部分外,微生物、藓、藻类、苔藓、地衣等是其主要成分。由于生物结皮的有机物、生物胶等的含量高,较之整个结皮层,它具有较好的持水性,通常3~5 mm的降水才可能渗透1 mm的生物结皮;对3~5 mm厚的生物结皮而言,10~20 mm以下的降水基本上被生物结皮所拦截;为此,一些研究将5~6 mm以下的降水称为无效降水^[8,10]。许多低等植物只需几毫米的降水便可从休眠状态中恢复生长,低等植物与草本之间的水分竞争也就形成。随着低等植物的发展,生物结皮的厚度不断增加,与此同时灌木和草本植物的覆盖度却不断减少(图3),这也类似于草本植物与灌木之间水分竞争的结果。然而,生物结皮中众多的低等植物无疑提高了土壤-植被系统的降水利用率。

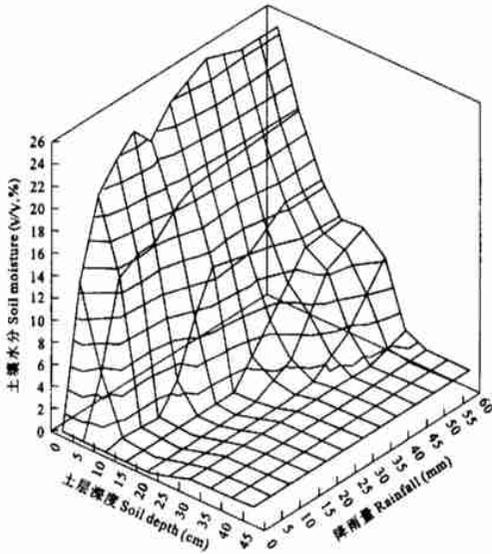


图2 35年固沙区不同降雨强度的入渗过程

Fig. 2 Infiltration of various precipitation intensities in dunes stabilized for 35 years

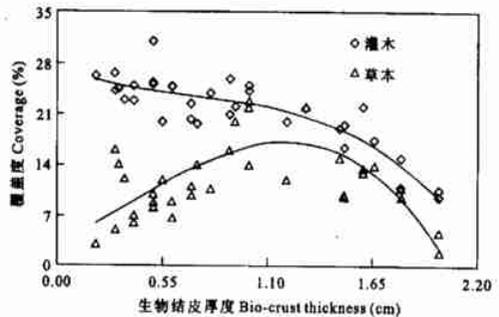


图3 生物结皮厚度与植被覆盖度的关系

Fig. 3 Relationship between bio-crust thickness and plant coverage

2.3 植被的排水作用与土壤干旱层的形成

人工固沙植物均为灌木,其根系在植后的10年便在20~100 cm的沙层中迅速扩展,并可达到200 cm以下深度,耗净土壤前期储存的水分;固沙10年之后结皮层发展到3~10 cm厚度,拦截了50%以上的降水对深层土壤的补给,干旱土层首先在20~200 cm的深度形成。根系追溯可利用的土壤水,使得干旱层

向 5 m 以下扩展。深根系的灌木为此而逐渐退出防护体系, 仅有根系较浅的半灌木——油蒿得以生存下来。草本和低等植物的发展更加剧了干旱层的发展。

生物防护体系建立前土壤- 植被系统的水分平衡主要是降水补给和土壤蒸发。年降水量的 60% ~ 70% 消耗于土壤蒸发, 干旱年份可达年降水量的 90%^[11], 20% ~ 30% 的降水可补给土壤水分, 因此 2~3 m 以下土壤含水量通常接近田间持水量。植被建立 10 年后, 土壤蒸发并无减小, 但植物蒸腾却要消耗年降水量的 20% ~ 40%。土壤水分逐年亏缺, 干旱年份入不敷出, 土壤- 植被系统的水环境存在于新的循环模式中。

流沙固定后土壤水分经历着逐渐衰竭的过程。流沙的持水能力比较低, 降水容易入渗到较深的土层, 以致深层流沙能保持较高的水分含量, 2 m 以下土壤水分接近田间持水量。固沙 16 年后的人工植被区, 在灌木根系集中的 1~ 3 m 深度, 因土壤水分被植物利用, 降水难以补给到该土层, 以致逐渐干旱化; 但因结皮尚不深厚, 0~ 1 m 土层仍有部分降水补给。固沙 34 年后, 生物成因的干旱层已在 20 cm 深度以下形成, 土壤水分含量已接近凋萎湿度。固沙 42 年之后土层中有效水分甚微, 10 cm 深度处相对较高的含水量实际上是流沙和结皮层之间质地不同的结果(图 4)。

3 结 论

流沙固定过程中土壤- 植被系统向地带性方向演替, 水分和养分的表聚导致了生物系统浅层化的过程。土壤剖面分化、结皮层形成和土体构型的改变导致的土壤水分保持能力和入渗、再分配过程的变化形成了土壤- 植被系统全新的水环境。因生物结皮有较好持水性, 10~ 20 mm 以下的降水基本上被生物结皮所拦截, 形成了低等植物与草本之间的水分竞争。灌木和草本植物对土壤深层水的利用在 20~ 500 cm 的深度形成了干旱层, 草本和低等植物的发展更加剧了干旱层的发展。土壤- 植被系统的水平衡在新的模式下运行。也正是这个新的水平衡制约着土壤- 植被系统的演变方向。

