

用耗散结构理论对莫高窟园林用水的分析

李红寿

(敦煌研究院,敦煌 736200)

摘要:通过莫高窟园林用水的调查,发现平均灌溉量为 8366mm,远高于敦煌农田的灌水量 2250mm,并且全部通过土壤表面蒸发和植物蒸腾耗散掉了。这就出现了一个实际用水量很高的地方,它仍然表现为缺水的悖逆现象。而且也远大于以水面为基础当地的耗散量 2486mm。应用 Penman 的蒸散指数、Thornthwaite 的蒸散指数、Holdridge 生命地带指标等进行比较研究,结果仍然不能解释莫高窟存在的现象。通过对于莫高窟的温度、光照、湿度、风速、热量、土壤结构、浇灌方式等与水耗散有关的因子进行深入的分析后,发现这个现象与耗散结构理论相吻合。应用耗散结构理论解释了在莫高窟园林用水中存在的一个似非而是的问题。水的耗散结构理论对西北干旱地区的水资源利用有重要意义。应用耗散结构理论与前人对水分耗散方面的研究并不矛盾,完全可以在这一理论指导下统一起来,有望建立起统一的水分耗散应用模型。同时对与耗散结构理论相关的熵问题进行了探讨,认为这个问题与时间问题一样,是认识的主体——人的心理错觉,并没有物质上的实质。

关键词:敦煌莫高窟;园林用水;耗散;年蒸发量;耗散结构;阈值;耗散结构点;熵

文章编号:1000-0933(2006)10-3454-09 中图分类号:Q142,Q945.17,Q948 文献标识码:A

The application of the dissipative structure theory to the water consumption of gardens at the Mogao Grottoes

LI Hong-Shou (Dunhuang Academy, Dunhuang 736200, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3454 ~ 3462.

Abstract: An investigation on the water consumption of gardens at the Mogao Grottoes indicates that the average amount of total water irrigation 8366 mm has been dissipated through evaporation of soil surface and transpiration of plants, in which the water consumption is much higher than 2250 mm of irrigation for farmland and 2486mm of local dissipation based on the water surface. This phenomenon shows a paradox: There is much more water consumption, there will be more shortage of water. The comparative research with Penman's Evapotranspiration Index, Thornthwaite's Evapotranspiration Index, and Holdridge's Life Zone System can not explain this phenomenon at the Mogao Grottoes. An intensive study and analysis of the factors associated with the water dissipation, including the temperature, daylight, humidity, wind speed, heat, soil structure, and irrigation methods, shows that this phenomenon is consistent with the theory of Dissipative Structure, which can be used to explain the paradoxical issue in the water consumption of the gardens at the Mogao Grottoes. The application of the Dissipative Structure Theory is of great importance for the effective utilization of water resources in the Northwest arid area. A practical model of water dissipation can be set up based on this theory. Finally the paper discussed the concept of entropy related to the Dissipative Structure Theory, and pointed out that the entropy has no material substance, and just like the problem of time, it is only a psychological illusion of man, the main body of understanding.

Key words: Dunhuang Mogao grottoes; garden waters; dissipation; year of vaporize mete; dissipative structure; threshold point; point of dissipative structure; entropy

位于甘肃河西走廊西端的敦煌莫高窟遗存有 4~14 世纪的精美绝伦的壁画 45000m² 彩塑 2000 余身,石窟艺术素有“世界艺术长廊”之称,加之在 1900 年发现的五万余卷遗书,在此基础上进而形成了一门综合性的新

收稿日期:2005-07-05;修订日期:2006-06-10

作者简介:李红寿(1970~),男,甘肃秦安人,主要从事莫高窟生态环境研究。E-mail:dhhs69@163.com

Received date:2005-07-05; Accepted date:2006-06-10

Biography:LI Hong-Shou, Engaged in environment of the Mogao grottoes. E-mail:dhhs69@163.com

学科——敦煌学。1987年莫高窟因独一无二的文化价值被联合国教科文组织列入世界文化遗产清单^[1]。这些文物绝大多数是泥质材料建造,非常脆弱,具有不可再生性。文物的保护与外界的气候环境关系密切,大型遗址的气候环境直接决定着文物保存寿命的长短。莫高窟气候非常有利于泥质文物的保存,上千年的泥质文物能够保存至今,很大程度上得益于干燥少雨的气候条件。然而这里存在风沙频繁,昼夜温差、光照强烈等对文物的保护不利的条件。在改善不利条件中,利用水资源进行植被生态建设是很有效的途径。植被生态系统在防风治沙,减轻风沙对崖面的侵蚀,缓和温度变化等方面具有重要作用。但是水分也有可能通过崖体的渗透对壁画、泥塑等产生潜在的危害。因此进行莫高窟生态用水的调查研究对于文物保护具有十分重要的意义。

