

文章编号:1000-694X(2012)04-896-05

敦煌鸣沙山月牙泉景区风沙环境分析

张克存, 牛清河, 屈建军, 安志山, 张伟民

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 敦煌戈壁荒漠生态与环境研究所/沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 基于月牙泉周边 7 个气象站点同步风况资料, 探讨月牙泉周边起沙风况、输沙势以及主导输沙方向的空间分布特征。结合月牙泉周边沙山、建筑物、树木等的方位特点, 剖析了近年来月牙泉受沙害困扰的缘由。由于受南北两高大沙山的夹击, 该区北风相对较少, 西风和南风较强, 南侧沙山的北移最为突出, 直接威胁月牙泉的存亡。

关键词: 起沙风; 输沙势; 起沙风玫瑰; 月牙泉

中图分类号: X144 **文献标识码:** A

鸣沙山月牙泉风景名胜区位于甘肃省敦煌市城南 5 km。月牙泉处于鸣沙山环抱之中, 因其形酷似一弯新月而得名。2001 年月牙泉北弧长 240 m, 最大宽度 39 m, 面积 0.88 hm², 最大水深 3 m^[1]。敦煌鸣沙山月牙泉是大自然赐予人类的珍贵遗产。敦煌月牙泉四周为高大的鸣沙山, 风沙活动强烈而频繁, 但千百年来, “山泉共处、沙水共生”, 湖光山色交相辉映。“沙山抱泉, 泉映沙山”这一独特的地貌奇观, 实为国内外罕见, 堪称塞外风光之一绝^[2]。历年来, 诸多学者从不同角度对这一恒古之谜进行了探讨, 主要有“上升泉”、“断层泉”、“风成湖”、“基岩裂隙泉”、“沙漠地下水溢出泉”、“古河道残留湖”等 6 种观点。从地质学角度来看, 认为月牙泉生成得益于党河对其地下水位的补给^[1]; 从风沙地貌学角度来看, 高大沙山与湖泊地表热力差异造成的局地环流, 对其也有一定的影响^[3-4]。但由于研究角度和侧重点不同, 上述观点仍存在较大的分歧。

近 30 a 来, 由于受自然、人为因素的双重作用, 月牙泉水位大幅度下降, 水域面积不断萎缩, 直接导致当地自然环境的恶化和旅游资源的衰竭。据敦煌鸣沙山月牙泉管理处观测, 月牙泉水深由 20 世纪 60 年代的 8 m 下降到 1.5 m 左右; 面积由 11 772 m² (218 m × 54 m) 减少到 6 536 m² (172 m × 38 m)。如不采取强有力的拯救措施, 未来 10 a 之内月牙泉将不复存在^[5]。为了抢救这一珍贵的自然遗产, 当地政府于 2006 年对月牙泉采取应急补水治理工程, 现已基本上解决了地下水的补给问题。然而, 月牙泉所面临的风沙危害问题依旧存在, 且愈演愈烈。尤其是近年来, 由于受多种因素影响, 使鸣沙山

不断向月牙泉移动, 形成了合围之势, 严重威胁月牙泉的存亡。鉴于此, 有必要对月牙泉周边的起沙风况、输沙势及风动力玫瑰等做系统研究。通过以上研究, 不仅拓展风沙物理学研究领域和丰富沙漠科学理论体系, 更能为保护和抢救敦煌鸣沙山月牙泉这一自然奇观提供理论依据, 具有重要的科学价值和实践意义。

