

敦煌莫高窟生态环境研究进展

杨小菊¹⁻³ 武发思¹⁻³ 贺东鹏¹⁻³ 徐瑞红¹⁻³ 汪万福¹⁻³

(1. 国家古代壁画与土遗址保护工程技术研究中心, 甘肃敦煌, 736200; 2. 古代壁画保护国家文物局重点科研基地, 甘肃敦煌, 736200; 3. 甘肃省古代壁画与土遗址保护重点实验室, 甘肃敦煌, 736200)

摘要 敦煌莫高窟因其地处我国八大沙漠之一的库姆塔格沙漠东南缘、鸣沙山东麓, 当地常年干燥少雨, 风大沙多, 洞窟围岩及壁画彩塑饱受积沙、风蚀、粉尘危害, 生态环境的综合治理一直是莫高窟保护的主要环境问题。本文在结合莫高窟遗产保护、资源利用、环境协调和生态健康等多位一体的可持续发展模式基础上, 回顾了莫高窟生态环境保护历程以及取得的成果, 包括莫高窟的风沙危害及防治、窟顶戈壁无灌溉生态恢复及洞窟水盐运移、人为扰动引起的洞窟微环境变化监测及生物多样性等; 阐述了以固为主, 固、阻、输、导相结合的风沙防治理念的深刻内涵; 以文物生态环境保护新理念为导向, 遵循“预防性、科学性保护”的原则, 提出在遗产保护的基础上发展旅游, 形成把旅游开发建立在生态环境和当地社会人文环境可承受范围内, 从戈壁荒漠植被恢复需水及洞窟水分来源出发, 提出了未来莫高窟的保护应遵循水分平衡、生物多样性及遗产预防性保护三大生态原则, 并为“一带一路”沿线极端干旱条件下文化遗产保护、传承、创新提供示范与借鉴, 追求文化与人类生存环境的和谐发展, 探索出一条文化遗产可持续发展道路。

关键词 敦煌莫高窟 生态环境 遗产保护 防沙治沙 可持续发展

引言

我国西部地区具有丰富的能源、矿产和旅游等资源, 但由于生态环境极其敏感、脆弱, 以及气候变化和人类活动等多重因素影响, 出现西部生态系统退化、环境污染严重、水资源短缺及风沙灾害频发等诸多问题。近年来, 政府提倡的生态文明建设与“丝绸之路经济带”战略等重要举措, 成为解决西部经济发展与生态环境保护矛盾的关键。地处我国西北干旱区东部地带的河西走廊, 作为古“丝绸之路”和现代“欧亚大陆桥”的咽喉要道, 具有十分重要的战略地位。丝绸之路沿线分布有大量的文化遗产, 随着经济的发展及公众意识形态的转变, 文化遗产地已成为全球重要的旅游目的地之一, 在旅游业发展战略中至关重要。

莫高窟地处我国八大沙漠之一的库姆塔格沙漠东南缘和鸣沙山东麓，干燥的气候环境、相对稳定的区域地质环境和比较偏僻的社会环境为石窟的保存提供了客观条件^[1]。但是洞窟壁画普遍存在着起甲、酥碱、疱疹、烟熏及生物侵蚀等多种病害，严重威胁着这类珍贵文化遗产的长久传承，壁画病害与保存环境有直接关系^[2-6]。风沙尘、人为扰动、NaCl等盐、强光、大的温差、较高的湿度波动及微生物等因素加速了壁画病害的产生和发展^[7-14]。

1 敦煌莫高窟生态环境特征

1.1 风沙危害

莫高窟地区受蒙古高压的影响，在当地盛行风的作用下，壁画、彩塑、洞窟围岩、窟前遗址等长期受到积沙、风蚀、粉尘及沙丘移动等危害^[15]。源自鸣沙山的风沙受偏南、偏西两股气流的影响在洞窟形成堆积，以及窟前防护林带灌溉水的共同作用，使洞窟下层1m以下的壁画几乎全部被毁^[16] [图(a)和(b)]。风沙流不仅对窟顶戈壁区造成侵蚀，而且在运行至窟顶临空面时产生气流反转，从而引起反向挟沙气流对崖面露天壁画的撞击、磨蚀，导致壁画褪色、变色。并且挟沙气流进入洞窟内，形成大面积沙尘覆盖 [图(c)和(d)]，沙尘附着在壁画表面，极难清除，给文物保护工作者带来了严峻的考验^[17]。



