

盐分对极干旱土壤水分垂直分布与运转的影响^①

李红寿^{1,2}, 汪万福^{1,2,3}, 武发思^{1,2}, 安黎哲³

(1 敦煌研究院保护所, 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 兰州大学生命科学学院, 兰州 730000)

摘要: 通过对莫高窟戈壁土壤中主要盐分的检测和理化特性分析, 发现在极干旱地区, 土壤盐分对土壤水分的垂直分布产生了重要影响。以芒硝为代表的结晶盐分, 其含量分布和理化特性与土壤水分分布非常吻合。0~20 cm 以无水盐分 (Na_2SO_4) 为主, 水分含量较低, 是盐分集聚层; 在 20~50 cm 以结晶盐分 ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) 为主, 水分含量较高, 是盐分析出层; 50 cm 以下以膜状水盐溶液为主, 水分含量较低。与附近含盐量较低的流沙相比, 盐分使戈壁土壤的水分含量增大了 10 倍以上, 在热动力学作用下使浅层土壤水分的活动能力大大增强, 对 GSPC 系统水分的垂直运转和潜水蒸发产生了重要影响。这为极干旱区利用潜水进行生态恢复提供了新的可能, 对莫高窟的文物保护也具有重要意义。

关键词: 盐分; 土壤水分; 芒硝; 极干旱地区

中图分类号: S152.7; S153

土壤盐分对浅埋潜水的运移与蒸发有重要的影响^[1-3], 在干旱地区, 盐分对土壤水分和植被的影响不可忽视^[4-6]。但在极干旱地区, 由于降水稀少, 气候干燥, 潜水的毛细管运输中断, 土壤水分的含量极低, 通常处于萎蔫系数以下, 绝大多数植物难以存活, 形成了荒漠化土地和生态链的断裂^[7-10]。因缺乏生态价值, 目前对典型干旱土壤的水-盐耦合研究相对较少。但在文物保护领域, 因为保存上的特殊要求, 对低湿环境下的水-盐耦合研究已进行得较为深入^[11-13]。然而近年来笔者在极干旱区的敦煌莫高窟进行的拱棚实验表明, 虽然该区潜水埋深较深 (>200 m), 但仍然存在潜水蒸发, 潜水是极干旱区土壤水分的重要来源^[14-16]。该区长期的土壤水分监测表明, 盐分对土壤水分的结构产生了重要影响^[17], 盐分的含量、种类、分布可能影响到土壤水分的分布^[18]与 GSPAC (地下水-土壤-植被-大气) 水分的垂直运转^[16]。

调查发现, 该区 50 cm 之上的土壤富含盐分, 30 cm 左右的可达 9% 左右, 呈结晶状, 但仍有根系分布。表明超旱生植物具备某种机制可吸收富盐土壤中的水分, 与内蒙古马文峰的发现基本一致^[19]。如果这与潜水来源的发现相结合, 利用塑料薄膜覆盖、凝结等技术手段将潜水凝聚^[17]于适宜层位, 使无效蒸发的潜水绝大部分能为植被所利用, 那么就完全有可能恢复极干旱区的荒漠化土地。

为此, 笔者在借鉴文博领域水-盐研究成果的基础上检测盐分, 根据相关盐分的理化特性对土壤水分的影响进行分析, 探讨盐分在极干旱区土壤水分中的作用与活动机理, 为生态恢复与重建提供科学依据。同时, 在窟顶戈壁进行土壤盐分-水分的相关性研究, 无疑可为科学认识洞窟水-盐耦合运移提供参考, 对石窟类文物的保护具有积极意义。

1 材料来源与研究方法

为了有效保护莫高窟文物, 长期以来敦煌研究院对洞窟围岩及外围土壤的盐分、水分进行了较大范围的监测与研究。自 20 世纪 80 年代以来, 与国外机构进行了广泛合作, 不但对莫高窟的气候环境进行了长期监测, 而且用微型探测仪对洞窟岩体内的空气、温湿度从不同方位、高度和深度上进行了细致的监测^[20-21], 取得了大量的基础数据; 自 2008 年, 笔者将洞窟监测水分的方法引入到戈壁土壤水分的研究中, 在土壤中直接埋入美国产微型温湿度监测仪 HOBO-U23-001, 长期对地上 50 cm 及地下 0~290 cm 不同深度的土壤空气相对湿度、绝对湿度、温度等进行了监测^[15-16], 这为水-盐研究提供了良好的平台。

土壤水分的监测发现, 盐分含量较高的戈壁土壤比盐分含量较低的流沙水分含量明显要高, 在拱棚试验中形成的凝结量也较大^[14-16]。引起这些差异的主要

①基金项目: 国家自然科学基金项目 (40940005) 资助。

作者简介: 李红寿 (1970—), 男, 甘肃秦安人, 馆员, 主要从事干旱区环境和文物保护等方面的研究。E-mail: dhlhs69@163.com

原因可能与土壤盐分的含量、构成有关。为此,在远离降雨时笔者专门用 ICS-2500 离子色谱分析仪分别测定戈壁土壤和流沙 0、5、10、20、30、40、50、60 cm 主要盐分的含量,并用烘干法测定土壤水分含量,根据关键盐分的理化特性,对比分析它在土壤水分及 GSPAC 水系统运转中的作用。

