

敦煌莫高窟崖顶灌木林带防风固沙效应

汪万福^{1,2}, 王涛¹, 李最雄², 张伟民¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000; 2. 敦煌研究院保护研究所, 敦煌 736200)

摘要:敦煌莫高窟的风沙防治必须要建立一个完整的防护体系, 灌木林带的建立是这一综合防护体系中不可缺少的重要组成部分。通过对已建立的两条灌木林带防护效应的观测分析, 结果表明: 灌木林带使其周围的气流场重新分布, 改变了近地表风沙流结构, 0.5、2m 高处的风速梯度发生显著变化。在林带高20~30倍的有效防护范围内风速降低68.1%~40.7%, 两条林带后2m处的输沙率分别是林带前缘30m对照处的1/38和1/138, 3a时间灌木林带内积沙厚度达0.7m。沙地浅层(0~20cm)细沙(0.25~0.1mm)和微沙(0.1~0.05mm)含量分别增加了20.6%、5.5%, 有机质含量在植物根系分布范围内成倍增加。灌木带对区域小气候的改善效应明显。流沙地0.5、1和1.5m高处日平均气温比灌木带内分别高出0.5、0.9和0.2℃, 而相对湿度灌木林带内比流沙地平均高0.4、0.3和0.1%。浅层土壤(0~20cm)温度昼夜变程与地表温度变化基本呈正弦态分布, 并以垂直方向向下传递, 但变幅较地表为小。灌木林带内0~20cm土壤平均温度比流沙地高0.7℃。

关键词:敦煌莫高窟; 灌木林带; 防风固沙; 效应分析

The effects of blown sand on the shrub belt over the top of the Mogao Grottoes

WANG Wan-Fu^{1,2}, WANG Tao¹, LI Zui-Xiong², ZHANG Wei-Min¹ (1. Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. The Conservation Institute of Dunhuang Academy, Dunhuang 736200, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2492~2500.

Abstract: A blown sand control system is needed to protect the top of the Mogao Grottoes. In particular, a shrub shelter belt is an essential component of such a control system. Observational results show that the airflow field nearby shrub shelter belt is redistributed, and the near-surface sand stream is dramatically changed. The effective prevention range is 20~30 times of the height of shrub shelter belt, while wind velocity decreases from 68.1 to 40.7%, and sand transport rates at 2m behind every shrub shelter belt are 1/38 and 1/138 as much as the sand transport rates at 30m in front of the shrub shelter belt. Furthermore, the depth of sand accumulation in the shrub shelter belt reaches 0.7m. The fine and very fine sand on surface (0~20cm) layer increases by 20.6 and 5.5% respectively, and the organic content increases greatly in the area of vegetation roots development. Moreover, the shrub shelter belt also has an effect on micro-climate. The daily average temperature in dunes at 0.5, 1.0 and 1.5m heights is 0.5, 0.9 and 0.2℃ higher than in the shrub shelter belt, respectively. The relative humidity of the shrub shelter belt also increases at these heights by 0.4, 0.3 and 0.1% than in the shifted sand. The variation of daily and night temperature on the surface (0~20cm) layer is sinusoidal in distribution.

Key words: Dunhuang Mogao Grottoes; shrub shelter belt; blown sand control; effective analysis

文章编号: 1000-0933(2004)11-2492-09 中图分类号: Q143 文献标识码: A

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000048705); 国家文物局文物保护科学和技术研究资助项目(9907); 敦煌香港佛迹功德林计划资助

收稿日期: 2004-02-27; 修订日期: 2004-08-25

作者简介: 汪万福(1966~), 男, 甘肃甘谷人, 副研究员, 博士生, 主要从事干旱区环境和文物保护修复研究。E-mail: wwanfu@hotmail.com 或 wangwanfu@yahoo.com

Foundation item: National Key Basic Research Special Foundation Project (No. G2000048705); National Relics Bureau Project of Science and Technology of Relics Conservation; Planting Plan of Buddhist Benefaction on Dunhuang and Hongkong

Received date: 2004-02-27; Accepted date: 2004-08-25

Biography: WANG Wan-Fu, Ph. D. candidate, Associate professor, mainly engaged in arid environment and mural conservation. E-mail: wangwanfu@
万方数据

位于甘肃河西走廊西端的敦煌莫高窟是我国重点文物保护单位,1987年被列入世界文化遗产清单,素有“世界艺术画廊、墙壁上的博物馆”之称。这个巨大的石窟群中保存着4~14世纪精美的壁画45000m²和彩塑2000余身,是当今世界上现存规模宏大、内容丰富、艺术精湛的佛教艺术宝库,在中国和世界文化史上占有极其重要的地位^[1]。

莫高窟地处我国极端干旱的内陆荒漠地带,一方面,干燥少雨的气候为石窟长期完整保存创造了得天独厚的自然环境条件。而另一方面,莫高窟顶以西约1km处即是鸣沙山的东段,沙源丰富,在西北、东北以及西南风的作用下,洞窟长期受到风沙的危害^[2~4]。因此,近几十年来有关莫高窟风沙危害与防治问题成为国内外专家关注的焦点问题,有不少专家提出了许多见解,并开展了工程(尼龙网栅栏、砾石铺压)、生物及化学防治实验研究。赵松乔^[5]在对莫高窟地区风沙环境研究后认为,该区东、西风势均力敌,鸣沙山整体东移埋没莫高窟的可能性不大,并对“鸣沙山平均每年向莫高窟方向移动10m”^[6]、“莫高窟面临被流沙埋没的危险”^[7]等观点提出质疑。凌裕泉等^[8]、屈建军等^[9]和薛娴等^[10]对工程防护进行了探讨;汪万福等^[11]对滴灌条件下的莫高窟地区防风固沙植物种选择进行了初步研究;李最雄等^[12]开展了莫高窟崖顶化学固沙实验;同时,朱震达^[13]、王涛等^[14]、屈建军等^[15]、汪万福等^[16]和张伟民等^[17]对莫高窟风沙危害综合防护体系提出了见解,指出在莫高窟顶建立一个由工程、生物及化学措施组成的综合防护体系的必要性及紧迫性。