1 景区概况

鸣沙山月牙泉位于西北内陆的敦煌盆地, 属于典型的大陆性干旱气候区。区内多年平均降水量不足 40 mm, 而蒸发量高达 2 488 mm。该区素有“世界风库”之称, 大风和沙暴频繁, 常年多东风和西北风。春夏季以东风为主, 秋冬季则以西北风为主, 年均大风日数为 20 d^[6]。景区内地貌主要有大、小泉湾和周围的鸣沙山组成。小泉湾是间于东沙山与北沙山的洼地, 主要用于办公和生活区。大泉湾是北沙山与南山之间的洼地, 月牙泉和月泉阁等古建筑群分布其内, 也是景区的核心。大泉湾北侧为月牙泉, 南侧为平台。月牙泉北侧为一高大的金字塔形沙丘, 相对高度在 100 m 左右。南沙山位于月牙泉之南, 山顶相对高度为 125 m, 从山顶向不同方向延伸出 4 条沙垄。西沙山位于月牙泉的西南部, 它有南、北两个峰顶, 相对高度分别为 190 m 和 170 m^[7]。为了研究鸣沙山月牙泉景区内的起沙风况及风沙活动规律, 我们在景区内典型部位架设了 7 台气象观测仪 (图 1)。其中, 东西区域气象站点风速采集高度为 10 m, 其他各测点风杯架设高度为 2 m, 风速采集时间步长为 10 min。

收稿日期: 2011-12-20; 改回日期: 2012-02-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41071009); 中国科学院“西部之光”项目 (29Y128841) 和甘肃省青年基金项目共同资助

作者简介: 张克存 (1978—), 男 (汉族), 甘肃民勤人, 理学博士, 副研究员, 主要从事风沙工程与风沙灾害研究。Email: kecunzh@lzb.ac.cn

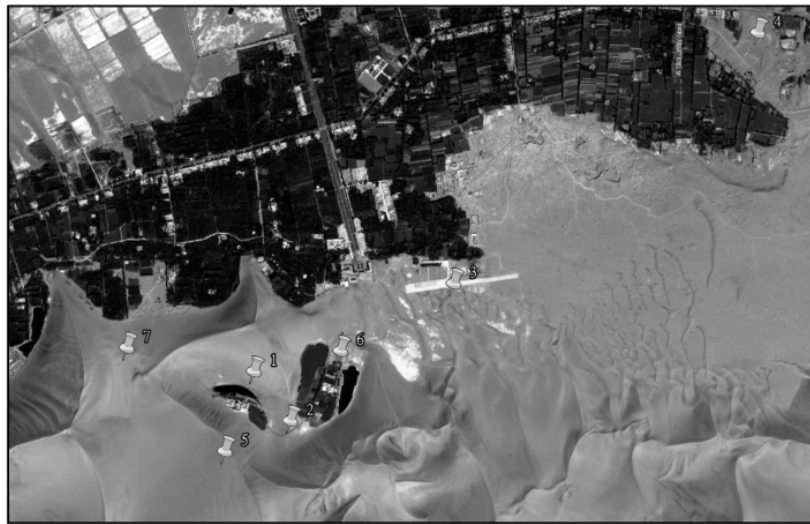


图1 月牙泉景区气象站点分布

Fig. 1 Location of meteorological observation stations around the Crescent Moon Spring

2 区域风况

2.1 平均风速

受地形的影响,月牙泉景区内各测点的平均风速差别很大。表1为月牙泉周边7个观测站点月平

表1 月牙泉周边各测点月均风速

Table 1 Monthly mean wind velocity at each observation site around the Crescent Moon Spring

位置/编号	月均风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)												全年
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
月牙泉/1	1.27	1.80	2.20	2.62	1.18	1.76	1.61	1.35	2.22	1.60	1.58	1.86	1.75
泉湾/2	2.20	2.08	2.38	2.24	2.54	2.04	1.97	1.60	1.75	—	—	—	2.09
飞机场/3	2.32	2.51	2.96	3.04	3.29	2.56	2.61	2.08	2.30	2.31	2.02	2.49	2.54
砖厂/4	2.11	1.79	2.16	2.49	2.58	2.26	2.10	1.66	1.80	1.46	1.76	1.71	1.99
南山顶/5	2.80	2.72	2.99	2.66	3.17	2.79	2.88	2.76	2.61	3.13	2.21	2.68	2.78
东侧/6	1.69	1.97	2.39	2.63	0.28	2.44	2.34	1.99	1.99	2.11	1.73	1.89	1.95
西侧/7	2.08	2.57	3.03	3.23	3.07	2.72	2.52	2.29	2.31	2.77	2.16	2.12	2.57