这里水资源匮乏,每年夏季出现供水不足的情况,直接制约着生态建设。但是通过年供水总量的计算,发现平均灌溉量为8366mm,远高于敦煌农田的灌水量2250mm,高出近4倍。调查发现这里的地层地质构造和灌溉方式使水分渗漏量很少,可以忽略。这样8366mm的灌溉量全部通过土壤表明蒸发和植物蒸腾耗散掉了。也就出现了一个实际用水量很高的地方,它仍然表现为缺水的悖逆现象^[2]。而且也远大于以水面为准的耗散量,即敦煌气象站测定的年蒸发量2486mm^[3]。应用谢良尼诺夫水热指数、Gaussen的干旱指数、Kira的热量指数、布迪科的辐射干燥指数、Penman的蒸散指数、Thorntwaite的蒸散指数、Holdridge生命地带指标等^[4]进行比较研究,结果仍然不能解释莫高窟存在的现象。通过对于莫高窟的温度、光照、湿度、风速、热量、土壤结构、浇灌方式等与水分消耗有关的因子进行深入的调查与分析后,发现它与耗散结构理论相吻合。莫高窟是一个与水相关的各个因子共同形成的耗散结构的典型。应用耗散结构理论与前人对水分耗散方面的研究并不矛盾,完全可以在这一理论指导下统一起来,有望建立起统一的水分耗散应用模型,对水分耗散进行更准确计算,同时对与耗散结构理论相关的熵问题亦进行了探讨。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

莫高窟位于敦煌鸣沙山东麓,由于大泉河水的长期冲刷和地质的变迁,在酒泉组的胶结岩上形成了南北走向的河谷,洞窟就开凿于高约30~40m的西岸崖体上。大泉河是一条长15km的泉源河,平均流量为0.11m³/s。莫高窟年用水量达2.38×10⁶m³,灌溉面积为28.4hm²。年平均单位灌溉量8366mm。

1.2 研究方法

在确定了年平均单位灌溉量的前提下,通过分析确定水分的最终流向及其数量;分析与水分耗散相关的各个因子,以各个因子在这里的特殊性解释巨大水分耗散的可能性;通过耗散结构理论进行综合,对大量水分耗散做出合理解释。

2 水分耗散流向

在较长时间土壤水分动态平衡过程中,可以假定植物根系分布层的水分在动态过程前后水分含量相同,那么一定灌溉面积上的土壤水分的平衡是:

$$\text{灌溉量} = \text{树木蒸腾量} + \text{土壤蒸发量} + \text{侧渗量} + \text{下渗量}$$

如果确定了树木蒸腾量和土壤蒸发量,就能确定侧渗量和下渗量。2002年测量窟前林带的年蒸腾量为3449mm^[5]。这样只要测出土壤蒸发量,就可确定地下部分的侧渗量和下渗量。在莫高窟选用一定面积做实验,无论是灌溉量还是侧渗量,要对它们在实际灌溉的动态变化中应用实验仪器进行精确测定,由于条件所限,难以办到。后根据分析,如果试验面积过小,由于边际效应沙质土壤侧渗严重,试验面积加大,影响变小,于是产生一个大胆的想法,何不对莫高窟园林用地整体进行考虑呢?整体进行年考虑,小地块之间的侧渗可以不管,这样就技术性解决了侧渗问题。只剩下潜流问题的调查研究。利用莫高窟的河堤加固工程的施工、考古发掘、试验、园林挖沙换土、水网改造,对莫高窟地下土质及水分分布情况进行调查^[2],在莫高窟没有潜流存在,即园林用水灌溉后,并没有渗到岩层后汇集形成潜流,流出莫高窟。由于小地块灌溉,每次浇水量较少,土壤下层的胶结岩层上不会出现积水,如果出现灌溉过量,在下层胶结岩面出现积水,很快会被四周的

土壤反渗透吸收。因此,下渗量可以作忽略处理。这样:

$$\text{土壤蒸发量} = \text{灌溉量}(8366\text{mm}) - \text{植物蒸腾量}(3449\text{mm}) = 4917\text{mm}$$

园林用水的最终去向是,有 59 % 的灌溉用水以土壤为介质被蒸发掉了,只有 41 % 的水量被植物吸收利用后又以蒸腾的形式蒸腾掉了。

3 水分耗散的相关因子分析

由上可知,大量的园林用水,主要通过植物蒸腾和土壤蒸发,将液态的水转化为汽态水蒸气而流失。那么是哪些结构因子使蒸发量达到了这样惊人的水平呢?主要有气候因子、土壤结构和盐分、灌溉方式等。

3.1 气候因素 影响蒸发的气候因素主要有五大因子:

(1) 温度 敦煌年平均温度为 10.6,最高气温 40.6,最低 - 21.5^[6],不但年温差变化大,而且日温差变化也剧烈。

(2) 光照 光照强度高可达 1.1kw/sqm,年全日照时数为 2962h,日照率 73%,光照是直接引起地温。地温变化的主要原因,夏季据测定沙表温度达 70^[7]。

(3) 干燥的空气湿度 相对湿度 32%,干燥指数 32^[8]。

(4) 多风 敦煌是典型的大陆性干旱气候,年平均风速为 3.5m/s,春季 3~5 月份平均风速 4.1m/s,最大风速 20.2m/s,大风和沙尘天气分别占全年 48%、47.5%^[9],6~8 月份干热风频发(表 1),这些强烈地影响水分的蒸发。