有关湿润区、干旱与半干旱荒漠带无灌溉条件下的植物固沙研究报道较多^[18~21],相比之下对极端干旱荒漠带的植物固沙研究较少,已有的研究也只是对乔木(主要是针对农田防护林)的防风作用^[22,23]或局限于室内的模拟实验^[24],而对灌木防风固沙等方面的研究更是少见。与乔木相比,荒漠灌木林具有耗水少等优点,在滴灌条件下可以在荒漠地带生长^[25],但对其防风固沙的效能在西部生态环境建设及其植被恢复重建中的作用尚未见到报道。基于上述观点,本文以地处我国内陆腹地极端干旱荒漠地带的敦煌莫高窟崖顶流动沙地为例,对滴灌条件下灌木林带的防风效能、阻固流沙作用进行系统研究,通过对灌木带前后输沙率变化、沙地土壤理化性质及其环境效应的分析,为干旱荒漠区治沙工程的进一步完善提供理论指导。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于敦煌莫高窟崖顶平坦沙地和流动沙丘边缘地带(40°09'N,94°41'E,海拔高度1375m),距莫高窟崖顶崖面约1km,面积近37.4hm²。窟顶依地貌特征及地表组成物质,从东向西依次可划分为砾质戈壁带、沙砾质戈壁带、流沙覆盖在沙砾质戈壁上的平坦沙地和流沙覆盖在基岩上的大沙山^[25]。沙山高60~170m,沙丘类型以格状沙丘、金字塔沙丘、鲸背状沙垄和复合型沙山为主。流沙覆盖厚度10~150m,随距离沙山的远近有所不同,逾接近沙山,细沙层愈厚,从南到北亦有差异。沙砾质戈壁带、流沙覆盖在沙砾质戈壁上的平坦沙地及流动沙丘是危害莫高窟的主要风沙源地^[26]。

莫高窟地区常年受蒙古高压影响,具有典型的荒漠气候特征。气象资料统计表明,该区不仅是一个多风地区,而且是一个多风向地区。年平均风速为3.5m/s,春季3~5月平均风速达4.1m/s,最大风速达20.2m/s(1997.5.18,风向268°),大风和沙尘暴日数分别占全年的48%、47.5%。年平均降水量为23.2mm^[27],且集中于夏季6、7、8三个月,占年降水量的58%。蒸发量为4347.9mm,是降雨量的187倍。干燥指数 $K=32$,平均相对湿度为32%,全年日照时数为2962.5h,日照率73%。历年平均气温10.6℃,平均地表温度12.4℃,每年10月底开始结冰,翌年3月下旬解冻。

研究区主要天然植被有沙拐枣(*Calligonum mongolicum* Turce)、梭梭(*Haloxyylon ammodendron* (Meg) Bunge)、白茨(*Nitraria tangutorum* Bobr.)、白沙蒿(*Artemisia arenaria* Dc.)和羽毛三芒草(*Aristida pennata* Trin)(*Aristida plumose* L.)等,人工植被有红柳(*Tamarix chinensis* Bge)、花棒(*Hedysarum scoparium* fischet Mge)、梭梭、沙拐枣和柠条(*Caragana korshinskii* Kom)等。人工植被经过3次种植。1992年种植面积2400m²,共栽植600株(丛);1993年种植7200m²,共栽植1800株(丛);1999年种植38500m²,共栽植9625株(丛)。目前在鸣沙山前沿流动沙地上形成长1850m,宽分别为12m、14m,平均高度为1.5m,盖度达40%~60%,走向为SW→NE的防风固沙灌木试验林带两条(图1),应用滴灌进行灌溉。灌溉水为大泉河河水,水中含有较高的Ca²⁺、Mg²⁺阳离子和Cl⁻、SO₄²⁻阴离子,总碱度为3.72mgN/L,总硬度为509mg/L(CaCO₃),pH为7.55。

地表浅层1~2m的砾沙粒配全部表现为双峰型。土壤为棕色荒漠土,有机质含量为0.06%~0.51%,全养分亦低,N在0.01%以下,P₂O₅在0.05%~0.08%之间,K₂O在2.0%以下;100g土壤速效养分水解N 0.42~3.87g,P₂O₅ 0.01~0.29g,K₂O 8.0~22.5g,pH值7.22~8.94;100g土壤中阴阳离子含量,CO₃²⁻根离子基本上为0,而HCO₃⁻、Cl⁻、Mg⁺⁺、K⁺均在千分至万分之几毫克,SO₄²⁻、Ca⁺⁺和Na⁺等离子,都在百分之几毫克上下。

1.2 研究方法

本研究主要针对莫高窟多风向条件下灌木林带防护效应进行野外实地观测,观测的主要项目有:灌木林带周围气流场的变化(用研制的10路风速风向自动采集仪);林带前30m(流沙地)、2m和第1林带中、后2m,第2林带前17m、2m和林带中、后2m、30m不同高度(0.2、0.5、1.0、1.5和200cm)风速的变化;林带前30m、第1林带中、两条林带中间、第2林带前2m及中间不同高度(0.2、2m)风速梯度;第1林带前30m、后2m和第2林带后2m的输沙率(采用阶梯式积沙仪);林带建成前(1993年)后(2002年)

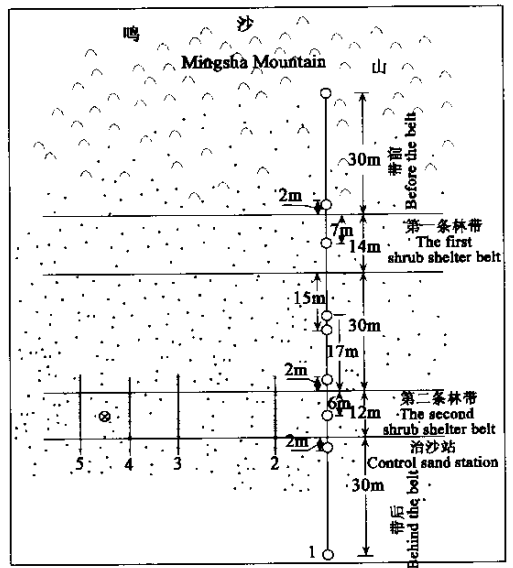
土壤机械组成、养分及盐分变化(现场采集土壤样品带回中科院寒旱所土壤实验室分析)。土壤机械组成用筛吸法,有机质用重铬酸钾氧化-外加热法,全氮用凯氏法^[28]、全钾、全磷用常规法^[28],可溶盐用滴定法,水分用烘干称重法,pH用玻璃电极法(pHS-2 酸度计);林带内外不同高度(0.5、1 和 1.5m)空气温度、相对湿度(用 TRH-CE 电子温湿度表,数据经阿斯曼干湿温度表校正)及土壤浅层(0.5、10、15 和 20cm)温度变化(使用上海医用仪器制造厂生产的 2-30076 型曲管地温表);林带中的积沙效果监测(选用 4 个典型的断面用插杆的方法)(图 1)。

