

# 水分蒸散耗散结构的初步验证<sup>\*</sup>

李红寿<sup>1,3</sup>, 汪万福<sup>1,2,3</sup>, 张国彬<sup>1,3</sup>, 邱飞<sup>1,3</sup>, 詹鸿涛<sup>1,3</sup>

(1. 敦煌研究院保护所, 甘肃 敦煌 736200; 2. 兰州大学 生命科学学院, 兰州 730000; 3. 古代壁画保护国家文物局重点科研基地, 甘肃 敦煌 736200)

**摘要:**在极干旱区的敦煌莫高窟应用称重法测定蒸散量, 对比分析土壤粒径、盐分、水分、气候状况、植物种类等对蒸散的影响。发现水分蒸散与各因子之间存在广泛的非线性关系和非线性作用机制, 符合耗散结构理论成立的条件和特征要求。各相关因子都是蒸散的结构构成, 它们的综合作用可使蒸散强度呈非线性表现。蒸散强度是各因子共同作用形成的结构功能, 当土壤、气象、水分、植被等蒸散因子在波动涨落中发生协同共振时即可形成耗散结构, 使蒸散强度表现出或高或低的非线性分岔突变。水分耗散结构是蒸散因子在时空异质性的综合表现, 在各地的水分蒸散中普遍存在。初步证明耗散结构理论应用在水分蒸散中是适宜的。

**关键词:** 蒸散; 水分; 土壤; 气候; 耗散结构

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)06-0200-05

## The Primary Proof— Testing of the Evapotranspiration Dissipative Structure in the Extreme Dry Area

LI Hong-shou<sup>1,3</sup>, WANG Wan-fu<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Guo-bin<sup>1,3</sup>, QIU Fei<sup>1,3</sup>, ZHAN Hong-tao<sup>1,3</sup>

(1. The Conservation Institute of Dunhuang Academy, Dunhuang, Gansu 736200, China; 2. The Life Science Academy of Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China; 3. Key Scientific Research Base of Conservation for Ancient Mural (Dunhuang Academy) State Administration for Cultural Heritage, Dunhuang, Gansu 736200, China)

**Abstract:** Through measuring the water evapotranspiration by weighing at Dunhuang Mogao Grottoes in the extreme dry area, the factors affecting on evapotranspiration, such as the size of soil grain, salt, water, climate status, the kind of vegetation and etc., were comparatively analyzed, and the nonlinear relationship between the factors and evapotranspiration were found. The evapotranspiration and the factors have a wide nonlinear active mechanism, fitting in the conditions and characters of the existence of the dissipative structure theory. All relative factors are the elements of the evapotranspiration. The integrate action makes evapotranspiring intensity nonlinear state. The intensity of the evapotranspiration is a structure function formed by all factors. When the factors of soil, weather, water, vegetation and etc. fluctuate the cooperating resonance, the dissipative structure will be formed, and the evapotranspiring intensity shows a branching and great variance with a higher or lower nonlinearity. The dissipative structure prevalently exists everywhere in the evapotranspiration system. It is an integrate reflecting a spatio-temporal heterogeneity of evapotranspiring factors. The theory of dissipative structure is testified primarily, reflecting it is suitably applied in the evapotranspiring processes.

**Key words:** evapotranspiration; water; soil; weather; dissipative structure

自1967年普利高津提出耗散结构理论后, 在物理学、化学等科学领域产生了广泛而深远的影响<sup>[1-3]</sup>, 耗散结构理论是指: “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”<sup>[4]</sup>。普利高津把远离平衡的非

\* 收稿日期: 2009-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(40671022, 40940005); 敦煌研究院院级课题