2.2 起沙风况

在统计区域风沙活动强度时,往往更多的考虑超过沙粒起动的风速,即起沙风。起沙风况直接决定区域风沙活动强度和输沙方向,进而影响沙丘形态变化及其演变,是研究风沙运动规律、解决风沙工程问题的关键指标之一。它与沙粒粒径、下垫面性质、沙粒含水率等多种因素有关。在参照前人野外观测与风洞实验的基础上,将鸣沙山月牙泉景区内的临界起沙风速定为 $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (2 m 高度),并对其进行有关风沙活动强度的统计与计算。

为了更直观地反映月牙泉景区起沙风的空间分布,我们统计了景区内各测点的年均起沙风速,即 2 m 高度处风速大于 $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的所有风速的平均

均风速,各测点月均风速最大区段主要集中在 3—5 月。例如,月牙泉西侧月均风速在该时段高达 $3.23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,南山顶的月均风速也达到了 $3.17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从平均风速空间变化来看,月牙泉边年均风速最小,为 $1.75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;而年均风速最大测点位于南山顶,达 $2.78 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

值。年均起沙风速较大的测点为位于月牙泉外围的飞机场、西侧和南山顶,其年均起沙风速分别为 6.87 、 $6.47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $6.60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 2)。由于受地形、周边建筑物和树木的影响,景区内月牙泉东侧和泉边的年均起沙风速较小,分别为 $6.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $5.90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.3 起沙风玫瑰

从图 3 月牙泉景区各测点起沙风玫瑰空间分布来看,月牙泉边起沙风向以 SSW 和 W 风为主,分别占全年总量的 30.01% 和 20.10%,起沙风合成方向为 58° ,以西南风为主。而北风和东风相对较少,这一点从南沙顶 5 号测点和西侧 7 号测点起沙风玫瑰可以得到反映。月牙泉处主要受越过南山顺坡而下

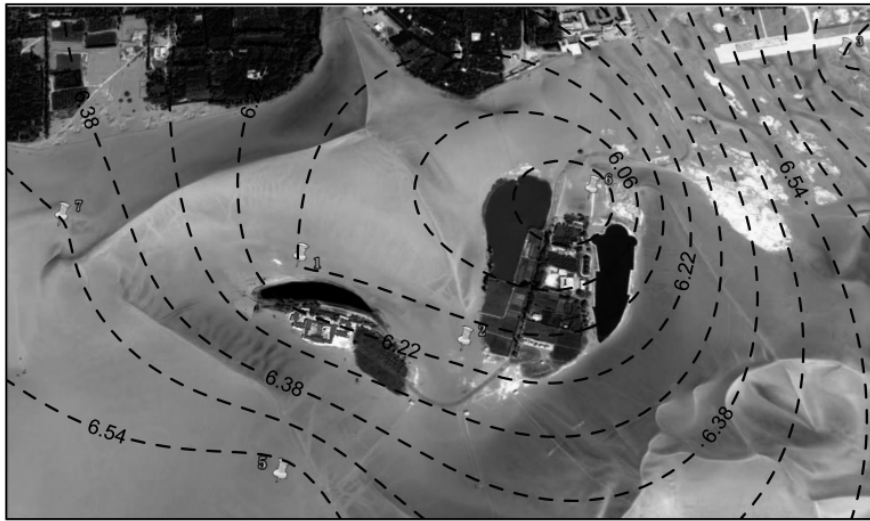


图 2 月牙泉景区年均起沙风速的空间分布

Fig. 2 Isolines of annual average sand-laden wind speed in the Crescent Moon Spring

的南风的影响,南山顶 5 号测点处主要以南风 and 西南风为主,起沙风合成方向 25° ,合成矢量占 75.19%,说明来自西南方向起沙风占绝对优势。大小泉湾 2 号测点起沙风主导方向表现为 3 组,除东北和西南方向外,来自东南向起沙风也有所增加,这

主要由于受月牙泉北侧高大金字塔形沙丘和南侧线性沙丘的影响。景区内东侧 6 号测点和飞机场处 3 号测点,起沙风向较分散,除受高大沙丘地形条件的影响,还与周边建筑物、树木以及景区外围村庄、农田和果园关系甚密。



