

# 咸水滴灌下塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地 土壤水分三维时空动态\*

丁新原<sup>1,2,3</sup> 周智彬<sup>1,2\*\*</sup> 徐新文<sup>1</sup> 雷加强<sup>1</sup> 鲁晶晶<sup>1,2,3</sup> 马学喜<sup>1,3</sup> 冯 筱<sup>1,3</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; <sup>2</sup>荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011; <sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要** 通过对咸水滴灌下塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地的土壤水分进行实时监测, 研究了4—7月各灌水周期内土壤水平0~60 cm和垂直0~120 cm空间距离范围内的水分三维时空变化. 结果表明: 咸水滴灌下绿地土壤水分表现出周期性的动态规律, 且在忽略降雨时, 这种规律随时间变化未表现出明显差异; 非降雨与降雨条件下的土壤水分时空变化差异显著. 土壤含水量在4月偏高, 7月偏低, 在有明显降雨的6月最高; 土壤水分在不同时间尺度上的变化特征不同, 但整体随月变化(4—7月)呈下降趋势, 随日变化(1~15 d)呈幂函数递减规律, 且在周期内先后经历3个不同变化阶段. 土壤水分在水平空间距离上呈一元线性递减, 在垂直空间上近似表现为双峰曲线, 且在20 cm土层处有一个显著峰值; 土壤水分空间分布特征取决于土壤自身的物理性质.

**关键词** 咸水滴灌; 土壤水分动态; 三维时空; 人工绿地; 塔克拉玛干沙漠

**文章编号** 1001-9332(2015)09-2600-09 **中图分类号** S152.7 **文献标识码** A

**Three-dimension temporal and spatial dynamics of soil water for the artificial vegetation in the center of Taklimakan desert under saline water drip-irrigation.** DING Xin-yuan<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Zhi-bin<sup>1,2</sup>, XU Xin-wen<sup>1</sup>, LEI Jia-qiang<sup>1</sup>, LU Jing-jing<sup>1,2,3</sup>, MA Xue-xi<sup>1,3</sup>, FENG Xiao<sup>1,3</sup> (<sup>1</sup>*Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*; <sup>2</sup>*State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Urumqi 830011, China*; <sup>3</sup>*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2015, **26**(9): 2600–2608.

**Abstract:** Three-dimension temporal and spatial dynamics of the soil water characteristics during four irrigating cycles of months from April to July for the artificial vegetation in the center of Taklimakan Desert under saline water drip-irrigation had been analyzed by timely measuring the soil water content in horizontal and vertical distances 60 cm and 120 cm away from the irrigating drips, respectively. Periodic spatial and temporal variations of soil water content were observed. When the precipitation effect was not considered, there were no significant differences in the characteristics of soil water among the irrigation intervals in different months, while discrepancies were obvious in the temporal and spatial changes of soil moisture content under the conditions of rainfall and non-rainfall. When it referred to the temporal changes of soil water, it was a little higher in April but a bit lower in July, and the soil water content in June was the highest among four months because some remarkable events of precipitation happened in this month. However, as a whole, the content of soil moisture was reduced as months (from April to July) went on and it took a decreasing tendency along with days (1–15 d) following a power function. Meanwhile, the characteristics of soil water content displayed three changeable stages in an irrigation interval. When it referred to the spatial distributions of soil water, the average content of soil moisture was reduced along with the horizontal distance following a linear regression function, and varied with double peaks along with the vertical

\* 水利部公益性行业科研专项(201401049)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050504)、国家自然科学基金项目(41271341)和塔里木油田分公司综合项目(971012080007)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: zhouzb@ms.xjb.ac.cn

2014-11-03 收稿, 2015-05-11 接受.

distance. In addition, the spatial distribution characteristics of the soil water were not influenced by the factors of precipitation and irrigating time but the physical properties of soil.

**Key words:** saline water drip-irrigation; dynamics of soil water; three-dimensional space and time; artificial vegetation; Taklimakan Desert.