作者简介: 李红寿(1970-), 男, 馆员, 主要从事生态环境、防沙治沙和文物保护等方面的研究。E-mail: dhlhs69@163.com

线性区形成的新的稳定有序结构,称之为耗散结构。该理论也被广泛应用到水土保持领域<sup>[4,6]</sup>。土壤<sup>[7-9]</sup>、植被<sup>[10]</sup>、气候<sup>[11]</sup>与蒸散存在着复杂的相互影响,它们是构成蒸散系统的重要因子。就某个因子的影响而言,蒸散的微观物理学原理已相当成熟,但它们的综合作用是否能够在宏观上形成耗散结构,值得探讨。笔者发现敦煌莫高窟年降雨量仅 42.2 mm,而年灌溉量高达 8 366 mm,即使有这样高的灌溉量,树木夏季的综合表现为严重缺水。分析认为这些水分以土壤、植被为介质,通过 30 余次的漫灌,与该区干燥的气候、强烈的太阳辐射、较高的风速、较低的相对湿度形成了水分蒸散的耗散结构,全部蒸散掉了<sup>[12]</sup>。土壤粒径<sup>[13-14]</sup>、盐分含量<sup>[9]</sup>和黏粒含量等对水分的蒸发有重要影响;灌溉方式和灌溉频次对土壤水分的含量和分布有较大影响,直接影响着水分的蒸散<sup>[10,15-16]</sup>;树木品种的遗传特性对蒸腾有决定性的影响<sup>[10]</sup>;同时,气候环境对蒸散发也非常关键<sup>[11,17]</sup>。该区气候极其干燥,干燥指数达 32,相对湿度 31%,年平均风速 4.1 m/s。太阳辐射强烈,强度可达 1.1 kW/m<sup>2</sup>,日照率为 71%,年平均温度为 10.6℃<sup>[18]</sup>。气候环境是引起该小区域水分蒸发强烈的主要原因之一。但进一步的分析认为水分蒸散的耗散结构并非为莫高窟所特有,是水分蒸散的普遍原理,在水土保持领域有重要的意义。由于

水分蒸散的耗散结构只是在灌溉调查的基础上提出来的,针对这一问题,笔者进行了一系列的野外实验,根据耗散结构的成立条件与实验数据进行对比分析,进一步验证蒸散的耗散结构。

## 1 实验的思路与方法

### 1.1 实验思路

蒸散耗散结构如果成立,必须具备:(1)在完全开放的系统条件下;(2)处于远离平衡态的非线性区域,呈非线性表现;(3)系统各要素之间存在着非线性的相关机制<sup>[4]</sup>。实验是在开放条件下进行的,第一个条件已经满足,本文的重点在蒸散的非线性的验证和非线性形成机理的说明上。非线性是指两个量之间没有如正比例那样的直线关系<sup>[4]</sup>。更具体地说,如果水分蒸散符合耗散结构理论,应具有图 1 的行为特征<sup>[2-3]</sup>。当某一蒸散参数的变化至临界值  $\lambda_c$  时,蒸散量由  $a$  状态通过分岔突变现象进入  $b_1$  或  $b_2$ ,随  $\lambda$  的变化,又进一步出现分叉至  $c_1$  或  $c_2$ ,  $c_3$  或  $c_4$  ……等,呈正反馈或负反馈的非线性表现。实验在其它条件相同的情况下,对构成蒸散的某一因子进行不同的量( $\lambda$ )的设定,通过测定蒸散量  $E$ ,验证是否随参量  $\lambda$  有正、负反馈表现。如果有正、负反馈,且存在相关非线性机制,说明蒸散存在耗散结构,耗散结构理论适应于水分的蒸散。