(5) 降雨量 敦煌年降雨量为 23.2mm,降雨量极少,一般集中在 6、7、8 三个月,约占全年降水的 58%^[3]。与人工灌溉量相比,莫高窟降雨量较小,本文未将降雨量计入灌溉量。高温(高温差)、干燥的空气、强烈的光照、多风同样对于园林用水耗散有极大的影响,它们各因素之间相互作用,始终与蒸发量之间成正相关,唯有与降雨量为负相关,但是这里降雨量极少,时间很短,对蒸发量没有产生根本性的影响。这样气象因素,相互协同作用于土壤、空气、植被等介质,使水很快地蒸发,在整个生态系统内部各因子之间围绕着水进行着不断的能量交换,促使系统内部始终处于动态变化之中。

表 1 敦煌(1954~1980 年)各级干热风出现的日数和频率统计表^[5]

Table 1 Statistics of the number of days and frequency for the dry and hot wind of various levels at Dunhuang (1954~1980)^[5]

	6 月 June			7 月 July			8 月 August			Total 合计
总日数 Number of days	5	6	27	4	5	19	30	4	7	102
频率 Frequency (%)	4.9	5.9	26.5	3.9	4.9	18.6	29.4	3.9	2.0	100
强过程 Strong intensity	3	0	18	0	0	16	20	0	0	57
频率 Frequency (%)	5.3	0.0	31.6	0.0	0.0	28.1	35.1	0.0	0.0	55.9
中过程 Middle intensity	2	6	9	4	5	3	10	4	2	45
频率 Frequency (%)	4.4	13.3	20.0	8.9	11.1	6.7	22.2	8.9	4.4	44.1
出现率率 Yearly percentage	2/27	3/27	8/27	2/27	3/27	7/27	9/27	2/27	1/27	

3.2 土壤结构和盐分的作用

土壤湿度、成分和结构对水分的蒸发有着非常重要的影响。莫高窟窟前以沙砾土和沙壤土为主,持水量 12%~18%,存水最大含量为 9%~13%,饱和含水量为 25%~30%^[8],相比较而言持水性较差。莫高窟沙地土壤取样组成如成分下表(表 2)。

这样的土质导温率大,热容量很小,使土壤在较大深度范围内有一个较大的温度变化。随着光照、气温变化的日交替进行,土壤温度也不断的变化。土壤上层和土壤下层产生显著的差异,水汽压随之变化产生水汽运动。白天土壤温度高,土壤水汽压大,蒸发量大,夜晚水汽压急剧下降,下层温度高于表层,水汽不断由底层向表层蒸发。由于基质以粗砾砂为主,粘附在表面的粉沙质土壤有很强的毛管吸水能力,其上升高度可达 2.0~3.0m^[10]。潮湿的土壤孔隙内充满了水,热容量加大,温度变化趋缓和,不利于水分的蒸发,相反,缺水干燥的土壤得热失热后,升降温度迅速而显著,利于水分的蒸发。土壤从微观上看都是粗细不一的颗粒,有一定空隙。土壤颗粒的尺度越小,表面积越大,但空气流动性变小,蒸发一般在浅表层土壤进行。颗粒尺度变大,

单位体积表面积减小,但空气流动变大。所以,由于莫高窟的园林土壤结构,使得蒸发面积增大,趋于立体结构蒸发,而非表层蒸发。

表 2 莫高窟沙地土壤机械组成^[7]

Table 2 Mechanical composition of the soil particles in the profiles of Mogao Grottoes

层位 Depth (cm)	各粒级径(mm) 颗粒含量(%) Percent content of grain size						
	砾石 Gravel	极粗沙 Very Coarse	粗沙 Coarse	中沙 Moderate sand	细沙 Fine sand	极细沙 Very Fine sand	粉沙 Silt
	>2.00	2.00~1.00	1.00~0.50	0.50~0.25	0.25~0.125	125~0.063	0.063~0.002
0~15	2.70	8.93	8.10	6.13	19.97	42.33	11.83
15~57	21.14	17.58	20.17	15.82	10.23	9.69	5.40
57~89	24.64	11.84	7.90	9.88	15.48	18.88	11.38
89~100	30.28	14.95	7.85	8.92	15.49	18.51	4.0

大泉河水在莫高窟这一区域含盐量很高(表 3),普遍存在蒸发后盐碱泛白现象,尤其春季,在有些地块可厚达 2~3cm,土壤中累积的盐分在每次灌溉后溶解,又随着蒸发作用析出,形成结晶,微观上盐份结晶体使蒸发面积以几何倍数增大。结晶随着每次浇水的反复进行,在蒸发过程中扮演着重要角色,起着重要作用。

3.3 灌溉方式与耗水量

灌溉方式是在目前莫高窟园林用水耗散过程中

可以直接人为控制的因素,由于灌溉量的不同,耗水量有明显不同:长年无地上供水;仅靠反渗透吸收地下水;灌溉量较少和灌溉量充分来分析。

3.3.1 无灌溉(降雨)的情况

$$\text{耗散量} = \text{反渗透量} = \text{植物蒸腾量} + \text{土壤蒸发量}$$

这里耗散量的大小取决于反渗透的多少,这又与水位的高低和土壤的渗透能力相关。当地下水较低,则外界的变化对土壤的反渗透影响不大,反渗透趋于恒定。在莫高窟由于地下有深厚的胶结岩体存在,反渗透极为有限,夏季没有人工灌水,莫高窟的生态系统将必然完全崩溃。