图 3 月牙泉景区起沙风玫瑰空间分布

Fig. 3 Sand-laden wind roses in the Crescent Moon Spring

3 输沙势

输沙势(drift potential,简称为 DP)是衡量区域风沙活动强度及风沙地貌演变的重要指标^[8-14],应用广泛^[15-20]。Fryberger^[21]对 Lettau 等^[22]提出的输沙方程进行了修改,并提出如下输沙势计算公式:

$$DP = V^2 (V - V_c) t$$

式中: DP 为输沙势,在数值上用矢量单位(Vector

unit,简称 VU)表示; V 为大于临界起动值的风速, V_c 为临界起动风速,二者单位均为海里 $\cdot h^{-1}$; t 为起沙风作用的时间,一般以频率表示。由于风是一种矢量,根据矢量合成法则将 16 个方位输沙势进行合成,就得到合成输沙势(Resultant Drift Potential,简称为 RDP)和合成输沙方向(Resultant Drift Direction,简称 RDD),它可以反映一个地区净输沙能力的大小。合成输沙势与输沙势的比值称为方向变率指数(RDP/DP),用来反映一个地区风向组合

情况。Fryberger 等^[21]根据输沙势大小,将风环境分为高能 (>400 VU)、中能 (200~400 VU) 及低能 (<200 VU)。另外,他还将方向变率指数分为大比率 (>0.8)、中比率 (0.3~0.8) 及小比率 (<0.3) 3 种。

从图 4 月牙泉景区各测点输沙势计算结果可以看出,景区各测点输沙势差异很大,其中,输沙势最大测点位于 3 号点飞机场位置,DP 为 160.63 VU;其次,位于南山顶和月牙泉西侧,DP 都大于 100 VU。根据 Fryberger^[21]提出的年平均风能量变幅分类标

准,月牙泉景区风能属于低能环境。另外,月牙泉边和大小泉湾处输沙势 DP 较小,尤其是月牙泉边,其输沙势 DP 为 10.29 VU。由于受地形影响,合成输沙势 RDP 和合成方向变化较大。但总体来看,月牙泉西侧、南山顶受南风的影响较大,输沙势 DP 主要集中在偏南方向。南风越过月牙泉南侧沙山直达月牙泉边,这一点从月牙泉边输沙势玫瑰图也可以看出。另外,大小泉湾由于受多风向的交互作用,其合成输沙势 RDP 为 1.57 VU。从理论上讲,该测点风沙环境处于动态平衡,各方向输沙强度可以相互抵消。