从可持续的防护体系建设着眼, 有必要通过调控土壤- 植被系统逐渐形成相对稳定的水环境。首先应该考虑合理的灌木、草本低等植物的密度、结构和配置, 以保证相对稳定的耗水量; 其次是通过微耕和轻牧等有比例地破坏土壤结皮、生物结皮的结构, 改变降水的分配过程; 最后, 需要对新形成的防护体系模式做风沙物理学评估。

参考文献

1. 兰州沙漠研究所沙坡头沙漠科学研究所. 包兰铁路沙坡头段流沙固定原理与措施. 银川: 宁夏人民出版社, 1991
2. Xiao H L, Fan H W, Zhao Y H. Analysis of ecological approach for stabilizing shifting sand in Shapotou district of Baotou-Lanzhou railway. In: Traditional Knowledge and Practical Techniques for Combating Desertification in China, the Secretariat of CCICCD and the Secretariat of CCD, ESCAP. Beijing: China Environmental Science Press, 1999. 126~ 132
3. Li T, Xiao H L, Li X R. Modelling the effects of crust on rain infiltration in vegetated sand dunes in arid desert. Arid Land Research and Management, 2001, 15: 41~ 48
4. 张继贤, 邱醒民, 王淑湘. 沙坡头地区防护体系建立过程中区域生态环境的变化特点. 中国科学院沙坡头沙漠试验研究站年报(1991~ 1992). 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993. 128~ 138
5. 石庆辉, 刘家琼. 沙坡头铁路两侧人工植被区天然植被动态. 沙漠生态系统研究, 第一集. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1995. 105~ 115
6. 李新荣, 张景光, 刘立朝, 等. 我国干旱沙漠地区人工植被与环境演变过程中植物多样性的研究. 植物生态学

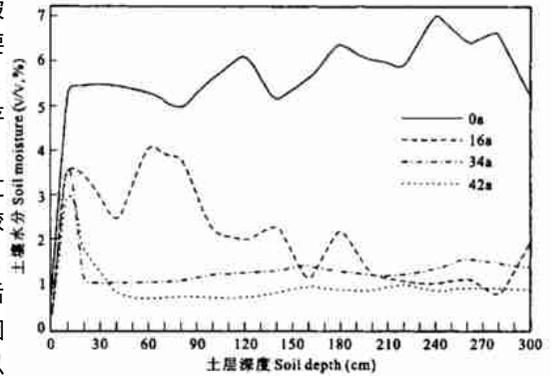


图 4 不同年代固沙区 1998 年 7~ 10 月土壤水分平均含量
Fig. 4 Average soil moistures from July to October 1998 at various dunes stabilized in different years

- 报, 2000, 24(3): 257~ 261
7. 肖洪浪, 张继贤, 李金贵. 腾格里沙漠东南缘流沙固定过程中土壤肥力演变. 中国沙漠, 1996, 16(Supp. 1): 64~ 69
 8. 赵兴梁. 沙坡头地区植物固沙问题的探讨. 流沙治理研究(二). 银川: 宁夏人民出版社, 1991. 27~ 57
 9. 肖洪浪, 张继贤, 李金贵. 腾格里沙漠东南缘降尘粒度特征与沉积速率. 中国沙漠, 1997, 17(2): 127~ 132
 10. 陈文瑞. 沙坡头地段铁路两侧 29 年人工植被区的水量平衡. 流沙治理研究(二). 银川: 宁夏人民出版社, 1991. 66~ 75
 11. 冯金朝, 刘立超, 李金贵, 等. 腾格里沙漠东南缘沙地凝结水的形成特点及其生态环境意义. 中国沙漠, 1996, 16(Supp. 1): 70~ 75

IMPACT OF EVOLUTION OF PLANT-SOIL SYSTEM ON THE WATER ENVIRONMENT DURING THE MOBILE DUNES STABILIZATION

Xiao Hong-lang Li Xin-rong Duan Zheng-hu Li Tao Li Shou-zhong
 (Shapotou Desert Research and Experiment Station, Cold and Arid Regions Environmental
 and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Summary

The system of wind defense and sand dune stabilization, which crossed the Tengger desert and was began to construct in 1956, has insured the Baotou-Lanzhou railway straightway for almost half century. During succession of soil-plant system for decades, a artificial system of *Hedysarum scoparium* + *Caragana korshinskii* + *Artemisia Ordosica* - Ar¹ Sandic Entisols has developed into a semi-natural and natural system of *Artemisia Ordosica* + *Bassia dasyphylla* + *Eragrostis poaeoides* - Hap²-Orthic Aridisols. Development of bio-crust and crust horizon changed redistribution of precipitation. A drought horizon formed in 20~ 500 cm depth because of shrub transpiration. Low plants began to compete water with grasses and shrubs. Shrubs with deep roots obtained hardly rainfall supply and dropped out protection system gradually. Soil-plant system went to a thinner active horizon. All of the changes were affecting the structure and function of the whole protection system.

Key words Plant-soil system, Water environment, Bio-crust, Drought layer, Shifting-sand fixation