2 研究区域状况

研究区域位于莫高窟窟顶戈壁-流沙交界的平坦地带。该区年降水量 42.2 mm,年平均相对湿度 31%,干燥指数 32;太阳辐射强度可高达 1.1 kW/m^2 ,地表最高温度可达 70°C ,年日照率 71%;年平均温度 11.2°C ,风速为 4.1 m/s (2005 年)。当土壤处于远离降雨的典型极干旱状态时,戈壁土壤水分含量见图 1,流沙水分含量见图 2。很明显它们的水分含量不在同一数量级上,但都随日温度的变化存在波动^[16-17]。

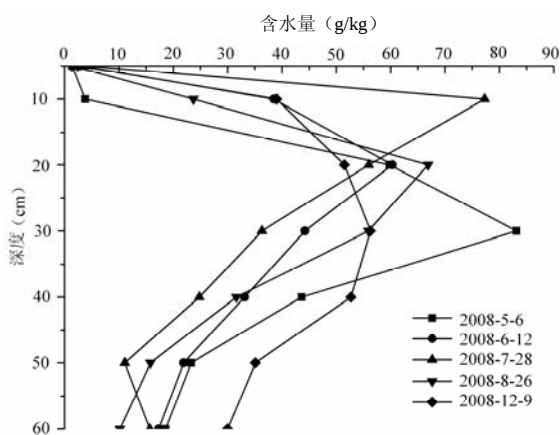


图 1 典型干旱气候下戈壁土壤水分的分布

Fig. 1 Gobi soil moisture distribution in representative dry climate

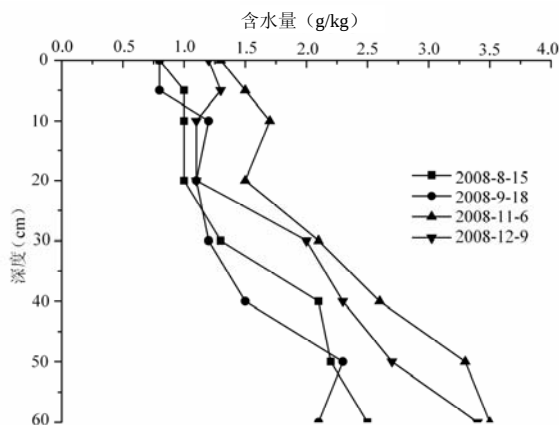


图 2 典型干旱气候下流沙水分的分布

Fig. 2 Dune moisture distribution in representative dry climate

3 结果与分析

3.1 土壤空气湿度与盐分

用 HOBO-U23-001 监测的典型干旱气候条件下戈壁土壤空气的相对湿度如图 3。流沙相对湿度的分布格局与之一致^[16],随深度的增加而增大。流沙 50 cm 以上的日波动幅度相对较大。它们的绝对湿度分布格局与图 3 类似,随深度递增^[15-16]。0~60 cm 浅层土壤空气的湿度随日温度的变化而波动,60 cm 以下基本不受日温度变化的影响,稳定在 90% 以上^[18]。初步监测发现,深层湿度可达饱和,最浅饱和和深度为 290 cm。

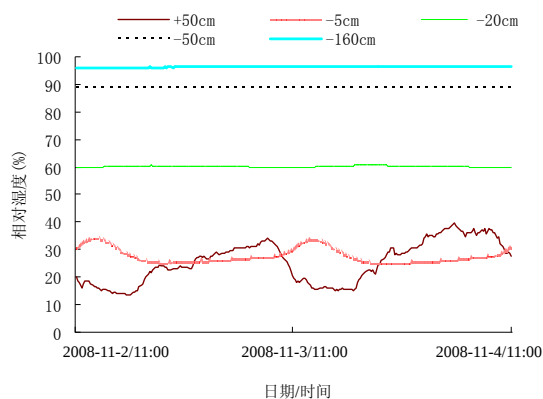


图 3 戈壁土壤空气的相对湿度

Fig. 3 Relative humidity in Gobi soil

表 1 的对比说明戈壁土壤富含盐分,盐分含量和水分含量分别是流沙的 92 倍和 24 倍。水分含量的垂直分布与盐分含量的垂直分布基本一致。由于潜水来源的存在,水分含量没有随晴朗天气的持续延长而下降,与图 1、图 2 一样保持相对稳定。充分降雨后,戈壁土壤白色盐结晶可占据相当的土壤空间,含水量可达 188 g/kg ,高于盐分完全溶解后的最大持水量 133 g/kg 。披覆层(0~5 cm)的含盐量较低,受其薄厚的影响,最高含盐层的深度略有变化。