(a) 第96窟附近积沙



(b) 第72窟南壁积沙痕迹



(c) 特大沙尘暴中的九层楼

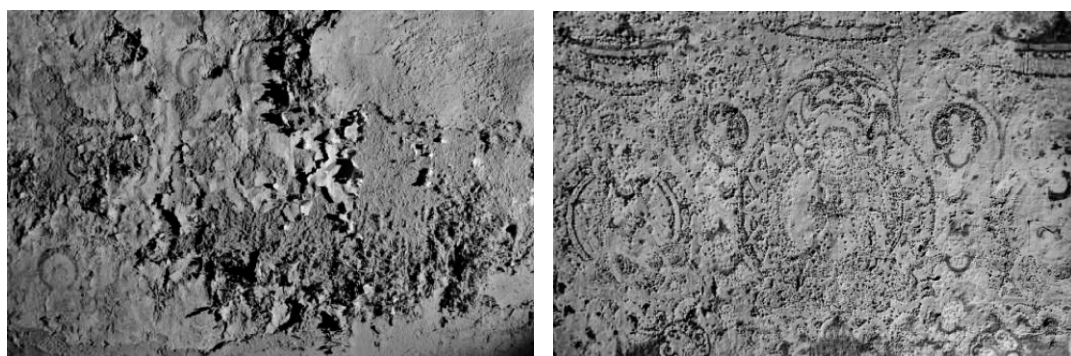


(d) 第16窟壁画彩塑表面降尘

图1 莫高窟风沙危害

1.2 水-盐运移

水是制约我国干旱区发展的主要环境要素之一，也是生态修复的关键因素。关于敦煌莫高窟水分来源的科学判断是敦煌文化遗产保护面临的主要技术瓶颈。水分是引起莫高窟壁画病害最活跃的因子，水分介导的盐分活动可引起壁画酥碱、疱疹、起甲、粉化、空鼓等多种严重病害发生^[1, 18, 19]（图2）。洞窟外部环境变化及游客参观等是引起岩体内部水-盐运移的主要因素，进而诱发洞窟壁画产生盐害。例如，突发性强降雨事件，入渗水分会携带可溶盐沿崖体裂隙和岩土体孔隙运移至壁画地仗层，诱发病害发生和发展，超渗水分则汇成地表径流，对崖壁造成冲蚀，甚至伴随着区域性洪水的发生^[20-22]；季节性的空气循环会带动水分蒸发，引起可溶盐的风化，从而使壁画剥落^[23]；窟前绿化灌溉入渗水以非饱和形式向底层洞窟运移，增加了底层洞窟的湿度；游客参观引起窟内温度、相对湿度上升，导致微生态环境变化^[1]；针对水分的吸收与释放对壁画的影响而进行的室内模拟试验表明，壁画在相对湿度较高的环境中会吸收水分，而在相对湿度较低的环境中会释放水分^[24]。



(a) 第26窟壁画酥碱

(b) 第135窟壁画疱疹

图2 水-盐运移引起的莫高窟壁画病害

1.3 气溶胶污染

沙尘气溶胶污染一直是莫高窟区域环境的主要污染物之一，尤其是春夏两季沙尘暴频发，窟外与窟内的大气颗粒物浓度高于秋冬两季^[25]，游客参观扰动引起的二次降尘在洞窟沙尘气溶胶污染中占重要贡献（图3）。窟内降尘主要来源于莫高窟窟顶不同地表类型二次起沙，当地表风速达到起沙风速，地表沉降物近距离运输，进入洞窟的粉尘对壁画彩塑的破坏速度缓慢，但破坏性强，使很多珍贵的壁画面目全非^[26]，尤其是粒径小、比表面积大的细颗粒物（ PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 等），更易于富集周围环境中的污染物，且悬浮在大气中的周期较长，不但磨蚀、污染壁画，而且进入破损壁画的缝隙间，加速起甲壁画、空鼓壁画的产生和发展^[2, 14, 26-32]。

1.4 生物活动危害

由于莫高窟地区干燥的自然环境，比较单一的地表类型，以及景观的破碎化程度高等，生物多样性较低，生态系统极其脆弱。生物多样性是构成文化遗产生态系统多样性的基础，也是文化



图3 莫高窟沙尘气溶胶污染

遗产生态系统维持稳定性的重要因素^[33]。莫高窟人工防护林带可改变风向、遮蔽阳光、阻挡风沙及减弱岩体风化^[34, 35]，但在历史时期，受风沙淹埋的部分下层洞窟，根系生长延伸至窟内，对壁画造成机械损伤，不过当前已不存在这一问题；昆虫不仅可以取食窟顶防护林嫩叶 [图4 (a) 和 (b)]，在洞窟内活动，对壁画产生力学损伤，其排泄物也可侵蚀壁画^[36, 37]。

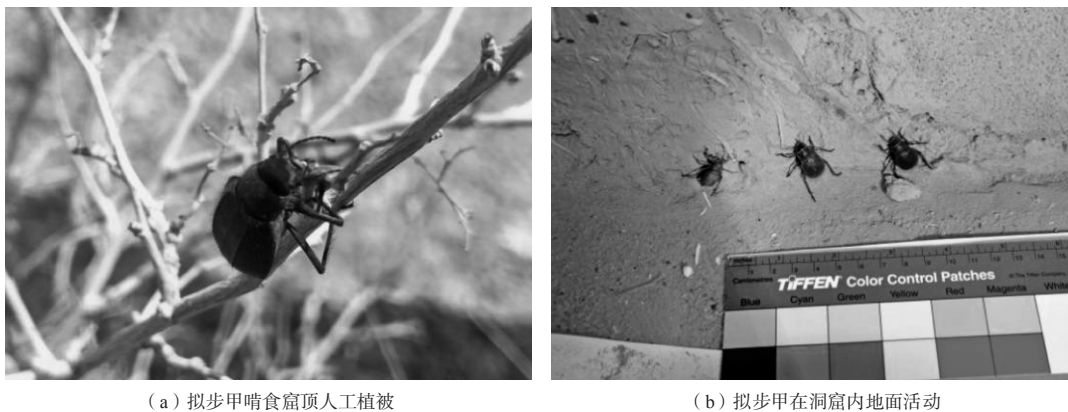


图4 莫高窟生物活动病害

2 主要研究进展

2.1 构建了“五带一体”的风沙危害综合防护体系

从根本上解决莫高窟地区的风沙危害问题，除与整个河西地区生态环境建设综合考虑外，还要结合莫高窟地区独特的风沙地貌特征及风沙运动规律，建立一个由工程、生物、化学措施组成的多层次、多功能的综合防护体系。在确保所采取的防治措施不给洞窟的永久保存带来任何间接或潜在威胁的前提下，使莫高窟的风沙灾害得到有效控制，从而明显地改善窟区生态环境质量，为世界文