在荒漠地区,水分是制约植被生长的最大限制因子,也是影响荒漠生态系统结构稳定和功能正常的关键因子,且在防风固沙、遏制沙害等方面扮演着重要角色<sup>[1-3]</sup>.土壤水作为荒漠生态系统水分的主要存在形式,不仅对沙地土壤的发生、演化和土地生产力产生重要影响,而且对整个荒漠生态系统的水热平衡起决定作用<sup>[4]</sup>.同时,由于荒漠地区水分对生物过程控制性的作用和稀少的外界输入<sup>[5]</sup>,土壤水分动态也制约着荒漠地区生态恢复与植被重建工程的可持续性<sup>[6]</sup>.对于荒漠沙质土壤,水分含量越高,受强蒸发作用造成的无效损耗越多,植物水分利用率就越低;水分含量越低,植被越易受到水分胁迫致使生长受到抑制甚至死亡.因此,在荒漠地区进行土壤水分时空变化研究,既可以揭示沙质土地的水分时空分布格局与动态规律<sup>[7-8]</sup>,又能够反映沙地土壤水分与荒漠植物之间的相互作用与联系<sup>[9-11]</sup>,同时有助于分析其土壤水分运动和溶质迁移的机理与过程<sup>[12]</sup>,对荒漠化防治、沙土改良与利用以及退化生态系统恢复与重建<sup>[13]</sup>等方面具有重要意义.

塔克拉玛干沙漠地处我国极端干旱区,自塔里木沙漠公路防护林及沙漠腹地人工绿地建设以来,沙漠公路沿线及腹地沙质土壤的理化性质<sup>[14]</sup>发生了很大变化,土壤环境得到了明显改善<sup>[15]</sup>,并逐步发展成为一个完善的生态系统.但其所处环境的严酷性决定了该生态系统的脆弱性和不稳定性.由于该地区蒸发极其强烈,人工植被必须依赖于来自地下的咸水灌溉才能存活,故受人为干扰较大,而长期、连续、定量的周期性咸水滴灌,使绿地和防护林带土壤水分表现出一定的时空特征.对此,众多学者做了诸多工作<sup>[12,16-19]</sup>.王永东等<sup>[17]</sup>通过野外定位观测研究了滴灌条件下防护林带土壤水分日动态,得出灌水周期内土壤水分随时间变化呈线性递减的变化规律.黄强等<sup>[12]</sup>研究了防护林在畦灌条件下土壤水分的入渗特征,发现停止灌水 24 h 后,91.3% 的灌溉水量渗入到 150 cm 土层以下;停止灌水 72 h 后,96.6% 的灌溉水量渗入到 150 cm 土层以下,而此时 0~150 cm 土层内的平均含水率仅为 5.3%;此后,其土壤水分缓慢下降.以上研究均是围绕土壤水分的垂直变化展开,在水平变化方面尚无人涉及;且研究

的时间尺度多数以分钟、小时、季度和年为主,灌水周期(月)和灌水周期内(日)的水分动态则较少涉及.鉴于此,本文通过对咸水滴灌条件下塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地 4—7 月各个灌水周期内的土壤水分进行实时监测,研究了各灌水周期期间与灌水周期内的三维时空特征,以期掌握该区域土壤水分的时空动态规律,为区域当前咸水滴灌制度的合理性评价与进一步优化、地下咸水资源的科学管理与利用,以及人工绿地和防护林生态工程的后期建设与维护等提供理论支撑.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于塔克拉玛干沙漠腹地的塔中沙漠植物园及其附近的塔里木沙漠公路防护林(39°01' N, 83°36' E),海拔在 1100 m 左右.据塔中气象站观测资料,该区年平均气温 12.4 °C,最热月(7 月)平均气温 28.2 °C,沙面最高温度可达 75.3 °C,最冷月(12 月)平均气温-8.1 °C,气温年较差为 36.3 °C,极端最高气温 45.6 °C,极端最低气温-22.2 °C,极差为 67.8 °C;年平均降水量 24.6 mm,平均相对湿度 29.4%,年蒸发量 3638.6 mm;年平均风速 2.5 m·s<sup>-1</sup>,最大瞬时风速 20 m·s<sup>-1</sup>.地面景观为流动性高大复合沙垄,人工绿地主要位于高大沙垄之间的丘间沙地,土壤特征随地貌不同而有所差异,绝大部分为流动风沙土,下层偶尔有较薄层次亚粘土夹杂在其中.自然植被种类贫乏,群落结构简单,盖度极低,绝大多数地区无植被分布,树种以梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、怪柳属(*Tamarix*)、沙拐枣属(*Calligonum*)等高抗逆性的优良防风固沙植物为主,株行距约 1 m×1 m,配置方式为行间混交.研究区采用轮灌、滴灌的灌溉方式,灌溉咸水矿化度为 4.03 g·L<sup>-1</sup>;灌溉周期为 15 d,每次灌水量为 30 L·m<sup>-2</sup>,冬季(11 月至次年 2 月)免灌.