3.2 盐分种类对土壤水分的影响

戈壁土壤易溶盐的离子含量与成分虽如表 1,事实上混合盐溶液的结晶析出比较复杂,在不同条件下的析出存在一定变化^[22]。按照通常析出状况还原的戈壁土壤无水盐分的构成如表 2^[20],数量与表 1 基本吻合。

用 ICS-2500 离子色谱分析仪测定的戈壁土壤与流沙的主要盐离子含量与构成见表 1。

表 1 戈壁与流沙主要盐分构成、盐分含量和水分含量 (g/kg) 的对比

Table 1 Comparison of salinity mainly compositions, salinity contents, water contents of Gobi soil and dune

研究对象	层位 (cm)	阴离子			阳离子				离子总量	水分含量
		Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺		
戈壁土壤	0	0.086	0.006	0.275	0.092	0.007	0.002	0.129	0.469	2.0
	5	0.020	0.002	0.076	0.038	0.007	0.001	0.027	0.143	2.1
	10	27.765	1.365	16.127	25.206	0.890	0.191	1.436	71.544	65.2
	20	8.840	0.672	15.626	13.095	0.370	0.099	0.678	38.701	73.8
	30	3.926	0.275	3.927	3.992	0.178	0.042	0.700	12.341	55.5
	40	1.917	0.083	1.966	1.766	0.097	0.012	0.548	5.842	33.7
	50	1.039	0.048	1.575	1.022	0.055	0.007	0.454	3.746	26.7
	60	0.907	0.046	1.331	0.928	0.059	0.007	0.352	3.277	17.9
流沙	0	0.024	0.009	0.076	0.027	0.004	0.001	0.038	0.179	1.1
	5	0.019	0.004	0.092	0.036	0.005	0.001	0.032	0.188	1.4
	10	0.019	0.004	0.161	0.079	0.006	0.001	0.028	0.299	1.2
	20	0.013	0.002	0.053	0.031	0.004	0.001	0.015	0.118	1.4
	30	0.010	0.002	0.053	0.037	0.003	0.000	0.005	0.110	1.4
	40	0.017	0.005	0.036	0.033	0.003	0.000	0.006	0.101	1.5
	50	0.010	0.002	0.050	0.041	0.003	0.000	0.008	0.114	1.7
	60	0.031	0.006	0.194	0.116	0.007	0.001	0.020	0.375	2.0

表 2 莫高窟窟顶戈壁土壤不同深度的盐分组成与含量 (g/kg)

Table 2 Salinity compositions and contents in different depths of Gobi soil over the top Mogao Grottoes

土层 (cm)	NaCl	Na ₂ SO ₄	CaSO ₄	Ca(HCO ₃) ₂	KCl	MgSO ₄	CaCO ₃	总含盐量
0 ~ 10	53.62	13.70	19.69	0.48	1.03	0.57	0.09	91.87
10 ~ 30	8.50	22.98	11.30	0.53	0.41	0.16	0.09	44.62
30 ~ 50	431	5.92	10.19	0.57	0.23	0.10	0.12	22.30
50 ~ 70	3.13	2.94	12.18	0.55	0.15	0.08	0.12	17.75

根据其中 NaCl、Na₂SO₄、KCl、MgSO₄·7H₂O、Na₂SO₄·10H₂O 等盐分的特性, 25℃下, 当相对湿度分别到达 75%、83%、84%、88% 和 91% 时会吸附水分潮解或结晶, 甚至溶解^[19, 23]; 相应地, 在温度高于 25℃或相对湿度低于相应数值时, 结晶水分就会部分分解。土壤盐分的吸湿吸附、结晶与分解是温湿度控制下的动态平衡过程, 当湿度增大或温度降低时盐分会吸收水分, 反之会分解释出水分。

表 2 中 CaSO₄ 可形成 CaSO₄·2H₂O, 而 CaSO₄·2H₂O 一旦形成, 需要 107℃ ~ 170℃ 的高温才失去部分结晶水分, 成为熟石膏 (2CaSO₄·H₂O), 土壤的温度环境显然不能使之发生这样的变化。同样, 土壤的温湿度条件可使 Ca(HCO₃)₂ 转化为 CaCO₃, 而土壤环境不能使 CaCO₃ 形成 Ca(HCO₃)₂; CaCO₃ 不能形成结晶水。因此, 该区土壤中的 CaSO₄·2H₂O、Ca(HCO₃)₂ 和 CaCO₃

不能通过水分子化合的方式“吞吐”水分, 充当水分运转的载体。

戈壁土壤空气湿度监测如图 3, 20 cm 的相对湿度在 60% 左右波动, 除降雨及天气过程外, 20 cm 之上通常保持在 60% 以下, 远低于主要盐分 NaCl、Na₂SO₄、KCl、MgSO₄ 吸湿潮解的湿度, 因此, 20 cm 以上土壤水分主要以土壤颗粒吸湿的强结合水分活动为主, 在温度作用下进行分解蒸发和吸湿吸附, 形成了 20 cm 之上土壤水分的日波动变化。20 cm 以下的盐分主要是 Na₂SO₄, 芒硝的特性对土壤水分的影响不容忽视。