2 结果与分析

2.1 灌木林带防风作用

2.1.1 气流场特征 图 2 是 2002 年 5 月 4~6 日测得的灌木林带周围的风速廓线图。风速廓线的 5 个观测高度分别为:20、50、100、150cm 和 200cm,两个风速廓线的观测位置分别位于鸣沙山前 120m 和 150m 处。图 2 表明,以平均林带高 1.5m,疏透度约为 50% 的两条灌木(丛)林带,其相对速度纵剖面同疏透栅栏一样,显示出 7 个重新分布的能区:在贴地层,有林带前的拐角绕流阻滞减速区,林带中的灌丛阻挡湍流衰减区,林带后的回流涡旋减速及速度恢复区,林带远方的气流附加加速区。在林带所在空间,有林带间的阻滞减速区和林带后的涡旋减速区,在林带顶部后有集流加速区。风沙流中沙颗粒在阻滞区和涡旋回流减速区沉积,在加速区产生地表风蚀,而在林带顶上下层气流交换加强。

2.1.2 灌木林带前后风速变化 表 1 是 2002 年 5 月 4 日~6 月 4 日共 10 次测得的风速平均值,表中清楚地反应了林带对林缘、林内及两条林带间风速的降低作用。当风(观测期内为 NW 风)从旷野到达第 1 条林带前缘 2m、林中、林后 17m 及第 2 条林带前 2m、林中、林后 30m 时,1m 和 2m 高处的风速分别降低 53.3%、52.8%、39.7%、39.7%、32.6%、31.9% 和 51.2%、55.5%、54.1%、54.3%、65.2%、56.2%,说明林带对风的阻滞作用是明显的。由于两条林带的叠加,林带的防护作用明显加强,在带后灌木林带平均高 20~30 倍的范围内风速仍为流沙地(林带前 30m)的 68.1%~40.7%。林带前缘、带中和带后风速的降低比较接近,是因为带内积沙较多所致。



图例 Legend

- 鸣沙 Sand dune
- 平沙地 Sand dune
- 土壤剖面监测点 Monitor point for soil trigonal
- 1/0 风速监测断面/点 Monitor trigonal/point for wind velocity
- 2、3、4、5/× 积沙监测断面/点 Monitor trigonal/point for erosion/deposition

图 1 各风速积沙监测点所在位置平面示意图

Fig. 1 Plane sketch map for observation sites of wind speed and deposition

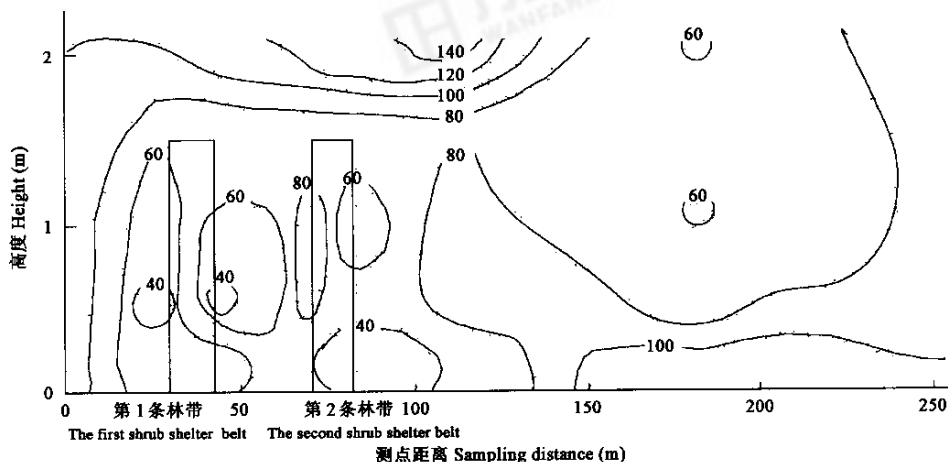


图 2 灌木林带风速廓线剖面(等值线为相对风速)

Fig. 2 The airflow field influenced by the shrub shelter belt(The iso-velocity lines represent the relative velocity)

表 1 灌木林带对风速的影响(相对风速%)

Table 1 The effects of shrub shelter belt on wind velocity variation(Relative velocity %)

高度 Height (cm)	第 1 条林带 The first shrub shelter belt				第 2 条林带 The second shrub shelter belt				
	林带前 Before the belt		林带中 Middle of the belt	林带后 Behind the belt	林带前 Before the belt	林带中 Middle of the belt	林带后 Behind the belt		
	30m	2m	7m	2m	17m	2m	6m	2m	30m
20	100	48.7	47.8	51.9	49.6	51.6	44.6	50.2	52.3
50	100	51.9	48.6	53.3	56.8	55.6	58.6	60.8	63.0
100	100	46.7	47.2	56.0	60.3	60.3	67.4	62.1	68.1
150	100	47.7	45.7	48.1	48.6	45.4	35.1	43.6	40.7
200	100	48.8	44.5	47.2	45.9	45.7	34.8	45.8	43.8