化遗产地敦煌莫高窟的可持续发展提供重要保障^[38-40]。

目前,莫高窟窟顶综合防护体系以现有荒漠灌木林带的南端为起点,逐渐向北延伸,总长度2000m,宽度1300~2000m。其中高立式栅栏6395m,麦草方格沙障 $1.12 \times 10^6 \text{m}^2$,植物固沙带 $1.1 \times 10^5 \text{m}^2$,砾石铺压 $1.65 \times 10^6 \text{m}^2$,化学固崖 $3 \times 10^4 \text{m}^2$,窟区以防护林带配套工程为主^[4]。

鸣沙山前缘流动沙丘和平坦沙地阻固区包括半隐蔽式方格沙障和以滴灌技术为主的荒漠灌木林带。草方格沙障能促使风沙流携带的沙物质沉降,引起沉积物粒度分布结构的重新分布,增加粉粒和黏粒等细粒物质的含量,同时对降水有一定的截流效果,从而提高沙层含水率,有利于植物的定植^[41]。工程治沙见效快,但是不能从根本上解决沙害,植物固沙被认为是永久的治沙措施,流沙地表植被覆盖度达到50%以上时,地表风蚀基本得到控制^[8]。为了筛选适宜的植物种,汪万福等于1992年在窟顶定植多枝红柳(*Tamarix ramosissima* Lcdcb)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、梭梭[*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge]及沙拐枣(*Calligonum arborescens* Litv.)四种沙生植物苗进行栽培试验,结合滴灌技术,其成活率可达81.5%~100%。对四种固沙植物的物候、形态特征、成活率及防风固沙效应等因素分析,证明莫高窟窟顶实施植物固沙具有良好的前景^[42, 43]。人工植被的建立,增大了地表粗糙度,降低了风速,改变了微气候,为沙质地表的成土过程提供了更为适宜的母质粒度成分,从而为天然植被的演替创造了有利条件^[17]。通过风洞模拟试验和野外观测表明,当10m/s的低风速时,防护林带阻沙能力较强,阻滞风沙流达到90%,在风速为15m/s及以上中高速时,林带对风沙流的阻滞只有20%,明显减弱^[44]。

窟顶戈壁防护区包括砾石压沙带和空白带。张伟民等研究结果表明,鸣沙山相对稳定,对莫高窟的危害不大,就地起沙是莫高窟风沙危害的主要因素^[40]。植物及尼纶网等防护体系短期内可以阻挡风沙,但是积沙会给石窟造成新的隐患^[45],如何因势利导,使窟顶流场与风沙地貌达到一种动力平衡,是莫高窟综合防护体系成功与否的关键之一^[46]。因此,利用砾石来增加地表粗糙度,抑制风蚀危害^[47],砾石覆盖度在60%左右,戈壁床面形成比较稳定的状态,达到最佳的防护功效^[46]。薛娴等针对莫高窟顶的风沙地貌及戈壁地表特征,结合风洞模拟试验与野外观测,结果表明砾石形状和高度对增加地表粗糙度、抑制风蚀具有一定的作用,稳定床面具有特定的粒径和砾石覆盖度,如果形成稳定床面,应保持床面的稳定状态^[47]。

莫高窟窟顶崖面受到强风风蚀,化学材料固结能够防止岩体风蚀^[34]。李最雄等采用实验室模拟试验结合现场试验,表明高模数硅酸钾(PS)有较强的耐候性和耐紫外线辐射性,成本较低,对环境及人体健康影响较小^[48]。固沙后的沙胶结体能够加速水分下渗,提高沙层含水率,改善植物生长条件。因此,植物固沙结合化学固沙,在植被生态恢复中具有良好的前景。

为了减弱偏东风对洞窟围岩的强烈风蚀,窟前种植了以乔木为主的防风林带,改善了窟区微环境^[49]。汪万福等从窟前流场、崖面崖角形状及其受力等方面对其防护效应进行风洞模拟,结果表明,窟前防护林带形成了阻滞低风速区,削弱了崖角的风蚀危害^[35]。

由于综合防沙治沙体系的日趋完善,防沙效果明显增强(图5)。栅栏建立一年后的1991年,每年风季3~5月窟前栈道积沙明显减少。化学固沙、灌木林带等措施的实施及清沙对地表的扰动等因素,引起窟区积沙量变化(2000年)。2009年,莫高窟保护利用工程子项目——风沙防护工程的实施,形成一个由工程、生物、化学措施组成的综合性防护体系,窟前栈道积沙逐渐减少,并保持一个较稳定的动态平衡,防护的效果十分显著。