### 1.2 试验方法

在防护林地梭梭属植株下选取 3 块样地(立地、灌水等条件相同,且灌溉滴头四周渗水较均匀),在一个灌水周期内,分别于灌水后第 1、4、7、10、13 天进行土壤样品采集,各重复两次.垂直方向

上,依次按照距地表 0、10、20、40、60、80、100 和 120 cm 深度进行取样;水平方向上,依次按照距离滴头 15、30、45 和 60 cm 的长度进行取样.取样方法为土钻法,取样时间在 9:00—11:00.将所得土样置于带有标签的铝盒内,并带回实验室内用烘干法进行土壤质量含水量测定.一个灌水周期内取土样  $4\times 8\times 2\times 5$  个,取 4 个灌水周期,共计 1280 个土样.其中,各个灌水周期的取样时间依次为:4 月 13—28 日、5 月 13—28 日、6 月 13—28 日和 7 月 13—28 日.同时,用环刀法(容积为  $100\text{ cm}^3$ )测得试验地土壤垂直空间距离 0、10、20、40、60、80、100 和 120 cm 土层处的容重(相同垂直空间距离处水平方向 0~60 cm 范围内的土壤容重视为相同),共重复 3 次.体积含水量为质量含水量 $\times$ 容重.土壤样品采集和测定时间为 2014 年 4—8 月.

1.3 数据处理

利用 SPSS 软件中的单因素方差分析中的最小显著性差异法(LSD),对 4 个月份各试验灌水周期的土壤水分时间变化特征进行显著性差异比较.利用 Excel 软件进行图形与表格绘制.

2 结果与分析

2.1 土壤水分的时间变化特征

2.1.1 土壤水分周期期间的变化 由图 1 可知,在 4—7 月的各个试验灌水周期内,绿地土壤水分含量整

体在 4 月和 6 月相对较高,在 5 月和 7 月相对较低.4—7 月各月试验灌水周期内的土壤总体平均含水量依次为 6.0%、5.9%、8.0%和 5.5%,其中 6 月的土壤水分含量最高,与其余 3 个月份间的差值相对较大.这是因为在同等灌水条件下,与其他 3 个月份相比,6 月的试验灌水周期内有两次较明显的降雨(分别发生在灌水后第 10 和 11 天,即 6 月 23 日和 6 月 24 日).若不考虑降雨作用的影响,则土壤水分含量与试验的灌水时间(月)序列之间有显著的线性负相关关系,即时序高的 7 月对应的土壤水分含量较低,时序低的 4 月对应的土壤水分含量较高,而 5 月的土壤含水量居于二者之间.这是因为在塔克拉玛干沙漠腹地,4 月的气温较低,7 月的气温较高,相同灌水量下,土壤水分由于自身蒸发和植物蒸腾而散失的水分在 4 月相对较少,而在 7 月相对较多.一定程度上可以认为,4—7 月的绿地土壤水分总体随灌水时间(月)序列的变化呈下降趋势.