3.3.2 当有灌溉(包括降雨)存在,但每次的浇灌量较小时。水的下渗不能到达地下水位线,则:

$$\text{耗散量} = \text{植物蒸腾量} + \text{土壤蒸发量} = \text{浇灌量} + \text{反渗透量}$$

在水位较低时,反渗透很难满足一般植物的生长需要,主要依靠灌溉水(降雨),灌溉水将全部转化为耗散水。莫高窟园林用水属于这种情况。

3.3.3 当灌溉量一次过多,水下渗到地下水平面,则:

$$\text{耗散量} = \text{植物蒸腾量} + \text{土壤蒸发量} = \text{浇灌量} - \text{下渗量}$$

过量浇水浇水造成浪费。在莫高窟,出现浇灌过量,下渗将被岩层阻隔,通过侧流侧渗,最终被四周的土壤吸收而耗散。

由上分析可知,如果地下水位较低,灌溉量相对较小,由于反渗透量有限,耗散量近似的等于灌溉量。地下岩层的存在与否对耗散并没有决定性的影响,主要取决于一次性的灌溉量,也可以说取决于灌溉方式。因此,巨大的水分耗散并不是具有岩层阻隔的地质结构所特有的现象,可以较为普遍地发生。

灌溉方式对水的耗散影响很大,在这里与莫高窟前林带滴灌情况做一比较。首先介绍一下窟前林带的用水状况:窟前林带 1999 年以前一直采用土渠漫灌的方式,年浇灌量为 9240mm^[6]方式对洞窟安全保护有潜在危害,后改用滴灌系统。目前灌溉量是 4667mm。

因此,采用滴灌(4667mm),可比大面积的漫灌(8366mm)省水 3699mm。灌溉是以保证植物正常生长为前

表 3 铁道部第一勘测设计院 1984 年检测大泉河水质

Table 3 Water quality of the Daquan River analyzed by the First Survey & Design Institute of China Railways in 1984

项目 Caions	含量 Content (mg/L)	项目 Anions	含量 Content (mg/L)
Na ⁺ , K ⁺	462.38	HCO ₃ ⁻²	239.18
Ca ⁺²	142.28	Cl ⁻	463.79
Mg ⁺²	25.16	SO ₄ ⁻²	829.00
Al ⁺³	40.001	NO ₃ ⁻	3.46
蒸发固形物 Nonvolatile content	2392.65	总硬度 Total hardness	14.00 (ml/L)

提的,采用漫灌这种方式,为了保证土壤持水量不低于萎蔫系数,就得以每年 30 次左右的次数进行。这种灌溉方式造成了水分的大量耗散。

4 耗散结构理论

由上分析可知,莫高窟园林用水主要通过漫灌方式,以粗质沙壤(包括盐分)和植被为介质,通过气象因子,高温干燥的空气,强烈的光照和空气对流(风)等综合作用,将园林用水通过植物蒸腾和土壤蒸发的方式消耗掉了。耗水量之巨大,与通常情况比较,处于非直线比例状态。这完全吻合耗散结构理论。

该理论指出:“一个远离平衡态的复杂系统,各元素的作用具有非线性特点,正是这种非线性的相关机制,导致了大量离子的协同作用,突变而产生了有序结构”。I. Prigogine 把远离平衡的非线性区域形成的新的稳定的有序结构,称为耗散结构^[11]。

非线性是指两个量之间没有像正比例那样的直线关系。远离平衡的区域不在局限于要素间单一的线性组合,在系统内部存在着复杂的联系和作用。莫高窟园林用水是一个完全开放系统下,耗散处于远离平衡的非线性状态,系统各要素之间存在着非线性的相关机制,这很好地符合了耗散结构理论的要求。

人们对莫高窟园林用水耗散结构建立数学的结构、功能模型。数学模型是一个系统的基本要素,与其关系的数学表达。它的建立有助于科学地了解水分耗散的动态耗散过程,对水需求做出预测。

这里建立一个耗散速率(D),与参变量湿度(h)、温度(t)、光照强度(l)、土壤基质(e)、植被(p)、空气流动(w)、降雨(r)的确定性数学模型:

$$D = f_h(h)f_t(t)f_l(l)f_e(e)f_p(p)f_w(w)f_r(r) = f(h, t, l, e, p, w, r)$$

它是一个多变量的方程,每个参变量对应这一个子系统,如土壤基质(e)与水分耗散相关的参量有:土壤湿度,土壤导热性、基质粗细程度、空隙度的大小、空气的流动速率、盐分、温度之间需进一步建立数学模型,综合每一个子系统后,形成一个耗散结构数学模型,在通过实验检验加以调整,达到实用的程度。这是一项比较复杂的工作,需要大量的资料和野外的调查,更需要在实验室内提供可靠的数据。因此具有实用性的耗散结构数学模型是必需的。

耗散结构的形成是各相关因子相互协作的结果。其耗散功能是它结构的反应,反过来其耗散结构是这一功能的基础。如果这一结构的一部分,比如,只有土壤结构、盐份、植被、水等的有形因子相互作用,而无形因子部分,如气象因子不存在,或者某些项目达不到一定的阈值,耗散结构不能形成,起不到非线性的耗散作用。在莫高窟园林用水的耗散过程中可能存在这样一个阈值,只有在温度、光照、风、漫灌等因子的强烈的作用下才能促其共同形成耗散结构,起其耗散结构的作用。莫高窟园林用水在 3~11 月份的绝大部分时间里处于耗散结构状态,使园林用水以极高的效率耗散掉。