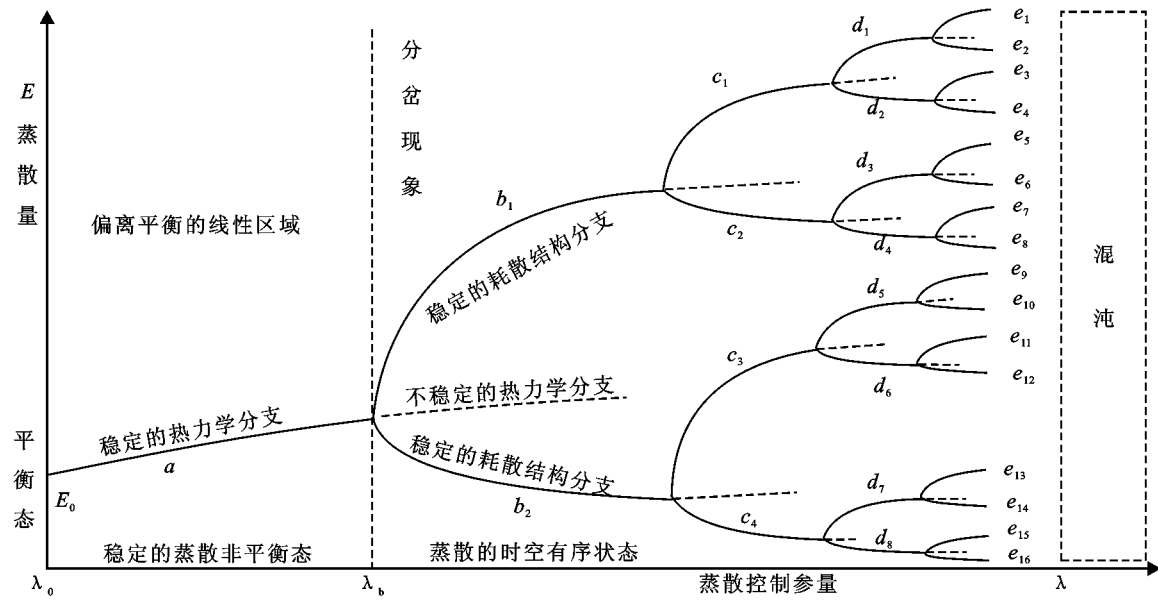


图 1 水分蒸散耗散结构的理论表现

### 1.2 实验方法

实验于 2007 年夏在莫高窟窟顶戈壁进行。分别对土壤粒径大小、黏土含量、盐分含量、灌溉量(灌溉频次)、植被等进行一定设置后,装入塑料桶,用称重法测定蒸散量。重复一次,进行差异对比分析。

为了有效减小风沙和气压波动的干扰,在选择适宜天气的前提下,用适当降低称量精度(5 g),同时增大测量质量的办法来减小称量精度下降的影响。用口径为 22 cm,高 23.5 cm 的塑料桶,装载 11 kg 左右的土壤或 6.3 kg 的水,使蒸发面积一致。利用不

同地点的水体蒸发量,分析气候的非线性作用。桶中土壤调制至最大持水量,然后放置于事先埋设于土壤的套桶中,称重分别监测白天(10:00–22:00)、夜间(22:00–10:00)和全天的蒸发量。

1.2.1 土壤粒径的设置 用不同粒径的土壤(粗砾 5~10 mm,细砾 0.66~2.50 mm,砂粒 0.07~0.66 mm,黏土<0.07 mm),装桶后洒水至最大持水量,测定蒸发量,分析粒径对蒸发的影响。

1.2.2 黏土含量的设置 调制不同基质和黏土含量的土壤。编号为 A, B, C 的一组塑料桶以粗砾为基质;编号 D, E, F 的一组以细砾为基质; G, I, H 以砂粒为基质;各桶中拌入 0~1 300 g 不等的黏土,如表 2,加水调制至最大持水量后,测定蒸发量,分析黏土含量对蒸发的影响。

1.2.3 盐分含量的设置 J, K, L 是拌有 1 kg 黏土的细砾基质,再分别加入 0, 50, 100 g 从棕漠土中提取的可溶性盐( $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  含量是 4.4 g/kg)<sup>[19]</sup>, M 加入纯 NaCl 100 g,如表 3,加水调制至最大持水量后,测定蒸发量,分析盐分含量及种类对土壤蒸发的影响。

1.2.4 对灌溉的模拟

(1)在灌溉总量一定的情况下,模拟不同的漫灌量。用编号为 N, O, P 塑料装等量的砂粒, N 桶中一次性浇水 1 920 g 至最大持水量,以后不再洒水;在 O 桶中每日一次洒 N 水量的 1/3,即 640 g;P 桶每日早晚两次,每次 320 g,3 d 后根据的总蒸发量分析灌溉量及灌溉频次对土壤蒸发的影响。

(2)模拟漫灌过量或潜水水位较高的土壤。在 Q, R 两塑料桶装等量棕漠土, Q 桶土壤加水 1 580 g 至最大持水量。R 桶底打孔成筛状,置于托盆中,加水 2 200 g,使多余的水分渗溢于托盆中,密封盆口后置于地面,测定蒸发量,分析土壤下层过量水分对蒸发的影响。