具体到二维空间尺度上,绿地土壤水分的时间(月)变化特征又不尽相同(图 2).在水平空间上,4 个水平梯度处的土壤平均含水量均随着时间(月)变化而递减;在垂直空间上,40、60 和 80 cm 深处的土壤平均含水量随时间(月)变化呈升高趋势,其余 5 个垂直距离处的土壤平均含水量均呈下降趋势.这种现象主要与蒸散发等作用有关.4—7 月,随着气温不断升高,土壤因自身蒸发和植物蒸腾而散失

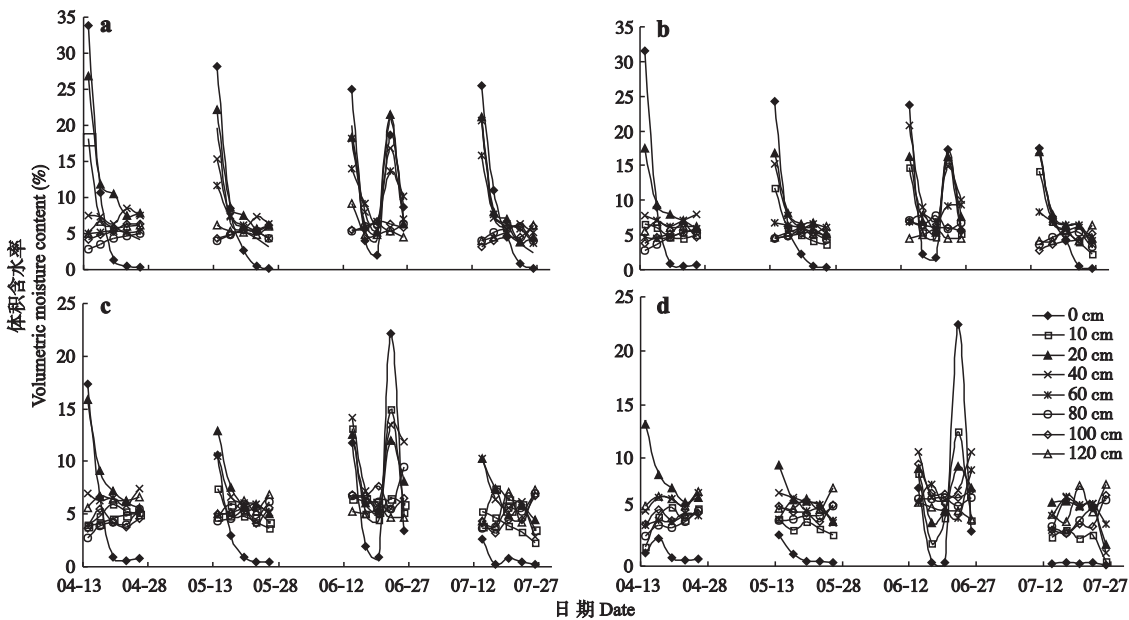


图 1 各试验灌水周期土壤水分的时空动态  
Fig.1 Temporal and spatial dynamics of soil water in experimental irrigation intervals (2014-04-07).

a、b、c、d 分别代表水平距离 15、30、45 和 60 cm. a、b、c 和 d 分别代表水平距离 15、30、45 和 60 cm, respectively.

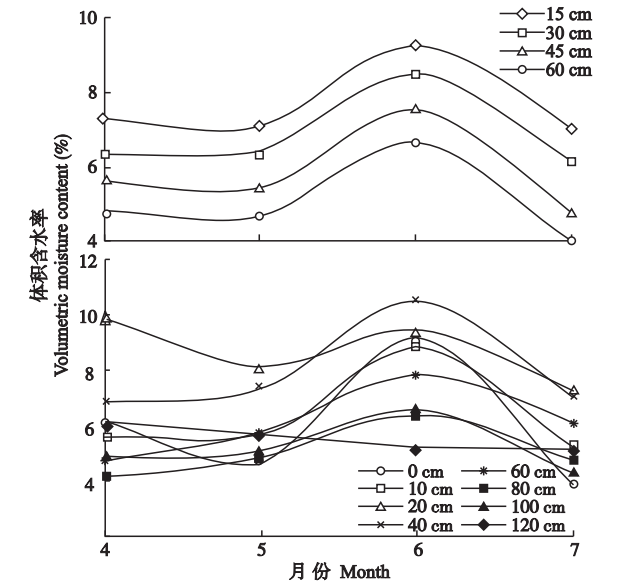


图2 各试验灌水周期的土壤二维空间平均水分变化

**Fig.2** Two-dimensional spatial dynamics of average soil moisture content in experimental irrigation intervals (2014).

的水分逐渐增多,故4个水平梯度的平均含水量均减少.而对于垂直方向,蒸发对较浅土层( $\leq 20\text{ cm}$ )和较深土层( $\geq 100\text{ cm}$ )土壤水分变化的影响较明显,蒸发强度越大,表层水分越亏损,较深土层的水分向上补给越多,从而均在不断下降;在蒸发作用下,深层土壤水分在向上运移时还伴随有下渗的过程,使得中间土层(40~80 cm)的含水量积累逐渐增多而有所升高.