5 耗散结构的阈值

一般情况下,田间含水量很低时蒸发很小,随着田间持水量的增大,蒸发量逐渐增大,含水量大于田间持水量,蒸发速度接近水面蒸发,土壤的蒸发速度至最大,且稳定不变^[10]。但如果有耗散结构出现,蒸发速度将大于水面蒸发速度。可将这一蒸发速度的转折点作为土壤耗散结构形成的阈值。利用阈值可即时判断是否有耗散结构出现。

在气象学中,年蒸发量^[12]是指某地全年的每日水面蒸发量之和。在全国各县气象站,水面蒸发量的观测是用小型蒸发器测定的,小型蒸发器测定的蒸发量不能

代表实际的水面蒸发量,但与实际水面蒸发量仍有一定的相关性。年蒸发量是以水面为基础来测量某地年度蒸发量,这样忽略了蒸发点的实际基质,主要包括土壤结构,植被盐份等综合因素。在中国的广大地区,尤其

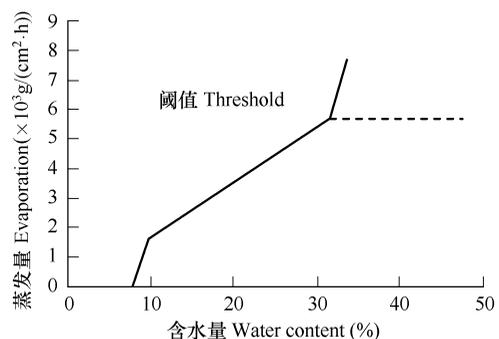


图1 砂壤土的蒸发速度

Fig. 1 The sandy soil evaporate rate

在南方,潮湿多雨,很少有大范围的耗散结构出现,或者说各耗散因子的协同作用处于阈值之下,因此这种测量结果与实际蒸发量仍有很大的相关性。测量是以水面的湿度为准,人们通常认为水面是湿度的极限,很容易将这种方法测得的蒸发量误认为是年最大蒸发量。

在不考虑植物的蒸腾量时,气象站测定的年蒸发量是在宏观上判断土壤是否存在耗散结构的一个关键点。如果大于这一数值,说明有耗散结构出现,低于则没有耗散结构出现。如果考虑植物的蒸腾量时,即为耗散量,当它的值大于对应的植物蒸腾量与年蒸发量之和时,则有耗散结构出现。在一次性浇水不过量的情况下,可用浇水量来判断是否有耗散结构出现。如莫高窟窟前林带的以敦煌气象站测定的年蒸发量(2486mm)加上林带蒸腾量(3499mm)是5985mm,5985mm就是耗散结构点。采用漫灌时,浇水量为9240mm,大于这一数值,有耗散结构出现;采用滴灌后,灌溉量为4667mm,小于5985mm,不存在耗散结构。因此,我们把年蒸发量与植物蒸腾量之和,称为耗散结构点,用来宏观判断是否有耗散结构。

按照耗散结构理论,一个远离平衡的开放系统,无论是力学的、物理的、化学的、生物学的,还是社会的、经济的系统,如果某系统不断地与外界交换物质和能量,在外界条件变化过渡到一定程度,系统内部某个参量变化过渡到一个临界值时,经过涨落系统可能发生突变,即非平衡相变。系统产生耗散结构的内部动力学机制,正是子系统间的非线性相互作用,在临界点处,非线性机制放大微涨落为巨涨落,使热力学分支失稳,在控制参数越过临界点时,非线性机制对涨落产生抑制作用,使系统稳定到新的耗散结构分支上。莫高窟水的耗散结构可以较完整的体现这些特性,如水分、光照、风力空气湿度等的变化都可能引发突变,因此莫高窟水的耗散结构是在不同时间、空间尺度上,以不同强度发生着。

6 莫高窟水分耗散结构的效应

莫高窟年耗水 $2.38 \times 10^6 \text{ m}^3$,按汽化热 $2.3 \times 10^6 \text{ J/kg}$,合计为 $5.5 \times 10^{15} \text{ J}$,年耗散能量为 $1.94 \times 10^{10} \text{ J/m}^2$,远高于莫高窟窟顶单位面积的全年太阳辐射量 $6.38 \times 10^9 \text{ J/m}^2$ 。

莫高窟按照林带面积计算年耗能不小于 $5.5 \times 10^{15} \text{ J}$,远大于进入系统的太阳辐射能 $1.8 \times 10^{15} \text{ J}$,在稳定温度,保持环境稳定中有至关重要的作用。水的耗散主要是降温作用,高温时耗散量大,抑制升温作用强,低温时耗散量减小,水体释放热量起到热量平衡作用。水的耗散结构同时是能量的耗散结构,小气候温度的非线性表现。

由上面的计算结果可知,在莫高窟水分耗散中利用风中的热能和动能的总量,是太阳辐射能的2倍以上,前人在水分耗散研究中只利用太阳辐射能作为能量基础显然估计不足。

园林用水在这一生态过程中作为能量的载体,综合着各相关因子,使小气候具有生态“空调”的作用。植物林带的蒸腾作用和土壤蒸发与气象因子正相关,可以消耗大量的热能,使环境内的能量主要通过空气流动带出到环境外,使夏季小气候内出现“致冷降温”现象。