3.3 芒硝特性的对应分析

芒硝的相图如图 4, 主要受温度和相对湿度控制。

从图 4 看, 芒硝在 0 ~ 32.5℃ 范围内, 当相对湿度低于 61% ~ 85% 的上临界相变边界线时, 以无水芒硝的形式存在。该边界线的温湿度范围正好与戈壁土

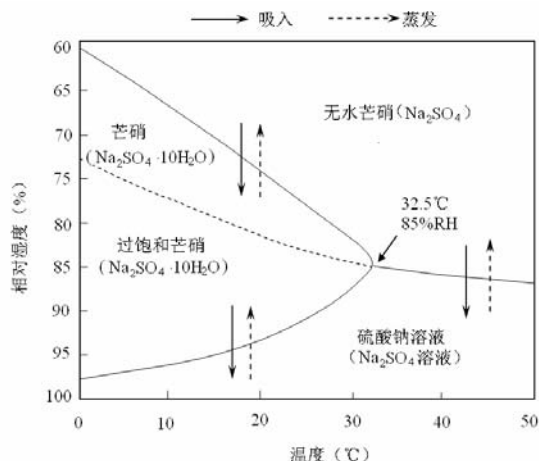
图 4 芒硝相图 (仿 Matthie 等^[24])

Fig. 4 Phase diagram for sodium sulfate

壤富含芒硝的 20~50 cm 左右相对应, 因此, 20~50 cm 芒硝处在临界线附近活动, 当白天相对湿度低于边界线时, 以无水芒硝的形式存在; 夜间相对湿度高于边界湿度时形成 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 。芒硝对于水汽既是“源”又是“汇”, 随温湿度变化产生结合与分解反应, 是水分运转重要的载体, 在水分向上运移中起到“泵”的作用。盐分大大增加了水分的运转能力, 在戈壁^[15]和流沙^[16]上所扣拱棚大小完全一样, 在同一时期棚内水分的凝结量对比如图 5, 戈壁拱棚凝结量是流沙拱棚的 2.1 倍 (据 2010 年拱棚-空调冷凝试验表明, 戈壁的实际蒸发量是流沙的 8 倍左右), 戈壁拱棚的凝结量远大于流沙拱棚。但受同一气候的影响, 凝结量的变化趋势较为一致。

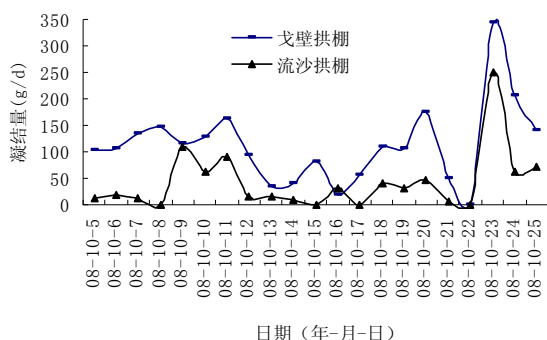


图 5 戈壁棚内与流沙拱棚水分凝结量的对比

Fig. 5 Quantity condensing in Gobi canopy compared with dune canopy

深层土壤受地热驱动的影响, 290 cm 水汽可达到饱和湿度, 形成凝结水分。由此推断, 深层土壤颗粒表面可形成较厚薄膜水分, 并可溶解少量 SO_4^{2-} 、 Na^+ 等

盐离子。对应于芒硝相图, 相对湿度高于 98% 时芒硝将以硫酸钠溶液的形式存在。

通常认为膜状水具有较强的非溶解性。关于这一点, 我们要区分试验与该地实际条件的差别。在封闭系统无外界水分干扰试验条件下, 膜状水的强非溶解性是显而易见的。当土壤含有盐分 (该区深层土壤的含盐量在 10 g/kg 左右), 且长期处于高湿的开放条件下时, 盐分必然潮解, 吸湿吸附的水分可使盐分溶解。反之, 假如没有地下水汽的支持与补充, 即使不考虑蒸发, 当水汽以盐分为界面时相对湿度应远在饱和湿度之下, 事实上我们在 2.9 m 监测到了饱和湿度。饱和湿度相对于含盐界面来说是过饱和的 (我们也在洞窟围岩 1.25 m 处监测到了过饱和湿度^[21])。这说明在地热驱动下存在充足潜水水汽向上运移, 同时说明, 必定有较大数量的水汽在向膜状水分转换, 这也必然使膜状水的厚度增加, 成为具备一定的溶盐性的厚膜状水。当薄膜厚度增加到土壤颗粒对水分子的引力作用基本消失时最大, 其溶盐性较强, 反之则微弱。