由表1可以看出,4、5和7月各试验灌水周期间土壤水分时间变化规律的差异性并不显著,但三者均与6月的差异性显著.由此可知,降雨(超过一定量)因素对土壤水分的周期性动态产生了显著影响;与之相比,气温对其的影响作用则不显著.因为4—7月渐增的平均气温并未使灌水周期间土壤水分周期性变化规律的明显不同.据此,在忽略一定强度的降雨时,咸水滴灌条件下人工绿地土壤水分在所研究的三维时空范围内的周期变化规律具有一致性,并不随灌水时间(月)序列的变化而表现出明显差异.

**2.1.2 土壤水分周期内的变化** 若不考虑降雨因素的影响,在研究塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地的灌水周期内土壤水分时间变化特征时,不仅可忽略对应不同灌水时间(月)序列的各灌水周期之间的差异性,还可将其土壤水分时空变化值视为重复性实验.本文取3个非降雨月份(4、5和7月)相应时空尺度上的含水率均值作为分析灌水周期内土壤水分

表1 各试验灌水周期土壤水分时空动态差异性比较

**Table 1** Comparison of temporal and spatial dynamics of soil water in experimental irrigation intervals (2014)

| 灌水后天数<br>Days after<br>irrigating | 月份<br>Month<br>(I) | 月份<br>Month<br>(J) | 均值差 Mean deviation (I-J) |          |          |          |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|----------|----------|----------|
|                                   |                    |                    | 15 cm                    | 30 cm    | 45 cm    | 60 cm    |
| 1                                 | 4                  | 5                  | -0.997                   | -1.050   | -0.056   | -0.705   |
|                                   |                    | 6                  | -1.500                   | -2.607   | -2.086   | -3.202 * |
|                                   |                    | 7                  | -1.490                   | -0.543   | 1.917    | 1.087    |
|                                   | 5                  | 4                  | 0.997                    | 1.050    | 0.056    | 0.705    |
|                                   |                    | 6                  | -0.504                   | -1.557   | -2.030   | -2.497   |
|                                   |                    | 7                  | -0.493                   | 0.507    | 1.974    | 1.792    |
|                                   | 6                  | 4                  | 1.500                    | 2.607    | 2.086    | 3.202 *  |
|                                   |                    | 5                  | 0.504                    | 1.557    | 2.030    | 2.497    |
|                                   |                    | 7                  | 0.010                    | 2.064    | 4.004    | 4.288    |
|                                   | 7                  | 4                  | 1.490                    | 0.543    | -1.917   | -1.087   |
|                                   |                    | 5                  | 0.493                    | -0.507   | -1.974   | -1.792   |
|                                   |                    | 6                  | -0.010                   | -2.064   | -4.004   | -4.288 * |
| 4                                 | 4                  | 5                  | 0.379                    | 0.163    | 0.524    | 0.494    |
|                                   |                    | 6                  | 0.947                    | 0.221    | 0.315    | 0.350    |
|                                   |                    | 7                  | 0.191                    | 0.266    | 1.255    | 1.132    |
|                                   | 5                  | 4                  | -0.379                   | -0.163   | -0.524   | -0.494   |
|                                   |                    | 6                  | 0.568                    | 0.059    | -0.208   | -0.144   |
|                                   |                    | 7                  | -0.189                   | 0.104    | 0.732    | 0.638    |
|                                   | 6                  | 4                  | -0.947                   | -0.221   | -0.315   | -0.350   |
|                                   |                    | 5                  | -0.568                   | -0.059   | 0.208    | 0.144    |
|                                   |                    | 7                  | -0.756                   | 0.045    | 0.940    | 0.782    |
|                                   | 7                  | 4                  | -0.191                   | -0.266   | -1.255   | -1.132   |
|                                   |                    | 5                  | 0.189                    | -0.104   | -0.732   | -0.638   |
|                                   |                    | 6                  | 0.756                    | -0.045   | -0.940   | -0.782   |
| 7                                 | 4                  | 5                  | 0.186                    | -0.325   | 0.006    | 0.041    |
|                                   |                    | 6                  | 0.508                    | -0.509   | -0.145   | -0.226   |
|                                   |                    | 7                  | 0.049                    | -0.465   | 0.162    | 0.348    |