莫高窟在整个生长季节莫高窟能够保持与敦煌市日最高温度相差低 0.96 ,主要是通过水系统的耗散结构及其相关生态系统的协同作用来实现的。莫高窟增温效应平均是 2.91 ,低 0.96 这一结果是地形结构等的增温、保温作用与水的耗散等降温作用相抵消后的。因此,水的耗散、生态等的综合作用使日最高温度的降低实际上不少于 3.87 。

图2中莫高窟,窟顶(11.02)日温度变化范围小,气温更稳定,波动范围小于敦煌(16.20)绿洲,小的温差有利于文物的保护。莫高窟日较差较敦煌小 5.18 ,体现了很高的温度稳定性。

7 水系统能量平衡分析与水分耗散结构

大量的园林用水,主要通过植物蒸腾和土壤蒸发,将液态的水转化为汽态水蒸气而流失。这其中存在巨大的能量交换和流动。对一个开放系统的热能变化进行研究,首先将研究对象视为一个相互之间错综复杂的体系,对它进行系统分层划分为:向下包涵子系统,中间是系统,向上被环境包围。在系统中能量的变化由两个部分组成:

$$E = E_i + E_e$$

式中, E 是总能量变化, E_i 是系统内部的子系统与系统交换的能量, E_e 是外界环境与系统发生能量交换而产生的能变。对于开放系统整体而言,也就是在这个尺度上,如果认定系统是稳定存在的,则 E 在单位时间内的变化必须是相对稳定的,假定在 d 内波动,那么:

$$E_i = d - E_e$$

假定当系统从外部环境获得能量时, E_e 为正值,反之,为负值,那么子系统与它们的能量交换为:

(A) 当 $E_e > 0, d > 0, E_e > d$ 时, $E_i < 0$, 子系统对系统的提供的能量为负值,子系统从系统吸收能量。

(B) 当 $E_e > 0, d > 0, E_e < d$ 时, $E_i > 0$, 子系统对系统提供能量。子系统给系统释放能量。

(C) 当 $E_e > 0, d < 0$ 时, $E_i < 0$, 子系统对系统的提供的能量为负值,子系统从系统吸收能量。

(D) 当 $E_e < 0, d > 0$ 时, $E_i > 0$, 子系统对系统提供能量。

(E) 当 $E_e < 0, d < 0, E_e > d$ 时, $E_i > 0$, 子系统对系统提供能量。

(F) 当 $E_e < 0, d < 0, E_e < d$ 时, $E_i < 0$, 子系统对系统的提供的能量为负值,子系统从系统吸收能量。在一个开放系统中,一般处于线性平衡的动态状态,即随吸收热量的增加温度增高。如果此系统比较稳定,那么会呈现非线性,进入系统的能量达到一定值时,系统要么通过环境交换能量,或通过子系统分担(分流),要么与环境和子系统同时进行交换,才能使系统保持稳定,在 d 内波动。如前面分析,莫高窟温度比较稳定,反过来证明了水的耗散结构的存在,这一温度表现正是耗散结构的作用。

在莫高窟划定崖体到河道两岸之间,南北长 1600m,高 40m,在胶结岩层之上的空间区域为系统区域,向外为环境,内部包涵水系统、土壤系统、植被系统等相互交错的子系统。子系统很难以具体的空间划分。

当进入系统的能量过多时,系统与子系统进行能量交换,引发子系统的结构发生突变,使相互关联其它各子系统协同作用,在子系统(小尺度上)形成稳定的耗散结构,是从环境、系统中不断吸收能量来形成和维持的,无序中产生有序。通过非线性的耗散结构“泵出”能量,使系统(大尺度)保持相对稳定(准稳态);或通过风带出热能;或通过辐射、水耗散等使系统的能量变化在一定范围 d 内波动,即在 A、C、F 3 种情况下,水系统从系统吸收能量。相反,系统能量流失过多时,子系统及环境通过辐射补充能量,即在 B、D、E 3 种情况下,水系统对系统提供能量。否则系统崩溃而形成新的系统。

水系统在这一生态过程中作为能量的载体,综合着各相关系统,在能量的转换中有至关重要的。外部环境主要以光能、风能等进入系统;系统向外以热辐射的形式流出系统,流向子系统主要是以水的耗散向系统吸收能量。

E 是进入、流出系统的太阳能、风能、热辐射、生物能、水耗散等全部能量综合得失后,系统在单位时间内的总的能量变化量。即:

$$\text{太阳辐射量} + \text{随空气流入的总能量变化} + \text{系统与土壤水体等子系统之间交换的能量} > 0$$

系统表现为温度升高,相反则表现为系统降温。一个稳定的系统由于 d 值稳定,因此表现在系统温度上应比较稳定,温度较差值较小。莫高窟通过大量的水分耗散使日较差较敦煌小 5.18,是温度非线性的综合表现。