2.1.3 林带前后的风速梯度 2002 年 4 月 5 日~5 月 5 日 30d 共 49 次在 1999 年定植的灌木林带中进行不同断面不同高度(0.2 和 2m)处平均风速的测定结果见图 3。从图 3 看出,不同种类的灌木林带,其前后不同测点 0.2m、2m 高处的风速,从戈壁到林带(测定断面走向 E→W)前缘逐渐降低,但这种趋势到第 2 林带前 2m 后发生变化,除 II 号断面 2m 高处的风速继续下降外,其余各点不同高度风速逐渐上升,到两条林带的中间位置后情况复杂化, I、II 号断面 2m 高处的风速继续上升,到第 1 条林带中间位置时达到最大值, III 号断面的风速反而下降,到第 1 条林带前缘 2m 处又开始上升,此时与 I、II 号断面表现出一致的规律性。I、II、III 号断面的风速分别是旷野的 1.6、1.5 和 2.4 倍,这一现象说明林带顶部存在集流加速区,与在风洞中的结果比较一致。而 0.2m 高处的风速到达两条林带中间后, II 号断面的风速继续上升,到第 1 条林带前 2m 时与 I、III 号断面一样下降,到第 1 条林带中间时风速均为 0,反应了灌木林带对近地表风速有较大的阻滞作用。

2.2 林带的防沙固沙作用

2.2.1 林带阻固流沙效果 为了监测林带的阻固流沙效果,在林带建立后用插杆法设置 10 个断面进行积沙监测,图 4 是其中 4 个断面(断面走向 ES→NW)的监测结果。从图 4 可以看出,不同种类的灌木林带其阻固流沙的效果有很大的变化,柠条灌木林带内表现出强烈的蚀积过程,而其它种类的灌丛则以堆积为主。主要原因是柠条主干相对比较明显,在同样种植密度下其下层风沙活动强烈,当风沙流到达林带前缘及刚一进入林带时表现出强烈的风蚀,随后由于林带对风速的减弱导致风沙流携带的大量沙尘沉降,形成沙物质的堆积。

2.2.2 林带前后输沙率变化 由于林带对风速的阻滞作用,林带前后输沙率发生了较大的变化。表 2 是林带前后输沙率的测定结果。从表 2 中看出,在 9.8m/s 的西北风作用下,林带前缘 30m(流沙地)、第 1 林带后 2m 和第 2 林带后 2m 处 0~20cm 高度的输沙率分别为 59.35×10^{-4} 、 1.54×10^{-4} 和 0.43×10^{-4} g/(cm²·min),即林带前缘 30m 处的输沙率分别是第 1 林带后 2m 和第 2 林带后 2m 的 38 倍和 138 倍,表明灌木固沙林带具有很好的阻沙作用。

2.3 沙地土壤机械组成、理化性质的变化

林地由于灌溉、施肥、施药及林木根系、土壤微生物、动物等的共同作用,使土壤机械组成和理化性质发生了较大的变化(表 3~5)。

由表 3 可以看出,由于灌木带对风速的降低和对风沙流携带大量细粒沙物质的沉降作用,林带建立 10a 后土壤表层和浅层(0~20cm)机械组成由原来的较粗粒级向细粒级发展,其中细沙(0.25~0.4mm)和极细沙(0.1~0.05mm)含量分别增加了

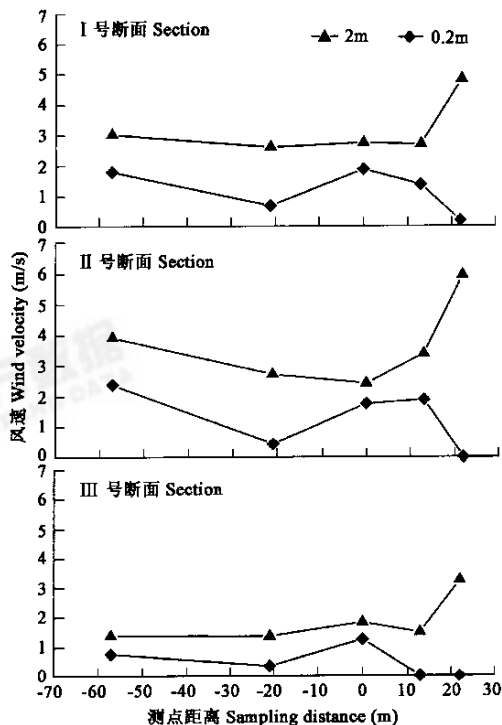


图 3 林带前后风速梯度

Fig. 3 Vertical gradient of wind velocity in front of and behind the shrub shelterbelt
X 轴-Axis: 0 代表两条林带的中心,向西为正,向东为负 0 denotes the middle point of two shrub shelterbelts, West direction is positive, and East direction is negative

70.2%、9.4%和20.6%、5.5%。随着植物的生长和灌溉年限的延长,土壤养分含量重新分配,有机质含量在植物根系分布范围内成倍增加(表4),而全N、全P变化不大,个别层位反而减小,这与植物对不同元素的吸收利用有关,因土壤剖面选在以花棒为主的混交灌木带内,使这一情况更为复杂化。由于灌溉用水为莫高窟大泉河水,其具有较高的碱性,加之灌溉后土壤水分的蒸发作用,导致沙层表层产生明显的积盐现象,一般滴灌后均在表层形成一盐圈,土壤pH值增大一个数量级,同时使0~60cm的沙层含盐量普遍有所增加(表5)。

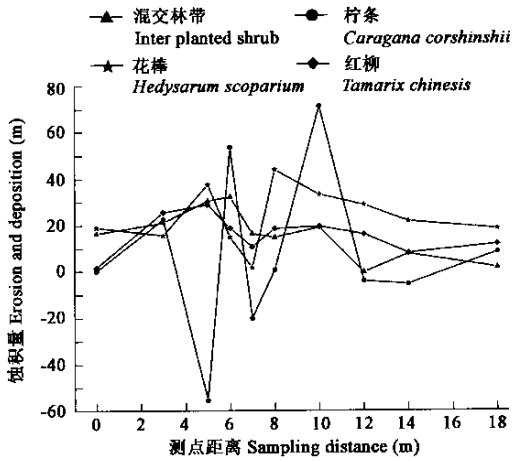


图4 灌木林带内蚀积变化(2000~2002年)

Fig. 4 The erodin/deposition curve in the shrub shelter belt from 2000 to 2002

X 轴上 X-Axis: 0 为灌木林带前缘 3 m 处的测定 0 is a point of 3m before the shrub shelter belt

表2 林带前后输沙率观测结果

Table 2 The rate of transported sand in front of and behind the shrub shelter belt