戈壁 2.9 m 之上土壤空气湿度逐渐降低, 造成了水汽向上运移的空气湿度梯度。在 50 cm 之下相对湿度由 85% 逐渐增高 (图 3), 大约在 2.0 m 相对湿度为 98%, 因此在 50~200 cm 之间的芒硝状况处于芒硝相图的下边界线, 在过饱和芒硝和硫酸钠溶液间随极微弱的温度变化而互换。我们在该层位开挖后发现针状结晶形成, 说明的确有盐溶液存在。在该层位受水分蒸发的影响和膜状水-盐溶液的浓度递增, 水势差会促成不受重力影响的水-盐膜状溶盐向上运移, 至 50~20 cm 层面析出, 完成深层盐分向浅层的聚集过程。也可能正是膜状水的低盐特性 (强非溶解性), 才使植物根系产生了响应, 在富盐土壤中仍有分布, 使膜状水分得到有效的吸收和利用^[19]。

因此, 当土壤温度低于 32.5°C 时 (图 4), 无水芒硝可与水分相结合形成 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, 这是富含芒硝的戈壁土壤含水量较高的主要原因 (图 1)。当温度高于 32.5°C 时, 分解形成无水芒硝 (Na_2SO_4), 这也是夏季棚内戈壁土壤 20 cm 左右水分含量减小的主要原因。戈壁土壤 20 cm 富含芒硝, 夏季该层土壤温度一直低于临界值 32.5°C, 因此水分含量较高。拱棚的增温效应可使棚内 20 cm 左右的温度高于棚外 6°C 左右, 高于该临界温度, 这决定了芒硝只能以无水 Na_2SO_4 的形式存在, 因此棚内土壤含水量明显降低 (图 6)。但当温度低于临界值时, 由于拱棚效应, 20 cm 之上的相对湿度增大 9% 左右, 远高于 61%, 这不但使 20 cm 的水分含量得以恢复, 高于对照和扣棚前的原始湿度 (图

1, 2008-6-12)^[15], 而且使包括 10 cm 在内的芒硝大量结晶, 土壤水分明显增高(图 7)。无水芒硝完全结晶后可增重 1.2 倍, 因而充分结晶的土壤水分含量(188 g/kg)远大于盐分溶解后的土壤最大持水量(133 g/kg), 棚内戈壁土壤水分的降低量(40 g/kg)与芒硝含量可引起的变化量基本对应。流沙中盐分含量较低, 拱棚内的水分含量在 0.5~3.5 g/kg 之间变动, 流沙受棚内较高空气湿度的影响水分含量略有增大, 但与图 2 基本一致, 无高温突变反应^[16]。

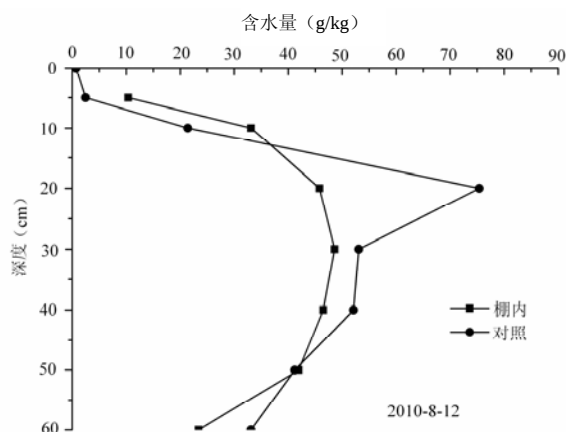


图 6 高温季节棚内外戈壁土壤水分对比

Fig. 6 Comparison of Gobi soil moistures outside and inside of canopy in higher temperature season

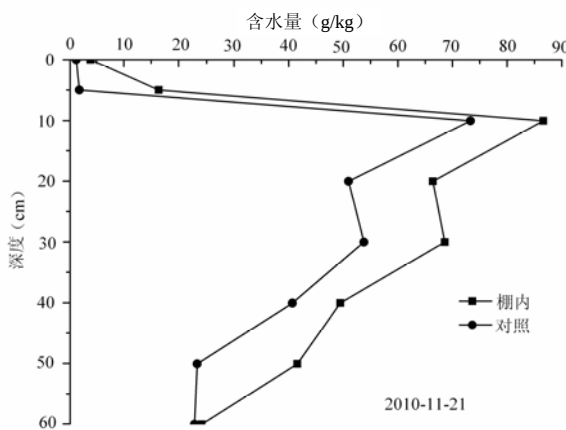


图 7 低温季节棚内外戈壁土壤水分的对比

Fig. 7 Comparison of Gobi soil moistures outside and inside of canopy in lower temperature season