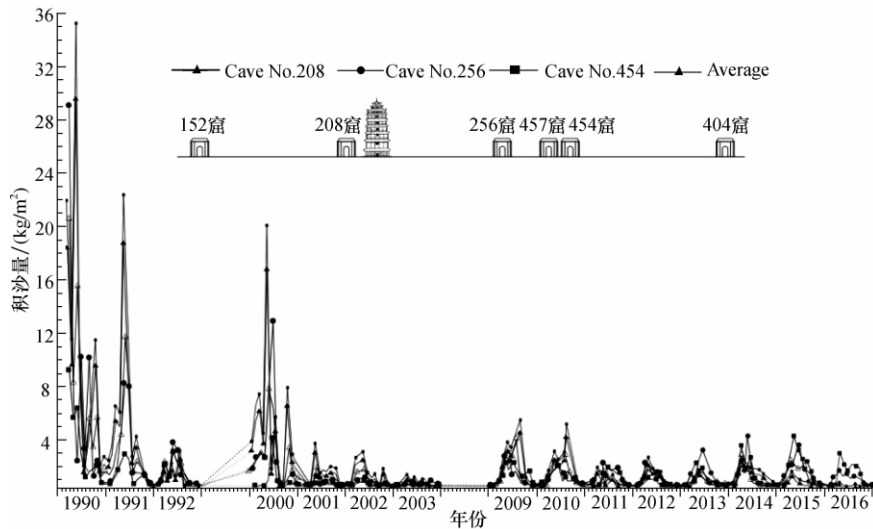


图5 莫高窟洞窟前栈道积沙量的月变化

2.2 莫高窟水分来源及生态利用方面取得重要进展

水分是莫高窟生态恢复的主要限制因子，同时也一直是洞窟文物保护研究的重要视角。李红寿等采用拱棚-空调凝结法封闭测定系统，对潜水埋深超过200m的莫高窟极干旱戈壁的环境分析表明，该区存在水分运转机制，可形成潜水蒸发，45天的监测表明，在潜水埋深超过200m的敦煌极干旱地区存在不少于0.0219mm/d的潜水蒸发^[50-53]。并采用隔绝对比试验印证了极干旱区深埋潜水蒸发的存在^[54]，盐分对极干旱土壤水分垂直分布有一定影响^[55]，洞窟水分的蒸发受围岩温度主导，围岩结合水分的分解与吸收，在分解与吸收的年过程中引导深层水汽向外运移与蒸发，而深层水分来源于潜水，温度年周期波动是引起洞窟潜水蒸发的根源^[56]。陈海玲等对莫高窟南区四个洞窟长达10年（2004~2013年）的环境数据分析表明，降雨促使开放洞窟相对湿度迅速上升，关闭洞窟能够及时阻隔窟外相对湿度波动对窟内的影响，这为敦煌莫高窟洞窟在极端环境下开放提供了依据^[57]。李红寿等用水同位素示踪原理研究表明，野马山区降水是党河水的来源，而党河是莫高窟地下潜水和洞窟蒸发水的合理来源，存在清晰的来源渠道：野马山降水→党河→党河潜水→莫高窟地下潜水→洞窟围岩水分→洞窟蒸发水分^[58]。同时，窟前防护林带采用少量、多次或滴灌结合喷灌的方式，将有助于减少水分在深层土壤的积累，防止深层土壤水分的侧渗对石窟造成威胁^[59]。

在对莫高窟潜水蒸发机理研究的基础上，本研究团队发明了一种利用地下潜水及降雨对干旱区荒漠化土地生态恢复的方法。具体地说，在干旱缺水的荒漠化地区，通过对不同粒径土壤的分选整理、沙下地膜的覆盖、水分引导等综合技术，达到充分利用地下深埋潜水和降水，进而实现荒漠化土地生态恢复的目的。主要适用于极干旱、干旱、半干旱地区戈壁沙漠的生态恢复，目前初步的无滴灌种植试验表明，该发明非常成功，具有十分广阔的应用前景。

2.3 沙尘气溶胶研究进展

针对莫高窟洞窟壁画、彩塑表面大气降尘污染,本课题组对洞窟内外TSP、PM_{2.5}及PM₁₀质量浓度、易溶盐含量、微生物群落结构等方面进行了全面深入的监测和研究。

汪万福等对莫高窟及敦煌农村大气环境研究表明(图6),莫高窟窟区和农村TSP质量浓度变化趋势基本一致,连续6年TSP质量浓度年平均值也比较接近,分别为0.3077mg/m³和0.3494mg/m³[28]。敦煌农村秋季农业焚烧秸秆等活动使得TSP质量浓度较高,莫高窟距离农村较远,基本不受农业活动影响[60]。

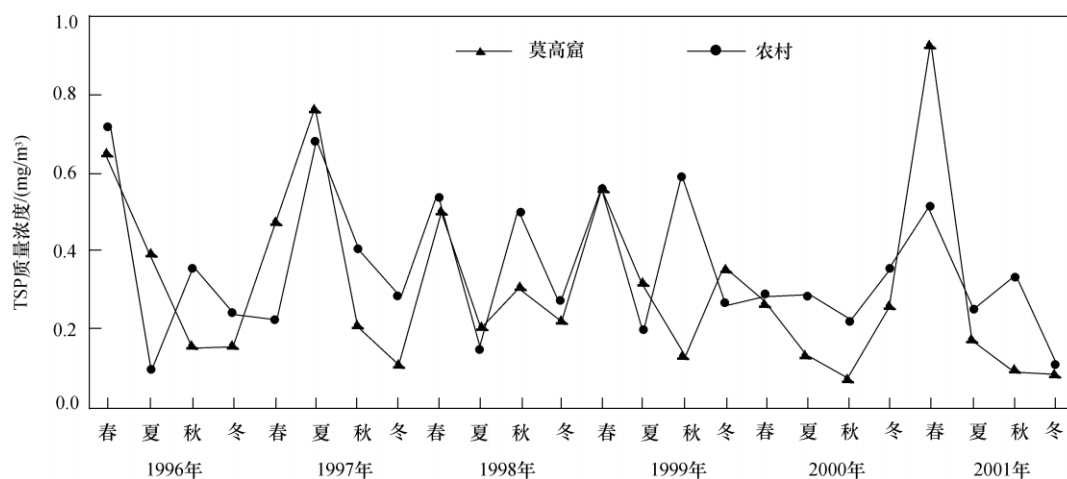


图6 莫高窟和农村TSP质量浓度的年际变化及季节变化(1996~2001年)

徐瑞红等对莫高窟窟外与第16窟窟内PM_{2.5}、PM₁₀浓度季节变化研究表明(图7),窟外环境和第16窟窟内环境大气颗粒物浓度PM_{2.5}与PM₁₀变化趋势基本一致,在春夏两季的波动性较强,秋冬季节较为平稳。这是因为莫高窟地区春季、夏季沙尘天气较多,数据的波动较大[25]。

图8样品编号S1~S8分别表示为:晴朗天气—窟内PM_{2.5}、沙尘天气—窟内PM_{2.5}、晴朗天气—窟内PM₁₀、沙尘天气—窟内PM₁₀、晴朗天气—窟外PM_{2.5}、沙尘天气—窟外PM_{2.5}、晴朗天气—窟外PM₁₀、沙尘天气—窟外PM₁₀。