|                                   | 5                  | 4                  | -0.186                   | 0.325    | -0.006   | -0.041   |
|                                   |                    | 6                  | 0.322                    | -0.184   | -0.151   | -0.267   |
|                                   |                    | 7                  | -0.137                   | -0.140   | 0.156    | 0.307    |
|                                   | 6                  | 4                  | -0.508                   | 0.509    | 0.145    | 0.226    |
|                                   |                    | 5                  | -0.322                   | 0.184    | 0.151    | 0.267    |
|                                   |                    | 7                  | -0.459                   | 0.044    | 0.307    | 0.574    |
|                                   | 7                  | 4                  | -0.049                   | 0.465    | -0.162   | -0.348   |
|                                   |                    | 5                  | 0.137                    | 0.140    | -0.156   | -0.307   |
|                                   |                    | 6                  | 0.459                    | -0.044   | -0.307   | -0.574   |
| 10                                | 4                  | 5                  | 0.592                    | 0.392    | 0.099    | 0.091    |
|                                   |                    | 6                  | -8.132 *                 | -5.912 * | -6.014 * | -4.650 * |
|                                   |                    | 7                  | 1.116                    | 0.715    | 0.130    | 0.114    |
|                                   | 5                  | 4                  | -0.592                   | -0.392   | -0.099   | -0.091   |
|                                   |                    | 6                  | -8.724 *                 | -6.304 * | -6.113 * | -4.741 * |
|                                   |                    | 7                  | 0.524                    | 0.324    | 0.031    | 0.023    |
|                                   | 6                  | 4                  | 8.132 *                  | 5.912 *  | 6.014 *  | 4.650 *  |
|                                   |                    | 5                  | 8.724 *                  | 6.304 *  | 6.113 *  | 4.741 *  |
|                                   |                    | 7                  | 9.248 *                  | 6.627 *  | 6.145 *  | 4.763 *  |
|                                   | 7                  | 4                  | -1.116                   | -0.715   | -0.130   | -0.114   |
|                                   |                    | 5                  | -0.524                   | -0.324   | -0.031   | -0.023   |
|                                   |                    | 6                  | -9.248 *                 | -6.627 * | -6.145 * | -4.763 * |
| 13                                | 4                  | 5                  | 0.705                    | 0.790    | 0.438    | 0.831    |
|                                   |                    | 6                  | -1.576                   | -1.630   | -1.818   | -1.401   |
|                                   |                    | 7                  | 1.342                    | 1.512    | 0.807    | 1.594    |
|                                   | 5                  | 4                  | -0.705                   | -0.790   | -0.438   | -0.831   |
|                                   |                    | 6                  | -2.281 *                 | -2.420 * | -2.255   | -2.232   |
|                                   |                    | 7                  | 0.637                    | 0.722    | 0.370    | 0.763    |
|                                   | 6                  | 4                  | 1.576                    | 1.630    | 1.818    | 1.401    |
|                                   |                    | 5                  | 2.281 *                  | 2.420 *  | 2.255    | 2.232    |
|                                   |                    | 7                  | 2.918 *                  | 3.142 *  | 2.625 *  | 2.995 *  |
|                                   | 7                  | 4                  | -1.342                   | -1.512   | -0.807   | -1.594   |
|                                   |                    | 5                  | -0.637                   | -0.722   | -0.370   | -0.763   |
|                                   |                    | 6                  | -2.918 *                 | -3.142 * | -2.625 * | -2.995 * |

\*  $P<0.05$ .