另外, 当棚内戈壁土壤温度突然降到 32.5℃ 以下时, 无水芒硝可从棚内空气中吸收大量的水分, 使膜

面凝结量急剧下降。当棚内温度超过 32.5℃ 时, 结晶水分将大量分解, 但夜间芒硝层温度通常可保持在这一临界值之上, 芒硝不再吸收水分, 棚内较高的水汽含量导致凝结量急剧增大^[25](图 5)。这是除天气外影响棚内水分凝结量的主要原因。

3.4 盐分对水分影响的综合分析

盐分对戈壁土壤的水分垂直分布与运转产生了重要影响, 其基本分布格局如图 8。

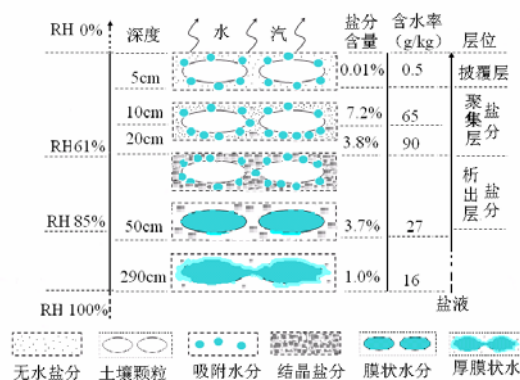


图 8 戈壁土壤水-盐垂直分布示意图

Fig. 8 Sketch map of Gobi soil moisture-salinity vertical distribution

在 0~20 cm 主要为无水的盐分, 土壤水分含量极低, 以土壤颗粒吸湿吸附的强结合水为主。在强烈日温度影响下, 升温过程大部分结合水分解, 形成蒸发。在降温过程土壤从下层土壤或上层大气中吸湿吸附水分, 形成土壤水分的“呼吸”, 使空气相对湿度和土壤水分形成较剧烈日波动变化^[25]。需要指出的是, 该区降雨天气虽极少, 但受大气环流的影响, 空气湿度常呈现数天一次的波动过程, 当空气湿度超过 61% 时, 就会影响到该层位的水分含量, 尤其芒硝含量最高的 10 cm 处的水分含量(图 1、表 1)。

20~50 cm 的空气相对湿度逐渐增大, 日温度的影响逐渐微弱, 如图 3。该层 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 的含量较高, 结晶盐分在一定温度范围内与饱和盐溶液一样具有恒湿性, 当温度升高或降低时, 结晶盐分的分解或吸湿吸附水分可保持相对湿度的稳定, 因此, 该层位戈壁土壤空气湿度日波动较流沙明显要小。其实除了芒硝, NaCl 、 Na_2SO_4 、 KCl 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 等盐分在适宜湿度下的潮解、结晶也能起到与芒硝类似的湿度稳定作用和水分运转功能。

在整个 20~50 cm 层面上热传导引起的温湿度变化都能析出盐分。在较大降雨下, 受较高湿度波动的影响, 盐分会逐渐向湿度较低的上层偏移聚集, 在 20

cm 稍微偏上的区域“搁浅”，累积形成最高的盐分含量，在日温度过程中形成芒硝与无水芒硝在临界线附近随湿度的日波动。当形成 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ （表 1、表 2 和图 8）为主的结晶盐分，可使该层土壤含水量达到 9.0%，波动幅度最大。当上层温度较高时芒硝结晶分解形成水汽，此时下层温度较低，大部分水汽会被下层芒硝吸收；由于温度的迟滞作用，当上层温度下降时，下层高温蒸发的大部分水分会被上层的无水盐分吸收^[15]。因此，戈壁土壤实际向外蒸发的水分占内部波动水分的极少部分，但盐分的存在增大了潜水蒸发的强度。

随着土壤深度的增加，戈壁土壤 50 cm 以下的芒硝及其他盐分的含量随之递减至 1.8%（表 2），土壤水分含量也随之降低至 1.6% 左右（图 8、图 1）。土壤盐分以膜状硫酸钠水盐溶液为主，并有少量过饱和芒硝存在，水分含量较低（图 4、图 8）。在 200 cm 以下相对湿度高于 98%，仅有膜状水盐溶液附着于土壤颗粒。

浅层（0~50 cm）土壤水分受日温度的影响呈时空异质性波动。水分含量与盐分含量呈正相关（表 1）。戈壁土壤因盐分含量较高，相应的水分含量也较高，水分日变化波动较为强烈。流沙含盐量较低，水分明显较少，波动幅度很小，这在很大程度上规避了环境热动力效应对水分的影响，使运转水分的能力大大降低，有效地降低了潜水的蒸发量。