高度 Height (cm)	流沙地 Sand dune	第1林带后2m 2m behind first shrub shelter belt	第2林带后2m 2m behind second shrub shelter belt
	输沙量 Sand transport rates ($\times 10^{-4}g/(cm^2 \cdot min)$)		
0~2	23.84	0.35	0.04
2~4	19.82	0.22	0.02
4~6	7.82	0.41	0.02
6~8	3.71	0.10	0.22
8~10	1.88	0.06	0.03
10~12	0.98	0.06	0.02
12~14	0.52	0.11	0.02
14~16	0.37	0.04	0.02
16~18	0.22	0.10	0.02
18~20	0.19	0.09	0.01
0~20	59.35	1.54	0.43

表3 莫高窟崖顶 2m 厚土层机械组成

Table 3 Mechanical composition of the soil particles in the profiles of 0~2 m of Mogao Grottoes

采样时间 Sampling time	层位 Depth (cm)	各级粒径(mm)含量 % Percent content of grain size							
		砾石 Gravel >2	粗沙 Coarse 2~0.5	中沙 Moderate sand 0.5~0.25	细沙 Fine sand 0.25~0.1	微沙 Very Fine sand 0.1~.05	粗粉沙 Coarse silt 0.05~0.01	细粉沙 Very fine silt 0.01~0.005	粘土 Silt 0.005~0.001
1933 年	0	0.37	32.53	5.90	29.46	28.77	2.96	0	0
	0~20	0.27	25.16	3.77	34.26	33.77	3.03	0	0
	20~60	0	21.20	6.17	35.20	32.20	5.27	0	0
	60~130	1.43	20.73	4.70	23.07	41.34	6.93	0	0
	130~200	42.17	9.81	8.58	19.95	10.67	0.70	0	0
2002 年	0	0	5.07	8.29	50.14	34.70	1.80	0	0
	0~20	5.04	8.83	5.60	37.47	35.63	7.43	0	0
	20~60	24.28	13.56	5.60	17.88	29.12	8.80	0.76	0
	60~130	0	0.60	3.46	78.74	11.20	0	0	0
	130~200	30.00	28.36	9.14	17.00	9.42	6.08	0	0

2.4 灌木林带小气候效应

2.4.1 灌木固沙带对空气温度的影响 对流沙区和灌木带内不同测点不同高度气温的同期观测结果表明:灌木林带内与流沙区气温的日变化趋势基本一致(图5),流沙区0.5、1m和1.5m高处日平均气温比灌木带内分别高出0.5、0.9℃和0.2℃,表现出与乔木林带一致的现象,但个别时段(如17:00、18:00)灌木带内的气温又高于流沙区,这是由于灌木林带枝叶繁茂,空气流动受阻的缘故所致。

2.4.2 灌木固沙带对空气湿度的影响 在灌木林带的作用下,由于风速的降低和乱流交换的减弱,灌木蒸腾和土壤蒸发的水分受冠层的影响,在灌木带冠层分布的范围内水分滞留较长的时间,导致小范围内空气湿度有所增加(图6)。图6是1993年9月6日在花棒灌丛(当年春季定植)中观测到的灌木带内和流沙地的空气相对湿度日变化过程。从图6可见,3个观测高度0.5、1m

和 1.5m 空气相对湿度总的变化趋势是一致的,而且 3 个高度灌木林带内比流沙区平均相对湿度均高 0.4%、0.3% 和 0.1%,相对湿度与气温的变化规律一致。在一天中,7:00 湿度最高,到下午 16:00 时左右降到最低值。可见,即使盖度仅为 30% 左右,高度不及 1m 的灌木丛也表现出其对区域环境的影响。

表 4 莫高窟崖顶 2m 厚土层养分分析结果(g/kg)

Table 4 Analysis results of nutrient in 2m depth layer over the top surface of the Mogao Grottoes

采样时间 Sampling time(year)	层位 Depth(cm)	有机 C Organic C	全养分 Total nutrient			速效养分 Available nutrient		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Hydrolyze nitrogen	P ₂ O ₅	K ₂ O
1933	0	1.21	0.09	0.61	18.0	21.8	1.7	135
	0~20	0.80	0.08	0.60	18.0	20.6	0.1	96
	20~60	0.80	0.08	0.53	18.0	4.2	1.9	88
	60~130	0.83	0.01	0.54	18.0	12.1	2.6	80
	130~200	0.93	0.07	0.52	18.0	38.7	1.4	80
2002	0	1.55	0.09	0.63	17.5	21.6	3.0	150
	0~20	1.55	0.08	0.64	17.5	11.0	7.9	150
	20~60	1.27	0.09	0.64	17.5	17.9	15.9	140
	60~130	1.07	0.06	0.47	15.0	6.4	7.9	160
	130~200	1.29	0.06	0.87	17.5	6.4	6.9	130

表 5 莫高窟崖顶 2m 厚土层盐分分析结果(g/kg)

Table 5 Analysis results of salinity in 2m depth layer over the top surface of the Mogao Grottoes

采样时间 Sampling time	层位 Depth(cm)	阴离子 Anion				阳离子 Cation				阴阳离子总数 Amount of anion and cation	含水量 Watercontent	pH 值 pH
		CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺			
1993	0		0.12	1.59	3.10	0.54	0.28	1.40	0.07	7.10		7.26
	0~20	0	0.10	0.10	0.90	0.18	0.10	0.10	0.01	1.49		7.56
	20~60	0	0.09	0.13	3.02	0.84	0.23	0.15	0.03	4.49		7.32
	60~130	0	0.12	0.13	3.01	1.03	0.09	0.20	0.02	4.60		7.22
	130~200	0	0.13	0.12	1.19	0.16	0.21	0.10	0.02	1.93		7.32
2002	0	0	0.08	1.26	1.24	0.25	0.05	1.00	0.06	3.89	0.25	8.68
	0~20	0	0.11	0.65	1.46	0.29	0.03	0.71	0.06	3.31	0.27	7.74
	20~60	0	0.12	0.28	6.03	2.07	0.09	0.49	0.06	9.14	5.52	8.84
	60~130	0	0.12	0.06	0.26	0.04	0.02	0.11	0.02	0.63	1.60	8.76
	130~200	0	0.13	0.26	0.73	0.12	0.02	0.37	0.06	1.69	2.46	7.86