2014年9月20日,敦煌地区出现特大沙尘暴天气,窟内外PM₁₀和PM_{2.5}中可溶性离子总量均有不同程度升高,Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、Na⁺、K⁺、Mg²⁺和Ca²⁺浓度增加,其中SO₄²⁻和Ca²⁺浓度占有绝对优势,对总离子浓度贡献起了重要作用。可见,沙尘暴天气引起的邻近区域干盐湖、盐渍土等地壳源对颗粒物中水溶性离子比例的影响占主要地位。

武发思等针对游客量较多的“五一假期”(图9),对洞窟外环境及第16窟洞窟内PM_{2.5}和PM_{10-2.5}空气颗粒物中真菌群落特征研究表明,在属的水平上,洞窟外PM_{2.5}中以链格孢属(*Alternaria*, 14%)、隐球菌属(*Cryptococcus*, 10%)、枝孢属(*Cladosporium*, 5%)和细基格孢属(*Ulocladium*, 4%)为主,洞窟外中以半乳糖霉菌属(*Galactomyces*, 10%)和地霉属(*Geotrichum*, 1%)为主;洞窟内PM_{2.5}中为链格孢属(29%)、枝孢属(11%)、隐球菌属

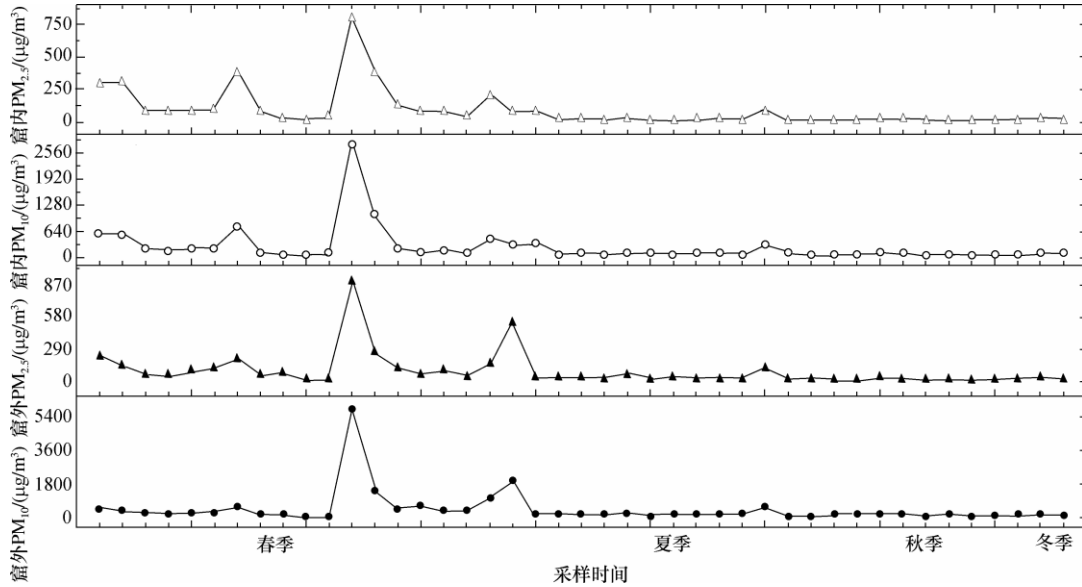


图7 窟外、第16窟窟内大气颗粒物PM_{2.5}与PM₁₀浓度季节变化趋势

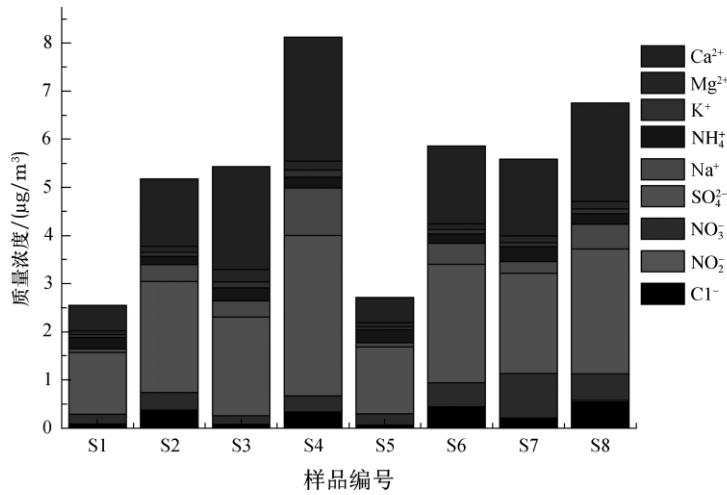


图8 窟内外晴朗天气和沙尘天气下PM_{2.5}和PM₁₀中可溶性离子浓度变化

(10%)、*Guehomyces* (3%) 和曲霉属 (*Aspergillus*, 3%)，洞窟内PM_{10-2.5}中以半乳糖霉菌属 (10%)、青霉菌属 (*Penicillium*, 3%)、囊酵母属 (*Zygoascus*, 2%) 和布氏白粉菌属 (*Blumeria*, 2%) 为主。真菌群落结构在洞窟内外差异明显。洞窟稳定的微环境及大量游客参观对窟内环境的扰动可能是引起窟内PM_{2.5}和PM_{10-2.5}中真菌群落组成与结构变化的关键因素^[30]。