1.2.5 气候 分别测定放置于地面与土壤中等量水体(每日的初始质量为 6 300 g)的蒸发量,对比分析微环境变化的影响,并进一步根据 6–7 月测定的  $\varphi_{20}$  蒸发皿在窟顶戈壁、窟前、敦煌的蒸发量,分析气候对蒸发的影响。

1.2.6 植物种类 植物的蒸腾量与植物品种、气候和自身体量等密切相关,2002 年北京林农业大学对莫高窟林带的相关蒸发特征和蒸发量进行过专门的研究<sup>[10]</sup>。用冠幅覆盖桶面的天竺葵(*Pelargonium hortorum*),在土壤湿度为最大持水量时密封桶口,测定天竺葵的蒸腾量,与之前莫高窟的植物蒸腾量作对比分析。

表 1 不同粒径土壤的蒸发量

项 目	粗砾	细砾	砂粒	黏土
粒级/mm	5~10	0.66~2.50	0.07~0.66	<0.07
日蒸发量/mm	2.53	1.54	19.65	14.46

2 结果与分析

各设置的组内对比变化曲线完全一致。但受天气影响,重复实验在蒸发量上存在一定差异,这并不影响非线性分析。选其中一组数据作非线性及形成机理分析。

2.1 粒径对蒸发的影响

从表 1 可知,粒径对蒸发的影响巨大,砂粒>黏土>粗砾>细砾。砂粒的日蒸发量是细砾的 12.5 倍。土壤粒径与蒸发之间存在复杂关系<sup>[13-14]</sup>。粒径较大的粗砾形成的土壤间隙也较大,增强了粗粒间隙的空气流动,因此粗砾的蒸发量要比细砾大。但随着蒸发的发展,土壤发育形成了较厚的干层,粗砾、细砾间隙的空气流动受到抑制,下层水分因无毛细作用不能向上运转,所以粗砾、细砾的蒸发量都较低<sup>[20]</sup>。随着土壤粒径的减小,至临界点砂粒大小时,土壤颗粒形成了强烈毛细作用,蒸发主要依靠毛细作用将大量的下层水分迁移至表层,使砂粒的蒸发量发生了突变性增加;但当粒径小于粉粒(黏土)时,粉粒、黏粒对非饱和水分子产生极强烈的吸附作用,造成蒸发量的下降,呈负反馈。

粗砾、细砾、砂粒、黏土随粒径  $\lambda$  的减小,它们的蒸发量  $E$  对应于图 1 分别表现为  $a$ 、 $b_2$ 、 $c_3$ 、 $d_6$ ,呈  $a \rightarrow b_2 \rightarrow c_3 \rightarrow d_6$  走向,说明土壤粒径与蒸发之间存在非线性关系。

2.2 黏土含量对蒸发的影响

从表 2 中以粗砾为基质的 A, B, C 桶的蒸发量对比可以得出,粗砾的蒸发量随拌入黏土量的增加而增大,但并没有与黏土含量成线性比例变化,细砾 D, E, F 也类似。粗砾、细砾和砂粒中拌入一定量的黏土有利于蒸发,但并非越多越高,在粒径较小的砂粒 I 中加入 1 kg 黏土时蒸发反而出现了下降。随着黏土含量的进一步增加和土壤粒径的细化,至纯黏土时,将出现蒸发差异较大的情况(表 1)。

砂粒 G, H, I 随黏土含量增加出现了明显的正反馈和负反馈。适当地增加黏土含量,对毛细作用的形成非常有利,但随着粘土含量的增加和蒸发的逐渐进行,毛管凹面对水分子产生很强的吸引力,抑制了土壤水分的蒸发。随着土壤含水量的进一步减小,非饱和土壤对水分子产生巨大的吸湿吸附力和静电引力,与温度、盐分等共同作用,形成了水分复杂的非线性

运移<sup>[21]</sup>。与图 1 相对应, A 和 B 相当于  $a$ , C 相当于  $b_1$ ; D、E、F 呈  $a \rightarrow b_1 \rightarrow c_1$  变化; G、H、I 呈  $c_1 \rightarrow d_1 \rightarrow e_2$  变化, 它们都是非线性表现。