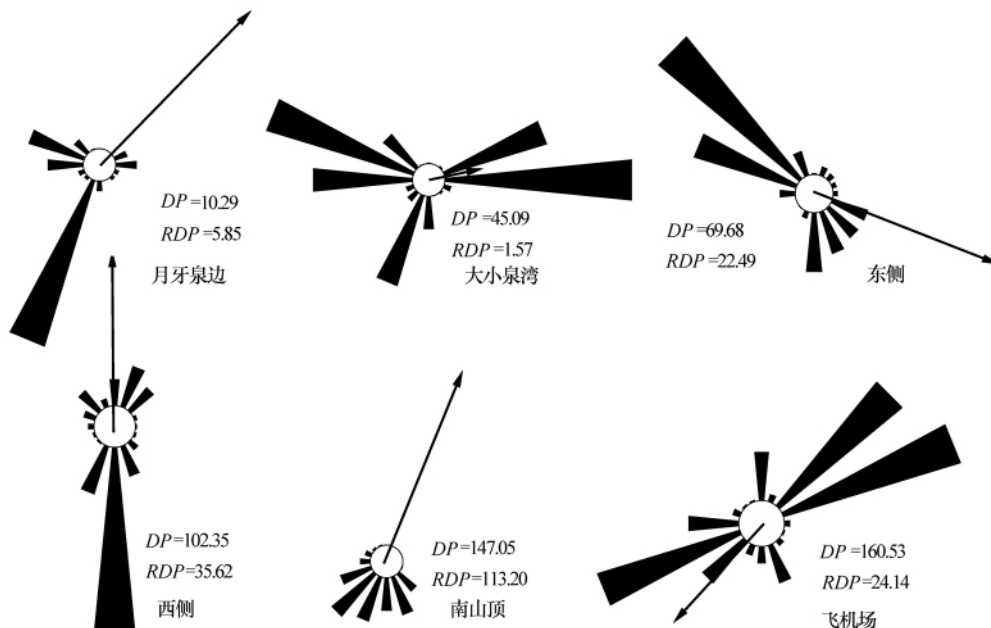


图 4 月牙泉景区各测点输沙势

Fig. 4 Drift potential at observation sites in the Crescent Moon Spring

月牙泉周边各测点输沙势 DP 季节变化比较明显(图 5)。总体来说,春季各测点输沙势较高。其中,月牙泉边春季输沙势 DP 为 33.72 VU,占全年

总输沙势的 31.8%。而夏季 DP 只有 6.05 VU,约占 8.02%。南山顶和月牙泉西侧两测点输沙势 DP 的季节分布与月牙泉处有所差异,3—8 月输沙势相对较高,分别达到了 60.94% 和 74.96%。秋季,南山顶和西侧 DP 分别为 97.60 和 62.03 VU,约占全年的 15%。从空间分布来看,一年四季月牙泉南山顶和西侧输沙势 DP 远高于月牙泉处。

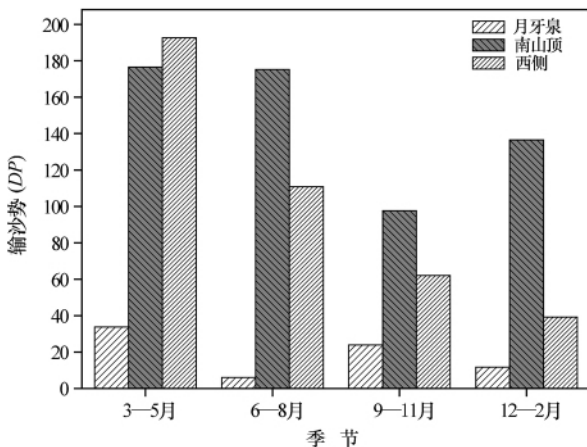


图 5 月牙泉景区典型测点输沙势季节变化

Fig. 5 Seasonal variation of drift potential at typical observation sites in the Crescent Moon Spring

4 结论

月牙泉由于所处独特的地形环境,年均风速、起沙风玫瑰以及输沙势等受局地地形的影响很大。月牙泉边起沙风向以 SSW 和 W 风为主,分别占全年总量的 30.01% 和 20.10%,起沙风合成方向为 58°,以西南风为主。鸣沙山月牙泉景区属于低风能环境,其中,月牙泉边年输沙势 DP 为 10.29 VU。月牙泉东侧大小泉湾处,受多风向交互作用,风沙输移处于相对平衡。月牙泉沙害主要来自南侧沙山的北

移。近年来受周边建筑物和树木的影响,月牙泉周边东风减弱,从空间上改变景区内流场结构,破坏了维系月牙泉东西两侧原有的输沙均衡。因此,月牙泉风沙危害治理应从恢复近地表流场结构出发,遵循风沙动态平衡原则。

参考文献 (References):