极干旱区土壤在较强的热动力作用下，可源源不断地从地下“泵出”水分，盐分对土壤水分的结构与活动产生了重要的影响。这些盐分是气候干旱化下长期潜水蒸发的产物：深层矿物溶解于膜状水中，随潜水运移至浅层土壤后水分蒸发，矿物盐分滞留于蒸发面的土壤中，经过一定的地质时期，使较为古老的窟顶戈壁土壤形成了较厚（50 cm）的富盐土层（如内蒙古干旱区土壤也存在富盐层，笔者推断这并非湖相水成盐分的遗留，同样是长期干旱化下潜水蒸发的产物，盐分富集的层位受淋溶影响保存深度较深，盐分的种类因地质背景有较大的差异^[19]）。因此，窟顶戈壁盐分含量远高于流沙。反过来，盐分的析出和累积又增加了水分的运转能力。以芒硝为代表的结晶盐分是水分运转的关键载体，对潜水的运转与蒸发具有重要影响。

盐分在浅层土壤析出过程中，因盐离子的特性不同析出的层位也不同，存在明显序列，如表 1。盐分种类分布明显影响到水分的分布。当土壤受到扰动时，层状分布可自行修复，降水可加速“愈合”。同时，受当地较小降雨（<5 mm 降水占总频次的 85%）引导的

影响， Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等盐离子上移，置留于 20 cm 之上的相对湿度小于 61% 干燥带，因此致使 10 cm 左右聚集的盐分含量最高，这与一般地区的淋溶下移相反。

洞窟围岩 0~35 cm 盐分明显较高，盐分构成与分布格局^[21]与戈壁土壤完全一致。由于洞窟盐分的形成时间最多有 1 640 年左右，含盐量较戈壁土壤明显要低。如果没有长期潜水运移与蒸发，洞窟富盐层的形成将难以解释。2010 年笔者已初步在洞窟中收集到来自围岩的稳定输出水分。因此，戈壁与洞窟水盐同源，运行机理相同，都是汽液二相交替并行；盐分在环境动力影响下的活动与窟顶戈壁具有相似性。窟顶戈壁土壤的较高盐分含量在一定程度上增大了洞窟围岩的水分通量，对洞窟水分会产生一定的影响。显然，戈壁土壤水-盐耦合的研究可为洞窟文物保护提供重要参考。

需要补充说明的是，莫高窟戈壁土壤不但在垂直方向存在水-盐分异，而且在水平方向也存在水-盐分异。最新发现在莫高窟窟顶戈壁遍布发育充分砂楔结构，楔深 50 cm 左右，楔口宽 10~50 cm。砂楔将土壤分割为不规则的多边形结构，砂楔的盐分和水分含量较母体存在较大差异。本文戈壁土壤的盐分、水分含量都是以多边形母体为准。

4 结论

莫高窟戈壁土壤 0~50 cm 富含盐分，盐分导致水分含量明显增大，形成了土壤水势极低的富水层。土壤盐分的含量、种类和分布对水分的空间分布产生了重要影响。结晶盐分是极干旱区水分运转的重要载体，在一定程度上增大了水分运转的能力，对极干旱区 GSPC 系统水分有重要影响。其中芒硝对土壤水分的分布与活动具有关键作用，它的水分理化特性、含量、分布与土壤水分的实测完全吻合。极干旱区土壤盐分对水分影响的研究，对开发利用潜水进行生态恢复具有重要意义，可为莫高窟及同类型石窟文物的保护提供重要参考。