2.4.3 灌木固沙带对土壤浅层温度的影响 林带建立后,土壤内生物地球化学循环加快,使土壤表层和浅层温度发生了变化,但这种变化在林带建立初期表现并不十分明显。图 7 是 1993 年 9 月 6 日对灌木林带(当年春季定植)与流沙区 0、5、10、15cm 和 20cm 共 5 个不同深度土壤温度日变化的观测结果。从图 7 可以看出,灌木带内和流沙区的土壤温度变化规律基本一致,呈正态分布。7:00 达到最低值,16:00 达到最高值,但这种变化趋势随土壤深度的增加以垂向向下传递,20cm 处到 21:00 以后才达到最高值。土壤温度灌木带内均比流沙区高,0、5、10、15cm 和 20cm 分别高出 1.6、0.8、0.3、0.3℃ 和 0.4℃,平均高出 0.7℃。流沙地的主要成分是石英(SiO₂),它具有比热小,导热大的特点。因此,沙地表面一经太阳照射,温度迅速上升。据测定,这里夏季沙地表面最高温度达 70℃ 左右。这样高的温度,一般植物是难以忍受的。所以,在流动沙丘上植物种类稀少,这也是原因之一。经灌溉栽植沙生植物后,地表温度显著降低,特别是在夏季灌溉当天,地表湿润,蒸发加大,温度下降最大可达 10℃,有利于植物生长。

浅层土壤温度状态直接受太阳辐射与地面热状况的影响。昼夜测定土壤温度结果表明,植被区升温 and 降温比较快,且植被区地表温度高于流沙区。浅层土壤温度昼夜变程与地面有同样的规律,以垂直方向向下传递,但变幅较地表为小,并从上往下递减,到 20cm 深时变化显著减小。