表 2 黏土含量对蒸发量的影响

编号	A	B	C	D	E	F	G	H	I
黏土含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	0	60	130	0	20	100	0	20	100
白天蒸发量/mm	3.79	4.07	11.23	4.21	8.42	11.65	13.90	14.74	13.90
夜间蒸发量/mm	0.56	1.54	2.25	0.70	1.97	2.95	4.49	4.49	3.93
日蒸发量/mm	4.35	5.62	13.48	4.91	10.39	14.60	18.39	19.23	17.83

2.3 盐分含量对蒸发的影响

从表 3 中 J, K, L 的对比可以得出: 适量的盐分可通过增强水分的负渗透压, 增大下层土壤与表层土壤的水势差, 有利于土壤水分向表层运移, 进而有利于蒸发。但含盐量较高的 L, 蒸发使盐分富集于表层, 反而抑制了水分蒸发, 使 L 的蒸发量较 K 出现了下降<sup>[9]</sup>。J, K, L 的蒸发量对比对应于图 1 属  $a \rightarrow b_1 \rightarrow c_2$  的非线性关系。对于盐碱化严重的土壤来说<sup>[22]</sup>, 盐分的含量远大于 M 的含量, 对蒸发的抑制作用也将呈现大于 M 的表现。L 和 M (NaCl) 的对比说明: 虽然加入的可溶性盐同为 100 g, 但盐的成分不同, 对蒸发的影响很大。

表 3 盐分含量对蒸发量的影响

编号	J	K	L	M
盐分含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	0	5	10	10
白天蒸发量/mm	11.65	12.49	11.93	8.70
夜间蒸发量/mm	2.95	3.23	2.25	1.83
日总蒸发量/mm	14.60	15.72	14.18	10.53

2.4 灌溉量对蒸发的影响

N, O, P 的 3 d 的总蒸发量分别为 1 275, 1 385, 1 490 g。在灌溉总水量一定(1 920 g)的情况下, 每次的灌溉量越小, 浇水频率越高, 蒸发越强烈。较高的灌溉频次增大了表层土壤的含水量, 保持了土壤与大气间较大的湿度差, 水分易于蒸发<sup>[23]</sup>。同时水较高的热容量对土壤的升温有较强抑制作用, P 桶内保存的水分较多, 能使蒸发减小。莫高窟为了使土壤湿度达到林木生存的需求, 每年不得不进行 30 余次的漫灌, 是造成蒸散量较大的一个重要原因。

Q 的蒸发量为 580 g, R 为 505 g。说明水分的较高热容量在土壤热量的日变化过程中有较强的吸收平衡作用, 较多的水量可以有效减缓土壤温度的升高, 抑制水分的蒸发。对于这一结果, 慎重起见, 分别用棕漠土和沙漠土做了完全相同的对比实验, 结果是没有托盆水的蒸发量分别是 705, 740 g, 有托盆水的分别是 630, 665 g, 充分说明过量的水分不利于蒸发。这意味着潜水埋深较浅的地区, 水分蒸发反而较小。因此, 土壤蒸发量与灌溉量(土壤水分的

分布)呈明显的非线性关系。

2.5 气候对蒸发的影响

图 2 中, 同样的 6 300 g 桶水, 置于地面的比置于土壤中的日蒸发量要高 9.5 mm, 平均增大了 55.3%; 说明外部的微环境变化对蒸发有重要影响。气候差异使不同日期蒸发量相差可达 2~4 倍, 甚至更高。从整个蒸发趋势来看, 它们的蒸发波动较为一致, 说明它们受同一气候过程的控制, 气候对水分蒸发有重要影响。