2.4 生物危害机理研究取得进展

贺东鹏等以第88窟前的银白杨作为研究对象，采用探地雷达系统，在探测区域-150~-20cm

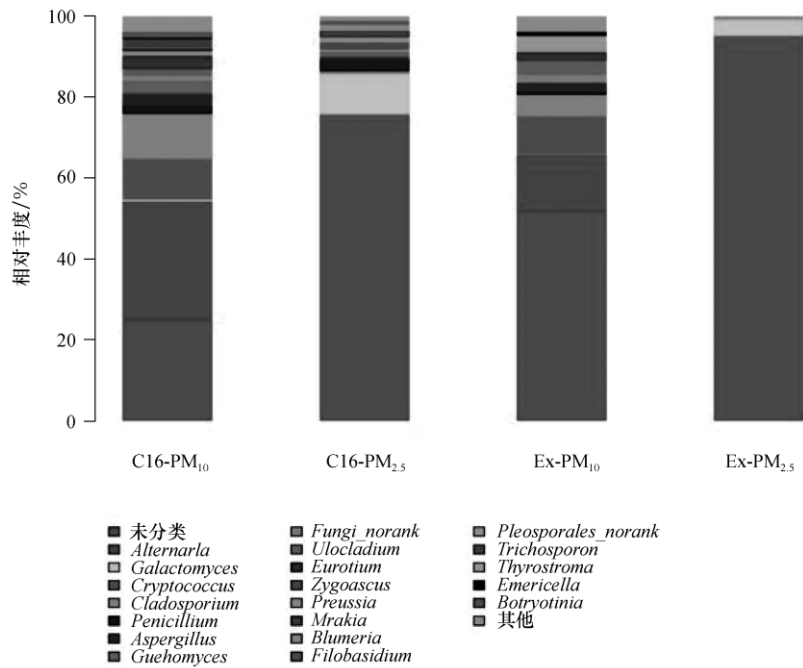


图9 空气颗粒物中真菌在属水平上群落特征

深度范围内,发现根系的分布呈现东侧、南侧与北侧分布密集,西侧稀少的特征,并有直径大于50cm的根系向洞窟方向延伸,这将会对洞窟的安全造成一定威胁,建议采取相应保护措施^[61]。

汪万福等针对仿爱夜蛾成虫对莫高窟壁画的损害,现场调查结合室内模拟试验结果表明,受洞窟温度、相对湿度影响,成虫数量在底层洞窟分布较多,其排泄物不仅污染壁画,而且残余物中的酸性物质对壁画发生腐蚀^[36, 37, 62];将模拟洞窟置于莫高窟第53窟,结果表明8~9月份是成虫病害高峰期,壁画颜料明度可以影响成虫趋向性,成虫比较偏好靛蓝、铁红和墨^[63];成虫在壁画表面活动时,其爪部接触冲击和拍翅行为加速了起甲、酥碱等病害,并导致壁画的脱落^[64, 65]。

综上所述,敦煌莫高窟风沙综合防护体系的构建,以及洞窟窟门、防沙门的安装,有效地阻止、截留了沙尘进入洞窟;部分开放洞窟前室、甬道的木质地板,也对进入洞窟的沙尘有一定的缓冲作用;甬道两边的玻璃屏风,不仅避免了游客触碰壁画,而且有效地隔离了游客参观扰动引起的灰尘污染;防护林带合理的灌溉,避免了水分向洞窟的迁移;生物多样性的研究,为有效地治理壁画生物病害提供了数据支撑。在文物预防性保护背景下,莫高窟保护区及窟内生态环境的改善,是文物的完好赋存与传承不可或缺的组成部分。

3 问题与展望

随着公众认识的不断深化和保护理念的不断更新,文物保护的内涵与外延都发生了巨大变化。文物保护已经成为社会科学、自然科学和工程技术等科学技术领域相互渗透融合的交叉学科。同时,“十三五”时期,文物保护要实现“两个转变”:由注重抢救性保护向抢救性与预防性保护并

重转变,由注重文物本体保护向文物本体与周边环境、文化生态的整体保护转变,确保文物安全。莫高窟文物的保存现状和维护工作得到了我国政府的高度重视,也广受世界不同国家的关注,对其保护不仅限于石窟本体,还包括与其共存的环境^[66, 67]。这种理念的转变,对莫高窟的预防性保护来说,既是挑战,又是千载难逢的机遇。

因此,敦煌莫高窟生态环境的改善主要结合生态学、生物学、环境科学及文物保护等学科,从洞窟支撑体病害的防治、风沙治理、水分平衡及旅游开放等方面入手,构建文物赋存的生态环境大数据平台,不断更新防护体系。基于文物预防性保护理念,在遗产保护的基础上合理发展旅游,尽可能减弱人为扰动对文物赋存生态环境的影响,把旅游开发建立在生态环境和当地社会人文环境可承受范围内,形成可持续开放的良好发展模式。同时,莫高窟生态环境保护应该从全国性资源环境问题出发,紧密结合河西走廊地区社会经济发展、生态环境建设的需求,进行区域资源合理开发、生态环境恢复与治理、社会经济发展规划等研究工作。敦煌地区生态环境的改善,不仅是丝绸之路文化遗产保护的基本需求,也是事关中国整个西部地区实现可持续发展的重大举措。

致谢:本研究受国家自然科学基金(31560160、31500430)、甘肃省科技计划项目(18JR3RA004, 1604WKCA003)和甘肃省文物局课题(201609)资助。