3 结论

灌木林带是敦煌莫高窟风沙防治综合防护体系中不可缺少的重要组成部分。目前建立的两条灌木防风固沙带通过改善局地小气候与微生态环境,已对石窟的保护起到积极的作用。

(1) 灌木林带的建立,使其周围的气流场重新分布,改变了近地表风沙流结构。窄行多带的灌木林带的叠加作用使其阻固流沙的作用更加明显。

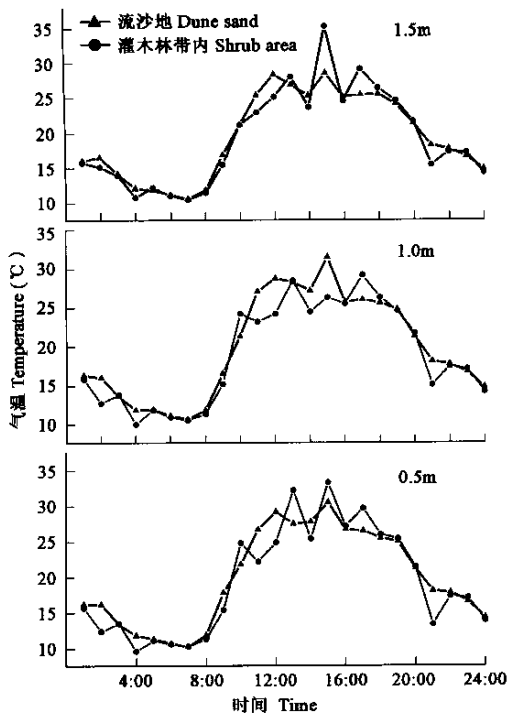


图5 流沙地和灌木林带内气温日变化

Fig. 5 Daily changes of air temperature in the shrub belt and on the dune sand

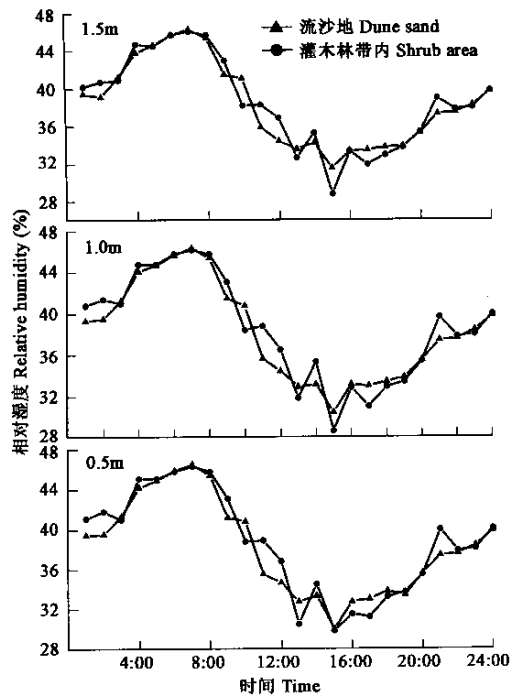


图6 流沙地和灌木林带内空气相对湿度日变化

Fig. 6 Daily changes of relative humidity in the shrub belt and on the dune sand

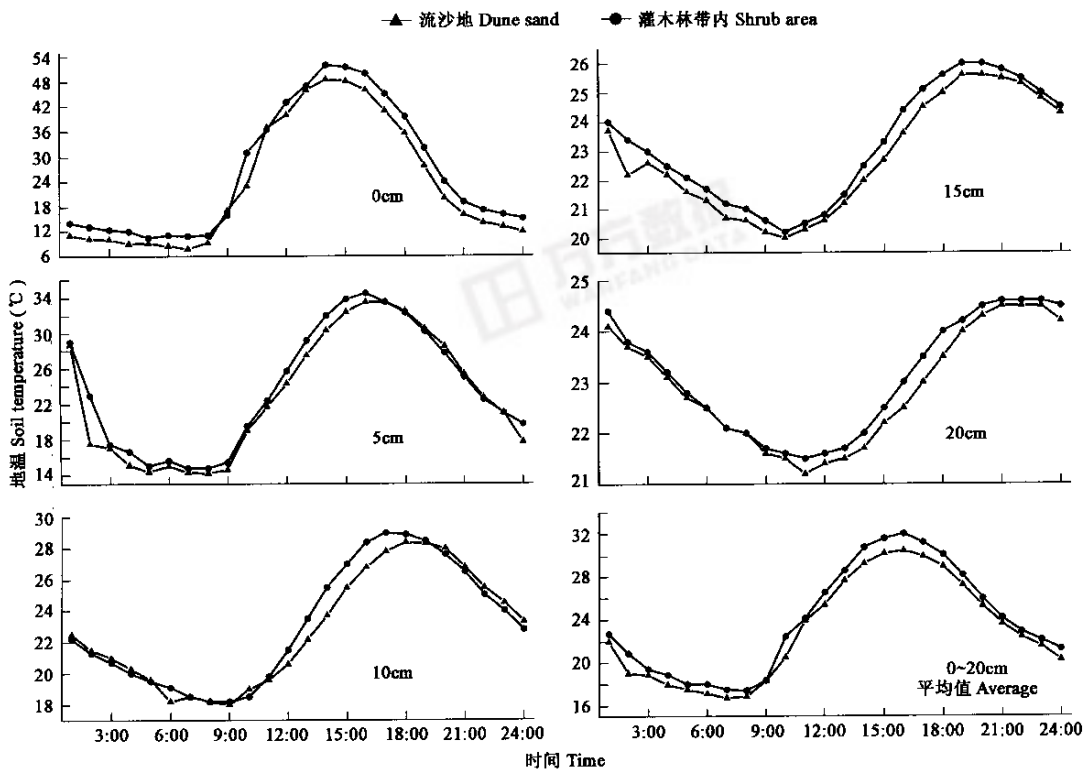


图7 流沙地和灌木林带内土壤浅层地温日变化

Fig. 7 Daily changes of shallow soil temperature in the shrub belt and the dune sand

(2)由于灌溉、施肥、灌丛根系、土壤微生物及灌木林带对沙尘阻滞等的共同作用,使沙地表层和浅层细沙和微沙含量增加,有机质含量在植物根系分布范围内成倍增加,而受物种的影响,全N、全P 变化不大。在0~60cm 的沙层含盐量普遍有所增加,而60cm 以下的沙层盐分含量反而下降,说明在频繁的滴灌条件下,沙地浅层不但没有积盐过程,而且还把风成沙中的部分盐分淋洗到60cm 深度以下。

(3)灌木带对区域小气候的效应明显。灌木林带内与流沙区气温和相对湿度的日变化趋势基本一致,日平均气温流沙区比灌木带内高,而平均相对湿度灌木林带内比流沙区高,表现出与乔木林带基本一致的变化趋势。浅层土壤(0~20cm)温度昼夜变程与地面有同样的规律,以垂直方向向下传递,但变幅较地表为小,并从上往下递减,到20cm 深时变化更小。

(4)灌木林带防风固沙作用明显,耗水少,比较适应贫瘠的土壤水分养分条件,在极端干旱荒漠地区的风沙防治及植被恢复重建中具有极其重要的现实意义。因此,研究成果可在我国西部生态环境建设中推广应用。

References:

- [1] Fan J S. The protect and management on Mogao Grottoes. *Dunhuang Research*, 2000, **63**(1): 1~9.
- [2] Li Z X. The present condition and future tasks on the conservation of Dunhuang Grottoes. *Dunhuang Research*, 2000, **63**(1): 10~23.
- [3] Qu J J, Huang N, Dong G R, *et al.* The role and significance of the gobi desert pavement in controlling sand movement on the cliff top near the Dunhuang Magao Grottoes. *Journal of Arid Environments*, 2001, **48**: 357~371.
- [4] Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dunes. *Methuen and Co. Ltd. London*, 1941.
- [5] Zhao S Q. Spirit of seeking truth from fact-cherishing the memory of instructions from my teacher Prof. Zhu Kezhen. *Scientia Geographica Sinica*, 1990, **10**(1): 6~8.
- [6] Wang J Y. Could the Mogao Grottoes be buried by the shiftsand? *The Nature*, 1990, (2): 30~31.
- [7] Jin A. The Dunhuang Mogao Grottoes are faced with danger which be buried by the quicksand. *Cultural Work*, 1986, (5): 18.
- [8] Lin Y Q, Qu J J, Fan J S, *et al.* The effect analysis of sand control engineering on the cliff top of Mogao Grottoes. *Journal of Desert Research*, 1996, **16**(1): 13~18.
- [9] Qu J J, Lin Y Q, Liu X W, *et al.* The effects of an A-typed nylon fence on aeolian sand prevention. *Journal of Lanzhou University(Natural Sciences)*, 2002, **38**(2): 171~176.
- [10] Xue X, Zhang W M, Wang T. Wind tunnel experiments on the effects of gravel protection and problems of field surveys. *Acta Geographical Sinica*, 2000, **5**(3): 375~383.
- [11] Wang W F, Li Y H, Agnew N, *et al.* An experiment on selection of sand-fixed plant in the Mogaou Grottoes area. *Dunhuang Research*, 1993, **36**(3): 98~103.
- [12] Li Z X, Lin B M. Chemically sand fixed experiment on the top of Mogao Grottoes. *Dunhuang Research*, 1993, **34**(1): 89~107.
- [13] Zhu Z D. The desertification control must be set up a whole preventing system—a case study of blown sand preventing in Mogao Grottoes, Dunhuang. *Desert, Sand desertification, desertification and it's control and strategies*. Beijing: Chinese Environmental and Science Press, 1999. 365~366.
- [14] Wang T, Zhang W M, Wang W F, *et al.* The study on the functions of arresting and transporting sands of the gobi preventing system over the top of the Mogao Grottoes. *Journal of Desert Research*, 2004, **24**(2): 187~190.
- [15] QU J J, Zhang W M, Peng Q L, *et al.* A discussion on some problems of winds and sands at Mogao Grottoes in Dunhuang. *Acta Geographical Sinica*, 1996, **51**(5): 418~425.
- [16] Wang W F, Zhang W M, Li Y H. A study on the blown sand disasters and it's control at Mogao Grottoes in Dunhuang. *Dunhuang Research*, 2000, **63**(1): 42~48.
- [17] Zhang W M, Wang T, Xue X, *et al.* Discussion on comprehensively preventing blown sand system in Mogao Grottoes, Dunhuang. *Journal of Desert Research*, 2000, **20**(4): 409~414.
- [18] He X D, Zhao A G, Duan Z H, *et al.* Protective effects of the shrub-belt along Tarim Desert highway. *Chinese Journal of Ecology*, 2002, **21**(4): 26~30.
- [19] Wang K F, Jiang J, Zhang W J. The research on the found of protect system and ecology benefit at the sides of the Jing-Tong railway. *Journal of Desert Research*, 1989, **9**(3): 1~12.
- [20] Liu Y X. The found of the shelter belt and benefit on the Bao Lan railway at the Shapotou. *Journal of Desert Research*, 1987, **7**(4): 1~11.
- [21] He H M, Zhou J. The analysis on mechanism of shelterbelt reducing sand and dust near ground surface. *Journal of Desert Research*, 2002, **22**(2).
- [22] Oosterhoorn M, Kappelle M. Vegetation structure and composition along an interior—edge-exterior gradient in a Costa Rican montane