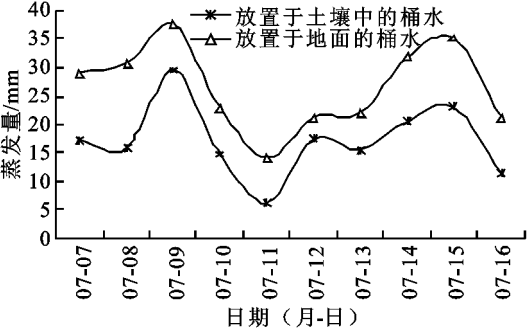


图 2 微环境对桶水蒸发的影响

通过用  $\Phi_{20}$  蒸发皿(6 月 20 日至 7 月 26 日)在窟顶戈壁、窟前、敦煌的测量和计算得出: 戈壁的蒸发强度是敦煌的 1.3 倍, 敦煌是窟前的 1.6 倍, 戈壁是窟前的 2.2 倍。能量是维持蒸发的基础, 窟前受河谷地貌和植被遮荫的影响, 太阳辐射总量减少了 2/3<sup>[18]</sup>, 是造成蒸发量下降的重要原因。图 3、表 2、表 3 中昼夜蒸发差异说明, 太阳辐射总量和温度对蒸发有显著影响。另外, 风速<sup>[24]</sup>和相对湿度对蒸发也有重要作用。戈壁的年平均风速为 4.1 m/s, 窟前是 0.6 m/s, 敦煌 2.0 m/s; 戈壁的年平均相对湿度为 31%, 窟前是 39%, 敦煌 43%。较长的日照时间、较低的相对湿度和较强的风速耦合有利于蒸发。小气候差异是引起三地蒸发强度不同的主要原因。

气候是调控蒸发的关键因素<sup>[11]</sup>。当空气湿度接近饱和时, 蒸发将大大降低, 若出现降温, 甚至产生凝结。因此空气的相对湿度对蒸发的影响很重要。同样, 若没有风或空气湍流的存在, 蒸发面上的饱和空气会对蒸发起到封闭作用。另外, 风也是蒸散系统重要的能量来源, 在莫高窟, 风能对蒸散的贡

献甚至是太阳能的 2 倍<sup>[12]</sup>。当气候各因子的变化出现有利于蒸发的协同作用时, 即当出现较强的太阳辐射强度、较高的温度、较大的风速、较低的相对湿度时, 蒸发就会呈现突变性的增大。反之, 则急剧减小。各地气象站测定的蒸发量正是各地气候对蒸发影响的综合反映。蒸发与气候之间存在复杂的非线性热动力学机制。

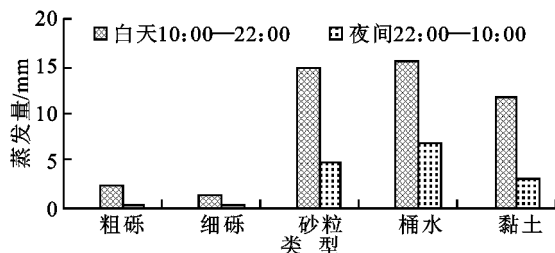


图 3 昼夜蒸发量的对比

## 2.6 植物对蒸腾的影响

植物的蒸腾速率主要取决于品种的遗传特性, 品种不同差异很大。2002 年北京林业大学与笔者在莫高窟用 LI-1600 型蒸腾仪和快速称重法测得侧柏 (*Platycladus orientalis* (L.) Fanco)、银白杨 (*Populus alba* L.)、榆树 (*U. pumila* L.)、新疆杨 (*P. alba* L. var. *pyramidalis* Bge.)、白蜡 (*F. bungeana* DC.) 之间的蒸腾速率差异较大, 最大可达 21 倍。它们白天的蒸腾速率分别是夜间的 6, 14, 13, 14, 20 倍。蒸腾也同样受到气候因素和土壤水分的影响<sup>[10]</sup>。天竺葵当日的蒸腾量为 80 g, 根据水体蒸发的对比分析, 该日的天气对蒸发的影响虽属偏高水平, 但蒸腾只有莫高窟窟前林带同期蒸腾量 1/10。因此, 植被的蒸腾量因植物的种类、体量、水分状况和气候环境的不同而丰富多变, 具有显而易见的非线性差异。

由于蒸散各因子的内在关联性, 一些因子正相关作用被另一些因子的负相关作用所抵制, 比如风速的增大效应可能被空气湿度的增大作用所掩盖; 热量的增加会被水量的增加所平衡; 土壤蒸发和植被蒸腾为自身的生态小气候所抑制, 使蒸散保持在相对稳定的水平。但当各相关因子的波动出现有利于蒸散的协同共振时, 可出现非线性的分岔突变现象。各地或高或低的蒸散突变都是蒸散耗散结构存在的表现。