参 考 文 献

- [1] 张明泉,张虎元,曾正中,等.敦煌莫高窟保护中的主要环境问题分析[J].干旱区资源与环境,1997,11(1):34-38.
- [2] 李最雄.丝绸之路石窟壁画彩塑保护[M].北京:科学出版社,2005.
- [3] 王旭东,苏伯民,陈港泉,等.中国古代壁画保护规范研究[M].北京:科学出版社,2013.
- [4] 汪万福.敦煌莫高窟风沙危害及防治[M].北京:科学出版社,2018.
- [5] Wang W, Ma X, Ma Y, et al. Seasonal dynamics of airborne fungi in different caves of the Mogao Grottoes, Dunhuang, China [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2010, 64(6): 461-466.
- [6] Qu J, Cao S, Li G, et al. Conservation of natural and cultural heritage in Dunhuang, China [J]. Gondwana Research, 2014, 26(3-4): 1216-1221.
- [7] Zhang W, Tan L, Zhang G, et al. Aeolian processes over gravel beds: field wind tunnel simulation and its application atop the Mogao Grottoes, China [J]. Aeolian Research, 2014, 15(335-344): 335-344.
- [8] Wang W, Dong Z, Wang T, et al. The equilibrium gravel coverage of the deflated gobi above the Mogao Grottoes of Dunhuang, China (EI) [J]. Environmental Geology, 2006, 50(7): 1077-1083.
- [9] 张国彬,薛平,侯文芳,等.游客流量对莫高窟洞窟内小环境的影响研究[J].敦煌研究,2005,(4):83-86.
- [10] Guo Q L, Wang X D, Zhang H Y, et al. Damage and conservation of the high cliff on the Northern area of Dunhuang Mogao Grottoes, China [J]. Landslides, 2009, 6(2): 89-100.
- [11] Uno T, Xue P, Takabayashi H. Influence of solar radiation on the deterioration of the mural paintings in Mogao Cave 285 [J]. Conservation Science, 2010, 49: 111-118.
- [12] Li G S, Wang W F, Qu J J, et al. Study on temperature and humidity environment of grotto 72 at the Mogao Grottoes in Dunhuang, China [J]. International Journal of Climatology, 2013, 33(8): 1863-1872.
- [13] 周启友,李禾澍,王冬,等.莫高窟108窟内空气温湿度变化过程及其对窟内水汽和热量来源的启示[J].文物保护与考古科学,2018,30(3):51-60.
- [14] Ma Y, Zhang H, Du Y, et al. The community distribution of bacteria and fungi on ancient wall paintings of the Mogao Grottoes [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 7752.

- [15] 唐玉民, 孙儒侗. 敦煌莫高窟大气环境质量与壁画保护 [J]. 敦煌研究, 1988, (3): 15-22.
- [16] 孙儒侗. 回忆石窟保护工作 [J]. 敦煌研究, 2000, (1): 24-29.
- [17] 汪万福, 张伟民, 李云鹤. 敦煌莫高窟的风沙危害与防治研究 [J]. 敦煌研究, 2000, (1): 42-48.
- [18] 郭青林. 敦煌莫高窟壁画病害水盐来源研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- [19] 赵海英, 李最雄, 韩文峰, 等. 西北干旱区土遗址的主要病害及成因 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (增2): 2875-2880.
- [20] 王旭东, 郭青林, 李最雄, 等. 敦煌莫高窟洞窟围岩渗透特性研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31 (10): 3139-3144.
- [21] 刘洪丽, 王旭东, 张明泉, 等. 敦煌莫高窟降雨分布及入渗特征研究 [J]. 文物保护与考古科学, 2016, 28 (2): 32-37.
- [22] 张正模, 刘洪丽, 郭青林, 等. 突发性强降雨对莫高窟洞窟微环境影响分析 [J]. 敦煌研究, 2013, (1): 120-124.
- [23] Miura S, Nishiura T, Zhang Y J, et al. Microclimate of Cave Temples 53 and 194, Mogao Grottoes [A]/Conservation of Ancient Sites on the Silk Road: Proceedings of an International Conference on the Conservation of Grotto Sites [C]. The Getty Conservation Institute, Los Angeles, 1997: 294-300.
- [24] Zhang H Y, Yan G S, Wang X D. Laboratory test on moisture adsorption-desorption of wall paintings at Mogao Grottoes, China [J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2012, 13(3): 208-218.
- [25] 徐瑞红, 武发思, 张国彬, 等. 敦煌莫高窟大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的季节变化分析 [A] // 海峡两岸气溶胶技术研讨会论文集 [C]. 2015.
- [26] 屈建军, 张伟民, 王旭东. 敦煌莫高窟大气降尘的初步观测研究 [J]. 环境研究与监测, 1992, (3): 8-12.
- [27] 刘立超, 沈志宝, 王涛, 等. 敦煌地区沙尘气溶胶质量浓度的观测研究 [J]. 高原气象, 2005, 24 (5): 765-771.
- [28] 汪万福, 王涛, 沈志宝, 等. 敦煌莫高窟区大气环境成分的监测分析 [J]. 高原气象, 2006, 25 (1): 164-168.
- [29] 张二科, 曹军骥, 王旭东, 等. 敦煌莫高窟室内外空气质量的初步研究 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2007, 24 (5): 612-618.
- [30] 武发思, 汪万福, 贺东鹏, 等. 基于454测序的莫高窟大气颗粒物中真菌群落特征分析 [A]. 海峡两岸气溶胶技术研讨会论文集 [C]. 2015: 344-352.
- [31] Mikayama A, Hokoï S, Ogura D, et al. The effects of windblown sand on the deterioration of mural paintings in cave 285, in Mogao caves, Dunhuang [J]. Journal of Building Physics, 2018: 1-20.
- [32] Tan L, Zhang W, Qu J, et al. Aeolian sediment transport over gobi: field studies atop the Mogao Grottoes, China [J]. Aeolian Research, 2016, 21: 53-60.
- [33] 申华敏, 王世宏, 王小鹏, 等. 齐峰文化遗产的环境系统特征承载力及保护原则 [J]. 环境科学与技术, 2006, 29: 58-62.
- [34] 屈建军, 张伟民, 王远萍, 等. 敦煌莫高窟岩体风蚀机制及其防护对策研究 [J]. 中国沙漠, 1994, 14 (2): 18-23.
- [35] 汪万福, 安黎哲, 冯虎元, 等. 敦煌莫高窟窟前林带防护效应的风洞实验 [J]. 中国沙漠, 2009, 29 (3): 383-390.
- [36] 汪万福, 马赞峰, 蔺创业, 等. 昆虫对石窟壁画的危害与防治研究 [J]. 敦煌研究, 2002, (4): 84-91.
- [37] 汪万福, 蔺创业, 王涛, 等. 仿爰夜蛾成虫排泄物对敦煌石窟壁画的损害及其治理 [J]. 昆虫学报, 2005, 48 (1): 74-81.
- [38] 屈建军, 张伟民, 彭启龙, 等. 论敦煌莫高窟的若干风沙问题 [J]. 地理学报, 1996, 51 (5): 418-425.
- [39] 朱震达. 中国沙漠化研究的进展 [J]. 中国沙漠, 1999, 19 (4): 299-311.
- [40] 张伟民, 王涛, 薛嫻, 等. 敦煌莫高窟风沙危害综合防护体系探讨 [J]. 中国沙漠, 2000, 20 (4): 409-414.
- [41] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [42] 汪万福, 李云鹤, 阿根纽, 等. 莫高窟地区生物固沙植物种选择试验报告 [J]. 敦煌研究, 1993, (3): 98-118.
- [43] 汪万福, 李云鹤, 林博明. 莫高窟崖顶植物固沙试验研究 [J]. 敦煌研究, 1996, (3): 112-135, 186-187.
- [44] 汪万福, 李最雄, 刘贤万, 等. 敦煌莫高窟顶灌木林带防护效应研究 [J]. 中国沙漠, 2004, 24 (3): 306-312.
- [45] Li G S, Qu J J, Han Q J, et al. Responses of three typical plants to wind erosion in the shrub belts atop Mogao Grottoes, China [J].