时间变化特征的标准.

一个灌水周期内(1~15 d),绿地土壤水分的时间(日)变化特征如图 3a 所示.在灌水后的第 1 天,土壤水分含量较高,平均含水率达 9.0%;在灌水后的第 10~15 天,土壤水分含量较低,平均含水率不足 4.0%;在灌水后的第 4~10 天,土壤水分含量居于二者之间.进一步分析发现,灌水周期内的土壤水分随时间变化呈现出 3 个不同阶段的特征:在前期(灌水后 1~4 d),土壤含水率处于快速下降阶段,日均下降速率达 1.1%,最大速率接近 9.0%;在中期(灌水后 4~10 d),土壤含水率处于缓慢下降阶段,日均下降速率为 0.2%,最大速率为 1.9%;在后期(灌水后 10~15 d),土壤含水率基本保持恒定,日均变化速率不足 0.1%,最大速率低于 0.3%.以上 3 个阶段的土壤含水率日均变化速率值分别处于  $10^{-2}$ 、 $10^{-3}$  和  $10^{-4}$  的数量级.基于此,可将绿地灌水周期内的整体土壤水分动态划分为 3 个不同变化时期,按灌水后的间隔时序依次为:快速下降期(灌水后 1~4 d)、缓慢变化期(灌水后 4~10 d)和基本稳定期(灌水后 10~15 d).

由于绿地土壤为沙质土,蓄水性较差,水分在其中的入渗速度较快,故在较短时间内便有大量灌溉水到达深层土壤;同时,沙漠地区的强蒸发作用使土壤(尤指较浅土层范围)水分在较短时间内大量散失.因此在短期内,土壤水分整体含量便由较高水平下降到较低水平.之后,土壤持有的剩余含水量受蒸发和植物蒸腾作用的影响仍然不断下降,但由于先前水分的大量耗散,故同等蒸散发作用下的土壤水

分下降程度较前者相对较缓.在后期,由于之前水分(尤其是较浅土层范围内)的大量耗散,土壤所持有含水量开始无法满足植物的正常生长需求,此时主要接受来自深层土壤水分的向上补给,并在蒸发、植物蒸腾等因素的综合影响下基本维持恒定.

经模型拟合及验证,灌水周期内绿地土壤水分随时间(日)增加总体满足幂函数递减的变化规律,该幂函数方程为: $y = 8.746x^{-0.270}$ .但具体到不同二维空间尺度上,其土壤水分表现特征有所差异.在水平空间上,15、30 和 45 cm 梯度处的日均土壤含水量变化均可用幂函数方程描述,而 60 cm 梯度处的日均土壤含水量变化则不符合此条件(表 2A);在垂直空间上,0~40 cm 深处的日均含水量变化均符合幂函数递减规律,而 60~120 cm 深处的日均含水量变化总体满足一元线性递减规律(表 2B).由图 3b 可以看出,在水平 0~45 cm 范围内,土壤平均含水量随时间变化递减较为明显,且距离滴头方向越近,减少越快,下降幅度也越大,而 60 cm 梯度处的平均含水量基本保持不变;在垂直 0~40 cm 范围内,0 cm 梯度处的平均含水量随时间变化下降幅度最大,20 cm 处次之,10 和 40 cm 处的递减速率相对较慢,下降幅度也较小;在垂直 60~120 cm 范围内,80、100 和 120 cm 梯度处的平均含水量随时间推移呈轻微增加趋势或基本保持不变,60 cm 梯度处的平均含水量则有轻微减少趋势.这主要与蒸发、灌溉等因素有关.由于水分是通过点源滴灌逐步向四周渗透扩散,且在传输过程中不断衰减,大部分被截留在水平 0~45 cm 范围内,因其水分含量较高,故该范