- [1] 尹念文,魏玉涛. 月牙泉的成因分析[J]. 地下水, 2010, 32(2): 22-22.
- [2] 丁宏伟,龚开诚. 敦煌月牙泉湖水持续下降原因及对策分析[J]. 水文地质工程地质, 2004, 6: 74-77.
- [3] 张伟民,王涛. 巴丹吉林沙漠高大沙山形成演化初步探讨[J]. 中国沙漠, 2005, 25(2): 281-286.
- [4] 孙显科,吕亚军,张大治,等. 风成沙地地形 1/10 定律的研究与敦煌鸣沙山成因的猜想[J]. 中国沙漠, 2006, 26(5): 704-710.
- [5] 桑吉梅朵. 保卫沙漠第一泉——甘肃敦煌月牙泉抢救纪实[J]. 生态经济, 2005, 3: 14-21.
- [6] 董霁红,卞正富. 敦煌鸣沙山月牙泉自然遗产保全的研究[J]. 自然资源学报, 2004, 19(5): 561-567.
- [7] 温国盛. 敦煌风景区风沙活动的初步研究[J]. 内蒙古林学院学报, 1990, 2: 49-54.
- [8] Bullard J E. A note on the use of the "Fryberger method" for evaluating potential sand transport by wind[J]. Journal of Sedimentary Research, 1997, 67: 499-501.
- [9] Thomas D S G. The nature and deposition setting of arid and semi-arid Kalahari sediments, southern Africa[J]. Journal of Arid Environments, 1988, 14: 17-26.
- [10] 柳本立,张伟民,刘小宁,等. 莫高窟顶戈壁偏东风作用下输沙率变化的观测研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30(3): 516-521.
- [11] Wasson R J, Hyde R. Factors determining desert dune type [J]. Nature, 1983, 304: 337-339.
- [12] Wasson R J, Hyde R. A test of granulometric control of desert dune geometry[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1983, 8: 301-312.
- [13] Lancaster N. The dynamics of star dunes: An example from the Gran Desierto, Mexico[J]. Sedimentology, 1989, 36: 273-289.
- [14] Livingstone I, Warren A. Aeolian geomorphology—an introduction [M]. London: Addison Wesley Longman Limited, 1996.
- [15] 张克存, 烜瑞平, 屈建军, 等. 腾格里沙漠东南缘输沙势与最大可能输沙量之比较[J]. 中国沙漠, 2008, 28(4): 605-610.
- [16] 李晋昌, 苏志珠, 胡光印. 风沙活动强度的常用判断指标及其应用评述[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4): 788-795.
- [17] 李红军, 杨青, 何清. 近 40 年来新疆输沙势的分析[J]. 中国沙漠, 2004, 24(6): 706-710.
- [18] 张华, 李锋瑞, 李玉霖, 等. 科尔沁沙地奈曼旗近 5 年来风况及合成输沙势[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 623-627.
- [19] 黄翠华, 张伟民, 李爱敏. 莫高窟窟顶风况及输沙势研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(3): 394-398.
- [20] 张克存, 牛清河, 屈建军, 等. 青藏铁路沱沱河路段风沙危害特征及其动力环境分析[J]. 中国沙漠, 2010, 30(5): 1006-1011.
- [21] Fryberger S G. Dune form and wind regime[C]//McKee E D. A Study of Global Sand Seas. US Geological Survey Professional Paper 1052, 1979: 137-169.
- [22] Lettau K, Lettau H. Experimental and micrometeorological field studies of dune migration[C]//Lettau K, Lettau H. Exploring the World's Driest Climate. University of Wisconsin-Madison, IES Report 101, 1977: 110-147.

Analysis of Wind-blown Sand Environment in the Singing Sand Mountain & Crescent Moon Spring Scenic Spot in Dunhuang, China

ZHANG Ke-cun, NIU Qing-he, QU Jian-jun, AN Zhi-shan, ZHANG Wei-min

Dunhuang Gobi and Desert Ecology and Environment Research Station/Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: Based on wind data in a scenic spot of the Singing Sand Mountain & Crescent Moon Spring, the spatial patterns of sand-laden wind, drift potential and dominant sand-transporting orientation were investigated. Together with the spatial pattern characteristics of sand mountains, buildings and trees around the Crescent Moon Spring, the reason of sand encroaching to the Crescent Moon Spring was revealed. North wind was relatively scarce in the Crescent Moon Spring because of blocking of sand mountains to the south and north of the Crescent Moon Spring, and the dominant winds were from west and south. Sand mountains to the south of the Crescent Moon Spring moved toward north obviously. The results are useful to reveal the characteristics of sand damage to the Crescent Moon Spring and to provide theoretic base for controlling sand damage to the Crescent Moon Spring.

Keywords: sand-laden wind; drift potential; sand-laden wind rose; the Crescent Moon Spring