- Ecological Engineering, 2013, 57: 293-296.
- [46] 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 [J]. 中国沙漠, 2004, 24(2): 187-190.
- [47] 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 [J]. 地理学报, 2000, 55(3): 375-383.
- [48] 李最雄, Neville A, 林博明. 莫高窟崖顶的化学固沙实验 [J]. 敦煌研究, 1993, (1): 89-119.
- [49] Li G S, Qu J J, Li X Z. The effect of microclimates in the aeolian sand environment at the Mogao Grottoes, China [J]. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 2013, 1(24): 89-105.
- [50] 李红寿, 汪万福, 郭青林, 等. 敦煌莫高窟干旱地区水分凝聚机理分析 [J]. 生态学报, 2009, 29(6): 3198-3205.
- [51] 李红寿, 汪万福, 张国彬, 等. 极干旱区深埋潜水蒸发量的测定 [J]. 生态学报, 2010, 30(24): 6798-6803.
- [52] Li H S, Wang W F, Zhan H T, et al. New judgement on the source of soil water in extremely dry zone [J]. Acta Ecologica Sinica (International Journal), 2010, 30(1): 1-7.
- [53] Li H, Wang W. Determination and analysis of phreatic water evaporation in extra-arid dune region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(2): 116-122.
- [54] 李红寿, 汪万福, 柳本立, 等. 用隔绝法对极干旱区土壤水分来源的分析 [J]. 干旱区地理 (汉文版), 2013, 36(1): 92-100.
- [55] 李红寿, 汪万福, 武发思, 等. 盐分对极干旱土壤水分垂直分布与运转的影响 [J]. 土壤, 2011, 43(5): 809-816.
- [56] Li H S, Wang W F, Zhan H T, et al. Water in the Mogao Grottoes, China: where it comes from and how it is driven [J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(1): 37-45.
- [57] 陈海玲, 陈港泉, Neville A, 等. 开放参观对莫高窟洞窟微环境的影响 [J]. 文物保护与考古科学, 2017, 29(6): 10-17.
- [58] 李红寿, 汪万福, 詹鸿涛, 等. 应用氢氧稳定同位素对极端干旱区蒸发水分来源的确定 [J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7436-7445.
- [59] 郑彩霞, 秦全胜, 汪万福. 敦煌莫高窟窟区林地土壤水分的人渗规律 [J]. 敦煌研究, 2001, (3): 172-177.
- [60] Du M Y, Wang W F, Yonemura S, et al. Evaluation of regional dust emission with different surface conditions at Dunhuang, China [J]. Journal of Arid Land Studies, 2016, 26(1): 1-7.
- [61] 贺东鹏, 武发思, 徐瑞红, 等. 探地雷达在莫高窟窟区树木根系探测方面的应用 [J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(2): 86-91.
- [62] 汪万福, 蔺创业, 张国彬, 等. 甘肃境内石窟寺中壁画有害生物调查及防治对策 [J]. 敦煌研究, 2009, (6): 30-35.
- [63] 汪万福, 武发思, 张国彬, 等. 仿爰夜蛾成虫对敦煌莫高窟模拟壁画的选择趋性 [J]. 昆虫学报, 2013, 56(10): 1181-1188.
- [64] 汪万福, 吉爱红, 武发思, 等. 仿爰夜蛾成虫在莫高窟模拟壁画表面的运动行为及其损害机理 [J]. 昆虫学报, 2014, 57(6): 703-709.
- [65] Ji A H, Wang W F, Yan J F, et al. Locomotive and adhesive behavior of *Apopetes spectrum* on murals in Mogao Grottoes, Dunhuang [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 461(19): 235-240.
- [66] 樊锦诗. 简述敦煌莫高窟保护管理工作的探索和实践 [J]. 敦煌研究, 2016, (5): 1-5.
- [67] 樊锦诗. 为了敦煌久长远存——敦煌石窟保护的探索 [J]. 敦煌研究, 2004, (3): 16-21.