8 讨论

8.1 谢良尼诺夫水热指数是利用植物生长季节日平均温度的积温与降水量的比值来表示水热系数;Caussen 的干旱指数是以月降雨量和月平均温度为基础的;Kira 的热量指数是以低于或高于 5 的月平均温度总和为基础提出干湿度指数的;布迪科的辐射干燥指数是蒸发量、降水量、地面辐射差额,蒸发潜热为基础的方程。

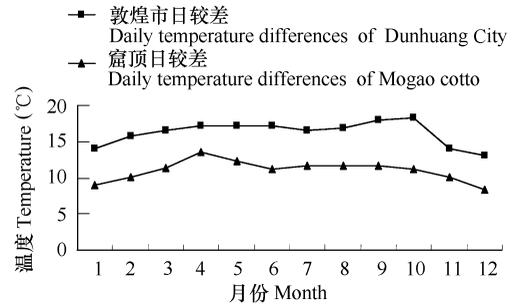


图2 2004年窟顶、敦煌市日较差比较

Fig.2 Comparative Graph of the daily temperature differences between the top of the Mogao Grottoes and Dunhuang City

Penman 的蒸散指数是利用净辐射量和水汽压在一定温度下空气干燥率以及风速来确定蒸散的; Thornthwaite 的蒸散指数根据实验求出的可能蒸散与月平均温度下的经验关系; Holdridge 生命地带指标中可蒸散量是以温度和年降雨为基础的。由于水分耗散的相关因子较多, 很显然以上与水分耗散有关的研究中它们没有一个能够涵盖与水分耗散相关的全部因子, 这些因子主要包括空气的温度、湿度、光强度(热辐射量)、风速; 土壤质地(盐分); 土壤的湿度和温度(灌溉方式); 海拔等相关因子。这些因子之间的关系很复杂, 在大量实验和数学分析下, 有可能建立实用的方程应用于实践。

8.2 这里水的耗散与蒸发力^[4]是同一概念。是指在一定气候条件下, 保证供给水分使土壤经常保持不低于田间持水量的情况下, 一定土壤-植被蒸发面在单位时间内的蒸发量。又称为“最大可能蒸散”或“潜在蒸散(PE)”的概念。它们为了解决相关问题, 是以与黑箱模型类似经验系数调整, 或可能在当时研究者所在地这些问题表现不太突出而做忽略处理了。总之, 没有体现出在开放系统下的逻辑上的完整与严密性, 不能体现不同情况下即时的相互关系, 也不能在不同尺度概念下的灵活体现各个因子变化的关系, 说到底是没有统一的理论指导。也正是这个原因造成了名词术语重叠与并行。其实蒸发力等概念完全可以用耗散结构原理中的“耗散”的意思表示它们。表示某一物质在系统中由一种状态转变为另一种状态, 也可以用来表示能量的耗散, 此时“耗散结构”状态并不一定存在。所谓耗散结构是指一种状态, 是一个动态过程, 这里的每一个因子都是它的组成成分, 不仅包括传统观念上的有形的物质结构, 而且包括能量非有形的东西。不同于传统观念将“有形”和“无形”分开, 按照传统观念“无形的”就是条件, “有形的”就是结构。耗散结构是二者的结合, 是“功能结构”。这样可以根据状态分成无耗散结构和耗散结构状态。这是一个观念问题, 是一个时间尺度问题, 有形结构只不过存在的时间相对较长而已。温度、湿度等是这一过程这一状态的表现“性状”。

8.3 在耗散结构中普里高津把系统与外界交换的能量、物质叫熵流, 但是同时引进了一个“序”的问题, 确定了熵是反映物质粒子混乱程度的物理量。随着熵概念的泛化, 产生了许多争论的问题。这个问题其实与时间问题一样, 是认识的主体——人的心理错觉。时间是人的心理无意识地经常假定一种“相”(对自己感受到的现象的确定), 时时假定, 时时对比的心理反映, 在动力学中, 没有任何东西能够区别过去和将来。这种假定我们往往不能自觉而已, 过去、现在和将来之间的区别只是一种幻觉。同样“序”的问题, 也是心理错觉, 并没有物质上的实质, 是有意识地认定的一个“状态”作为基础, 发现热平衡的结果一般是偏离了原来的状态, 便认为是混乱度增加了, 于是认为“熵”总是在增大, 物质的演化总是朝熵增加、向混乱的方向进行。

在莫高窟水的耗散结构中, 通过水热平衡分析可以看到, 液态水在吸收了大量能量后, 由液态水变成气态水, 如果按照熵的概念, 应当气态水的混乱度比液态水的大。而从莫高窟宏观看, 由于水分耗散温度反而下降, 这与热力学第二定律中一切与热现象有关的实际宏观过程都不可逆的相矛盾。在热力学第二定律的相关解释中常用的一个例子是: 一根与外界绝热的金属棒, 如果初始时棒上各点温度不均匀, 随着时间的推移, 高温部分将把热量传给低温部分, 最后达到棒上温度均匀分布; 没有外界的传热作用, 棒上的温度分布永远不会回到初始状态。将莫高窟这一系统区域看作是“一个棒”, 在水耗散结构下能量进入的结果是温度降低, 如果水分凝结降雨, 温度可以恢复到原来状态, 也就是说在自然降雨尺度上看, 水蒸气凝结放热, 温度升高恢复到原来温度是完全可能的。开放系统可以存在状态的自循环。再试问, 水蒸气的状态应当比水加热量的状态更有序, 是熵减小了呢还是按照热力学第二定律熵永远朝增大的方向应当增大呢? 其实, 热力学给人们提供的带有“时间箭头”的物理图像, 仍然与时间一样是心理问题。因此, 熵的概念中对于混乱度的问题仍然是相对概念, 本质仍然是由于“著相”而被自己欺骗了。同样, 不可逆性是一种幻觉, 是一种主观印象。开放系统中应用第一热力学定律, 可以完整准确的理解能量平衡, 不必再自找麻烦。不存在一种状态比另一种状态更有序的问题。用一种“相”和另一种“相”比较是没有意义的。因此本文使用能量进行水热平衡分析, 而不是熵。