致谢：本试验数据的收集和图例绘制得到了邱飞、詹洪涛、蔺双虎、李睿、乔海、李国帅的大力支持，在此特致感谢！

参考文献：

- [1] 孙明, 薛明霞, 王立琴. 潜水蒸发与埋深关系模型研究. 山西水利科技, 2003(3): 16-18

- [2] 李玮, 王立, 姜涛. 地下水浅埋区盐碱地滴灌条件下土壤盐分运移研究. 干旱地区农业研究, 2007(5): 130-135
- [3] 邹平, 杨劲松, 福原辉幸, 寺崎宽章, 何超. 蒸发条件下土壤水盐热运移的实验研究. 土壤, 2007, 39(4): 614-620
- [4] Sperry JS, Hacke UG. Desert shrub water relations with respect to soil characteristics and plant functional type. *Functional Ecology*, 2002, 16: 367-378
- [5] 张占江, 徐海量, 石书兵, 李吉玫. 水分、盐分和埋深对铃铛刺和疏叶骆驼刺种子萌发的影响. 干旱区地理, 2008, 31(5): 687-692
- [6] Berndtsson R, Nodomi K, Yasuda H, Persson T, Chen HS. Soil water and temperature patterns in an arid desert dune sand. *Journal of Hydrology*, 1996, 185(1): 221-240
- [7] 周爱国, 孙自永, 马瑞. 干旱区地质生态导论. 北京: 中国环境科学出版社, 2007: 34-47
- [8] 汤梦玲, 徐恒力, 曹李靖. 西北地区地下水对植被生存演替的作用. 地质科技情报, 2001, 20(2): 79-82
- [9] 陈敏建, 王浩, 王芳. 内陆干旱区水分驱动的生态演变机理. 生态学报, 2004, 24(10): 2 108-2 114
- [10] 托马斯·T. 沃纳著. 魏文寿, 崔彩霞, 尚华明译. 沙漠气象学. 北京: 气象出版社, 2008: 136-153
- [11] Shahidzadeh-Bonn N, Rafa S, Bonn D, Wegdam G. Crystallization during evaporation: Impact of interfacial properties. *Langmuir*, 2008, 24: 8 599-8 605
- [12] Zhang HY, Yan L, Wang JF. Salt Hazard of Earthen Monuments Induced by Capillary Rise. *Proceedings of International Symposium Conservation of Ancient Sites 2008 & ISRM-Sponsored Regional Symposium*. Beijing: Science Press, 2008(1): 229
- [13] Matthieu A, David B, Jean-Philippe B, Béatriz M, Ronan H, Christian D. Modification of the porous network by salt crystallization in experimentally weathered sedimentary stones. *Materials and Structures*, 2008, 41(6): 1 091-1 108
- [14] Li HS, Wang WF, Zhan HT, Qiu F, An LZ. New Judgment on the source of soil water in extremely dry zone. *Acta Ecologica Sinica (International Journal)*, 2010, 30(1): 1-7
- [15] 李红寿, 汪万福, 张国彬, 张正模, 王小伟. 用拱棚法对极干旱区 GSPAC 水分运转的分析. 干旱区地理, 2010. 33(4): 572-579
- [16] 李红寿, 汪万福, 张国彬, 邱飞, 詹鸿涛. 用拱棚法对极干旱区沙地水分来源地定性分析. 中国沙漠, 2010, 30(1): 97-103
- [17] 李红寿, 汪万福, 郭清林, 范于权, 李燕飞. 敦煌莫高窟干旱地区水分凝聚的机理分析. 生态学报, 2009, 29(6): 3 118-3 205
- [18] 姚荣江, 杨劲松, 姜龙, 陈德明. 基于聚类分析的土壤盐渍剖面特征及其空间分布研究. 土壤学报, 2008, 35(1): 56-65
- [19] 贾文峰, 张伟华, 马玉明. 强吸湿性盐类与超旱生植物生存水分耦合机理研究. 安徽农学通报, 2010, 9(1): 68-71, 96
- [20] 李最雄编著. 丝绸之路石窟壁画彩塑保护. 北京: 科学出版社, 2005: 360-371
- [21] 郭青林, 王旭东, 薛平, 张国彬, 樊再轩, 侯文芳, 张正模. 敦煌莫高窟底层洞窟岩体内水汽与盐分空间分布及其关系研究. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增 2): 3 769-3 776
- [22] 张吕正, 陆小华, 王延儒, 时钧. 水盐体系相图的计算. 高校化学工程学报, 1997(2): 113-118
- [23] 郭宏, 李最雄, 袁元勋, 许志正, 汤家镛, 杨福家. 敦煌莫高窟壁画酥碱病害机理研究之三. 敦煌研究, 1999(3): 153-175
- [24] Matthieu A, Jean-Philippe B, David B, Beatriz M, Ronan H, Christian D, Beatriz M. Salt crystallization in pores: Quantification and estimation of damage. *Environ. Geol.*, 2007, 52: 205-213
- [25] 李红寿, 汪万福, 张国彬, 邱飞, 詹鸿涛. 极干旱区土壤与大气水分的相互影响. 地球科学与环境学报, 2010, 32(2): 183-188

Salinity Influence on Soil Moisture Vertical Distribution and Transport in Extremely Dry Area

LI Hong-shou^{1,2}, WANG Wan-fu^{1,2,3}, WU Fa-si^{1,2}, AN Li-zhe³

(1 *The Conservation Institute of Dunhuang Academy, Dunhuang, Gansu 736200, China;* 2 *Key Scientific Research Base of Conservation for Ancient Mural (Dunhuang Academy) State Administration for Cultural Heritage, Dunhuang, Gansu 736200, China;*

3 *School of Life Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: Through measuring and analyzing salinities' physical and chemical characteristics of Gobi soil near the Mogao Grottoes, we discovered that soil salinity had a great impact on the vertical distribution of soil water content. The content distribution, physical and chemical characteristics of crystal salinities, which was represented by mirabilite, tallied closely with the distribution of soil moisture. The depth from 0 to 20 cm was mainly dominated by anhydrous salinities (Na_2SO_4), and water content was relatively low, it was salt concentration layer. The depth from 20 to 50 cm was mainly dominated by crystal salinities ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), and water content was relatively high, it was salt precipitation layer. The depth of below 50 cm was mainly dominated by filmy salt solution, and water content was relatively low. Compared with near dune which had low salinity, salinity caused water content of Gobi soil increased by 10 times more. Under thermokinetics action, water movement was greatly increased in shallow soil. It is important to the upright water transport and ground water evaporation of GSPAC system. This offers a new way to ecological recovery by using ground water and also important to protect Mogao grottoes cultural relics.

Key words: Salinity, Soil moisture, Mirabilite, Extremely dry area