cloud forest. *Forest Ecology and Management*, 2000, **126**: 291~307.

- [23] Wang H. Study on the effects of construction in windbreak and sand fixation system in Jingtai irrigated area. *Journal of Gansu Agricultural University*, 1997, **32**(3): 238~243.
- [24] Yu X Z, Qu B S, Shen X D. Wind tunnel simulation of sheltering effect of shelterbelts on sand. *Aerodynamic Experiment and Measurement & Control*, 1991, **5**(4): 46~52.
- [25] Wang W F, Li Y H, Agnew N, et al. The study on the controlling sand movement by biology method. *Dunhuang Research*, 1996, **49**(3): 112~135.
- [26] Qu J J, Dong G R, Wen Z X, et al. Sand drift encroachment in Dunhuang Mogao Grottoes district and its control. *Sciences in China*, 1998, **40**(2): 197~206.
- [27] Li S, Qu J J. The character of weather and environment in Mogao Grottoes, Dunhuang. *Dunhuang Research*, 1996, **49**(3): 112~135.
- [28] Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences. *Physical and chemical analysis methods of soils*. Shanghai: Shanghai Scientific & Technological Press, 1978. 7~59.

参考文献:

- [1] 樊锦诗. 敦煌莫高窟的保护与管理. *敦煌研究*, 2000, **63**(1): 1~9.
- [2] 李最雄. 敦煌石窟的保护现状和面临的任务. *敦煌研究*, 2000, **63**(1): 10~23.
- [5] 赵松乔. 求实精神——缅怀竺可桢师的教诲. *地理科学*, 1990, **10**(1): 6~8.
- [6] 王进玉. 莫高窟会被流沙埋没吗? *大自然*, 1990, (2): 30~31.
- [7] 景爱. 敦煌莫高窟面临被流沙埋没的危险. *文物工作*, 1986, (5): 18.
- [8] 凌裕泉, 屈建军, 樊锦诗, 等. 莫高窟崖顶防沙工程的效益分析. *中国沙漠*, 1996, **16**(1): 13~18.
- [9] 屈建军, 凌裕泉, 刘贤万, 等. 尼龙网栅栏防沙效应研究. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2002, **38**(2): 171~176.
- [10] 薛娴, 张伟民, 王涛. 戈壁砾石防护效应的风洞实验与野外观测结果——以敦煌莫高窟顶戈壁的风蚀防护为例. *地理学报*, 2000, **55**(3): 375~382.
- [11] 汪万福, 李云鹤, 阿根廷, 等. 莫高窟地区生物固沙植物种选择试验报告. *敦煌研究*, 1993, **36**(3): 98~103.
- [12] 李最雄, 林博明. 莫高窟崖顶的化学固沙实验. *敦煌研究*, 1993, **34**(3): 120~125.
- [13] 朱震达. 荒漠化防治必须建立一个完整的防护体系——以敦煌莫高窟防沙工程体系为例. *中国沙漠、沙漠化、荒漠化及其治理的对策*. 北京: 中国环境科学出版社, 1999. 365~366.
- [14] 王涛, 张伟民, 汪万福, 等. 莫高窟窟顶戈壁防护带阻截和输导功能研究. *中国沙漠*, 2004, **24**(2): 187~190.
- [15] 屈建军, 张伟民, 彭启龙, 等. 有关敦煌莫高窟风沙问题探讨. *地理学报*, 1996, **51**(5): 418~425.
- [16] 汪万福, 张伟民, 李云鹤. 敦煌莫高窟的风沙危害与防治研究. *敦煌研究*, 2000, **63**(1): 42~48.
- [17] 张伟民, 王涛, 薛娴, 等. 敦煌莫高窟综合防护体系探讨. *中国沙漠*, 2000, **20**(4): 409~414.
- [18] 何兴东, 赵爱国, 段争虎, 等. 塔里木沙漠公路灌木固沙带的防护效应. *生态学杂志*, 2002, **21**(4): 26~30.
- [19] 王康富, 蒋瑾, 张维静. 京通铁路两侧防护体系的建立及其生态效益的研究. *中国沙漠*, 1989, **9**(3): 1~12.
- [20] 刘心. 包兰铁路沙坡头地段铁路防沙体系的建立及其效益. *中国沙漠*, 1987, **7**(4): 1~11.
- [21] 何洪鸣, 周杰. 防护林对沙尘阻滞作用的机理分析. *中国沙漠*, 2002, **22**(2): 197~200.
- [23] 王辉. 景电灌区防风治沙体系建设效果研究. *甘肃农业大学学报*, 1997, **32**(3): 238~243.
- [24] 俞学曾, 区柏森, 沈晓东. 防护林防护效应风洞模拟实验. *气动实验与测量控制*, 1991, **5**(4): 46~52.
- [25] 汪万福, 李云鹤, 阿根廷, 等. 莫高窟崖顶植物固沙试验研究. *敦煌研究*, 1996, **49**(3): 112~135.
- [26] 屈建军, 董光荣, 文子祥, 等. 敦煌莫高窟的风沙危害与防治问题. *中国科学(D 辑)*, 1997, **27**(1): 82~88.
- [27] 李实, 屈建军. 敦煌莫高窟的气象环境特征. *敦煌研究*, 1987, **7**(4): 1~11.
- [28] 中国科学院南京土壤研究所. *土壤理化分析*. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 7~59.