## 3 结论与讨论

通过蒸散量野外测定与耗散结构理论的对比表明: 土壤因子、气象因子、水分状况、植物的变化都可以使水分的蒸散呈现非线性表现, 蒸散与各因子之间存在着非线性的相关机制, 各因子的综合作用能

够使蒸散呈现非线性表现。土壤的粒径、盐分、水分在一定范围内和一定条件下的变化对蒸发可产生正反馈和负反馈作用。太阳辐射、风速、湿度、温度等气候因子与蒸散存在广泛的非线性作用。蒸散强度是各因子共同形成的结构功能表现。但并非某一因子的涨落变化就必然导致耗散结构, 只有当土壤、气候、水分、植被等蒸散因子的波动变化在发生协同共振时才形成水分蒸散的耗散结构, 使蒸散出现较高或较低的非线性突变表现。莫高窟的蒸散量是较高蒸散耗散结构存在的表现。初步证明水分的蒸散符合耗散结构理论成立的条件和特征要求, 耗散结构理论应用在水分的蒸散中是适合的。

在莫高窟的极干旱气候条件下, 当土壤通过漫灌达到较高水分含量时, 原来大量毫无关联的太阳能、风能等都自发地围绕水分的蒸散形成了耗散的时空结构。蒸散耗散结构的形成不但需要源源不断的水分和能量, 而且需要土壤、植被、气候等因子的参与。蒸散系统通过太阳能、风动能和热能的耗散使系统的内形成了复杂的非线性动力学机制。蒸散系统内众多变化着的因子, 它们相互联系、相互制约, 决定着系统的可能状态和可能演变方向。

### 参考文献:

- [1] 沈小峰, 胡岗, 姜璐. 耗散结构论[M]. 上海: 上海人民出版社, 1987: 1-40, 98-113.
- [2] 李士勇. 非线性科学与复杂性科学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006: 5, 19-40, 66.
- [3] 伊·普利高津. 从混沌到有序[M]. 上海: 上海译文出版社, 1987: 341-349.
- [4] 蔡晓明. 生态系统生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 31-33.
- [5] 田广星, 杨郁挺, 刘平, 等. 水土流失地区耗散结构分析[J]. 水土保持研究, 2002, 9(3): 254-256.
- [6] 姜纪沂, 曹剑峰, 李升, 等. 应用耗散结构理论分析地下水系统演化[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 72-74.
- [7] 王政友. 土壤水分蒸发的影响因素分析[J]. 山西水利, 2003(2): 26-29.
- [8] 汪增涛, 孙西欢, 郭向红, 等. 土壤蒸发研究进展[J]. 山西水利, 2007(1): 76-79.
- [9] 李新举, 张志国, 刘勋岭. 土壤含盐量对土壤水分蒸发影响的初步研究[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2000, 31(2): 209-210.
- [10] 秦全胜, 郑彩霞, 汪万福, 等. 敦煌莫高窟区树木蒸腾耗水量的估算[J]. 敦煌研究, 2002(4): 97-101.
- [11] 李金柱. 区域蒸散发影响因素综合分析[J]. 山西水利, 2003(3): 23-25.

(下转第 209 页)

曲线的拐角越陡, 入渗越容易达到稳定状态; 而黏粒含量低、孔隙度大的土壤, 如缓坡农田、草地、混交林等生态系统, 入渗过程达到稳定的时间就相对较长, 因此会延长地表初始产流的时间, 从而减少了水土流失。

4 结 论

(1) 红壤丘陵区各生态系统入渗率随时间的变化均可较好地拟合为幂函数曲线:  $Y = aX^{-b}$ ; 入渗的稳定时间一般在 30 min 以内。

(2) 各生态系统稳定入渗率以缓坡农田最高, 为 0.080 mm/min, 然后依次为陡坡农田、油茶林、灌丛、混交林、草地和茶园最小, 缓坡农田是茶园的3.3 倍。宏观毛管长以缓坡农田最大( 128.2 mm), 远高于其他生态系统, 油茶林与草地的最小, 有效孔径的变化趋势与宏观毛管长相反。

(3) 土壤稳定入渗率与土壤容重及初始含水量呈显著负相关, 与孔隙度呈正相关。入渗过程则主要受孔隙度和黏粒含量影响。

参考文献:

[ 1 ] 张永涛, 杨吉华, 夏江宝, 等. 石质山地不同条件的土壤入渗特性研究[ J ]. 水土保持学报, 2002, 16( 4 ): 123-126.  
[ 2 ] 樊军, 邵明安, 王全九. 田间测定土壤导水率的方法研

究进展[ J ]. 中国水土保持科学, 2006, 4( 2 ): 114-119.  
[ 3 ] Angulo- Jaramillo R, Vandervaere J P, Roulier S, et al. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers: a review and recent developments[ J ]. Soil Tillage Research, 2000, 55: 1-29.  
[ 4 ] Cameira M R, Fernando R M, Pereira L S. Soil macropore dynamics affected by tillage and irrigation for a silt loam alluvial soil in southern Portugal[ J ]. Soil Tillage Research, 2003, 70: 131-140.  
[ 5 ] 薛绪掌, 张仁铎. 用盘式入渗仪数据计算土壤导水参数[ J ]. 水利学报, 2001, 10: 12-18.  
[ 6 ] 高鹏, 穆兴民. 黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分入渗的对比试验[ J ]. 中国水土保持科学, 2005, 3( 4 ): 27-31.  
[ 7 ] 许明祥, 刘国彬, 卜崇峰, 等. 圆盘入渗仪法测定不同利用方式土壤渗透性试验研究[ J ]. 农业工程学报, 2002, 18( 4 ): 54-58.  
[ 8 ] 马晓刚, 张兵, 史东梅, 等. 丘陵区不同土地利用类型紫色土入渗特征研究[ J ]. 水土保持学报, 2007, 21( 5 ): 24-29.  
[ 9 ] 杨光, 丁国栋, 常国梁, 等. 黄土高原不同退耕还林地森林植被改良土壤特性研究[ J ]. 水土保持研究, 2006, 13( 3 ): 204-210.  
[ 10 ] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究[ M ]. 北京: 科学出版社, 2000: 31.

( 上接第 204 页 )

[ 12 ] 李红寿. 用耗散结构理论对莫高窟园林用水的分析[ J ]. 生态学报, 2006, 22( 6 ): 3454-3462.  
[ 13 ] 崔向新, 蒙仲举, 高永, 等. 不同粒径砾石覆盖对土壤水分蒸发的影响[ J ]. 中国农村水利水电, 2009( 3 ): 24-23.  
[ 14 ] 原翠萍, 张心平, 刘汗, 等. 砂石覆盖粒径对土壤蒸发的影响[ J ]. 农业工程学报, 2008, 24( 8 ): 17-20.  
[ 15 ] 曹红霞, 康绍忠, 何华. 灌溉对土壤水分分布和潜水蒸发的影响[ J ]. 西北农林科技大学学报, 2003, 31( 5 ): 73-76.  
[ 16 ] 曹红霞, 康绍忠, 何华. 蒸发和灌水频率对土壤水分分布影响的研究[ J ]. 农业工程学报, 2003, 19( 6 ): 1-3.  
[ 17 ] 莫兴国. 区域蒸发研究综述[ J ]. 水科学进展, 1996, 7( 2 ): 180-185.  
[ 18 ] 李红寿, 汪万福, 张国彬, 等. 地形地貌对莫高窟区域微环境的影响[ J ]. 敦煌研究, 2008, ( 3 ): 98-102.  
[ 19 ] 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[ J ]. 生态学报, 2004, 24( 11 ): 2493-2498.  
[ 20 ] 刘新平, 张铜会, 赵哈林, 等. 流动沙丘干沙层厚度对土壤水分蒸发的影响[ J ]. 干旱区地理, 2006, 29( 4 ): 523-526.  
[ 21 ] 钱天伟, 刘春国. 饱和- 非饱和土壤污染物运移[ M ]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007: 67-76.  
[ 22 ] 李国振. 塔里木河流域绿洲边缘土壤蒸发与积盐的初步分析[ J ]. 干旱区地理, 1998, 21( 1 ): 29-31.  
[ 23 ] 王会肖. 砂土土壤蒸发的测定与模拟[ J ]. 中国农业气象, 1997, 18( 4 ): 29-35, 38.