8.4 应用耗散结构理论准确地解释了在莫高窟园林用水中存在的一个似非而是的问题。从景观生态学来看, 莫高窟园林绿地处于大泉河流域这一斑块的边缘地带, 大泉河河水最终在莫高窟被消耗殆尽。一般在绿洲景观边缘地带, 在不同尺度下广泛存在着耗散结构, 通常也将其效果称之为边际效应。在水资源有限的情

况下盲目扩大种植面积,将加强耗散结构的功能,植被自身的生长也能起到同样的作用。类似地从较大范围看,河西走廊干旱地区,主要靠祁连雪水的供给形成了石羊河流域、黑河流域、疏勒河等流域的绿洲,但在水资源利用上同样存在这样的问题,无节制的土地开发,使自然的供水平衡被打破,水位急剧下降,极易在整个区域形成耗散结构,进入耗散结构状态,水资源将被过度消耗,出现透支,从而引发生态环境的大范围的退化,出现荒漠化。从宏观上看,耗散结构一旦从生态斑块的边缘出现向内迁移,这将是绿洲开发度的警戒点和休止符。应用耗散结构理论对西北干旱地区的水资源利用和水分实用数学模型的建立有重要意义。

References:

- [1] Zhu L C. Dunhuang. Beijing: Chung Hwa Book Co. , 2001 , 9:18 ~ 80.
- [2] Li H S. The research in garden 's water at Mogao Grottoes. Dunhuang Research , 2005 ,4 :92.
- [3] Agriculture Climate Handbook (resource and compartment) . Dunhuang Weather Station edit , 1981 . 10. 20.
- [4] Song Y C. Vegetation Ecology. Shanghai : Huadong Normal University Press , 2001 . 147 ~ 155.
- [5] Zheng C X , Qin Q S , Wang W F. A study on the soil water permeation of the woodland nearby the caves of dunhuang Mogao Grottoes. Dnuhuang Research , 2001 , (3) :173 ~ 177.
- [6] Zheng C X , Qin Q S , Wang W F. A estimate of the limits of transpiration for irrigation trees in front of the grottoes , Dunhuang Research , 2002 , (4) 97 ~ 101.
- [7] Wang W F , Li Y H , Neville Agnew. An experiment with sand-fixation plant on cliff top of the Mogao grottoes. Dunhuang Research ,1996 , (3) :114.
- [8] Wang W F , Wang Tao , Li Z X. The effects of blown sand on the shrub belt over the top of Mogao grottoes. Acta Ecologica Sinica , 2004 , (24) :2493.
- [9] Zhang GJ , Li Z X. The cliff 's illness research of the Northern Area of Mogao Grottoes. Dunhuang Research ,2004 , (4) :72.
- [10] Ling C G. Agrology. Beijing :Agriculture Press , 1981 , 74 : 67 ~ 69.
- [11] Cai X M. Ecosystem ecology. Beijing :Science Press ,2000. 31 ~ 33.
- [12] Beijing Forestry University eds. Agriculture Meteorology. Beijing :Agriculture Press ,1981. 258 ~ 259.

参考文献:

- [1] 褚良才编著. 敦煌学简明教程. 北京:中华书局出版发行,2001,9:18~80.
- [2] 李红寿. 莫高窟园林水资源调查及园林用水分析. 敦煌研究,2005,4:92.
- [3] 敦煌气象站编. 农业气候手册(资源与区划),1981,10:20,11.
- [4] 宋永昌著. 植被生态学. 上海:华东师范大学出版社,2001,147~155.
- [5] 郑彩霞,秦全胜,汪万福. 敦煌莫高窟区林地土壤水分的入渗规律. 敦煌研究,2001,(3):173~177.
- [6] 郑彩霞,秦全胜,汪万福. 敦煌莫高窟区树木蒸腾耗水量的估算. 敦煌研究,2002,(4):97~101.
- [7] 汪万福,李云鹤,阿根纽,等. 莫高窟崖顶植物固沙试验研究. 敦煌研究,1996,(3):114.
- [8] 汪万福,王涛,李最雄,等. 敦煌莫高窟顶灌木林带防风固沙效应. 生态学报,2004,(24):2493.
- [9] 张国军,李最雄. 莫高窟北区崖体病害. 敦煌研究,2004,4:72.
- [10] 林成谷主编. 土壤学. 北京:农业出版社,1981,74:67~89.
- [11] 蔡晓明编著. 生态系统生态学. 北京:科学出版社,2000.31~33.
- [12] 北京林业大学主编. 农业气象. 北京:农业出版社,1981.258~259.