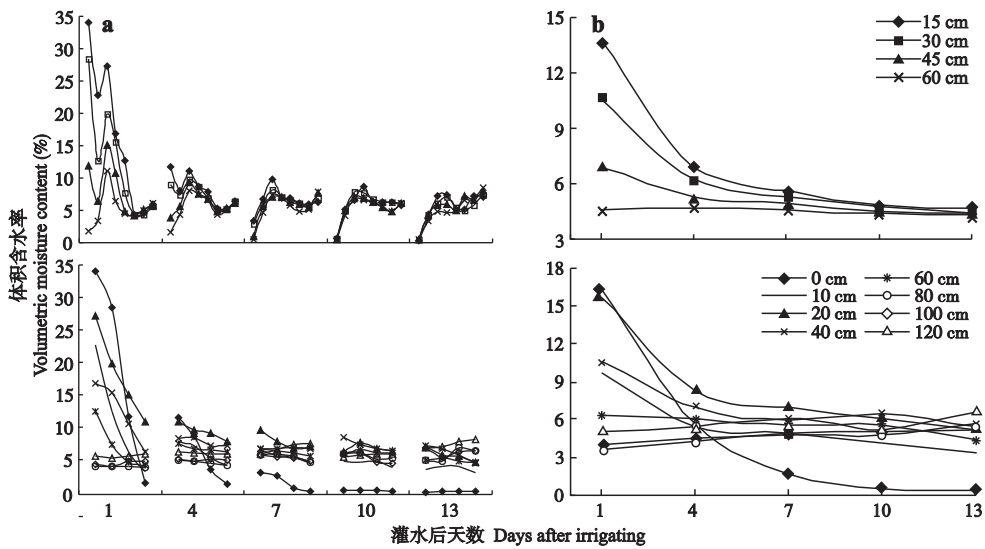


图 3 各灌水周期内土壤二维空间水分(a)和平均水分(b)的变化  
Fig.3 Two-dimensional spatial dynamics of soil water (a), average soil moisture content (b) in irrigation intervals.

表 2 灌水周期内土壤水分水平 (A) 和垂直 (B) 变化及其数学化模型

Table 2 Dynamics of soil water on the horizontal space (A), vertical space (B) and its mathematical models in irrigation intervals

| 距离<br>Distance<br>(cm) | 平均含水率<br>Average water content (%) |      |     |      |      |     | 模型及检验<br>Modelling and testing |          |                       |            |               |
|------------------------|------------------------------------|------|-----|------|------|-----|--------------------------------|----------|-----------------------|------------|---------------|
|                        | 1 d                                | 4 d  | 7 d | 10 d | 13 d |     | <i>a</i>                       | <i>b</i> | <i>R</i> <sup>2</sup> | <i>F</i>   | 方程 Model      |
| A                      | 15                                 | 13.8 | 6.9 | 5.6  | 4.9  | 4.6 | 13.306                         | 0.433    | 0.989                 | 271.304 ** | $y = ax^{-b}$ |
|                        | 30                                 | 10.5 | 6.3 | 5.3  | 5.0  | 4.4 | 10.324                         | 0.332    | 0.991                 | 321.444 ** |               |
|                        | 45                                 | 6.9  | 5.3 | 4.9  | 4.5  | 4.7 | 6.784                          | 0.163    | 0.967                 | 88.913 **  | $y = ax + b$  |
|                        | 60                                 | 4.5  | 4.7 | 4.6  | 4.4  | 4.3 | 4.645                          | 0.020    | 0.300                 | 4.899      |               |
|                        | Mean                               | 8.9  | 5.8 | 5.1  | 4.7  | 4.5 | 8.746                          | 0.270    | 0.990                 | 284.385 ** |               |
| B                      | 0                                  | 16.3 | 5.6 | 1.7  | 0.5  | 0.4 | 23.019                         | 1.501    | 0.917                 | 33.125 **  | $y = ax^{-b}$ |
|                        | 10                                 | 9.7  | 5.4 | 4.9  | 4.1  | 3.4 | 9.735                          | 0.388    | 0.980                 | 149.431 ** |               |
|                        | 20                                 | 15.7 | 8.2 | 6.9  | 6.0  | 5.2 | 15.499                         | 0.424    | 0.995                 | 580.350 ** |               |
|                        | 40                                 | 10.7 | 6.9 | 6.0  | 6.4  | 5.4 | 10.326                         | 0.250    | 0.937                 | 44.545 **  | $y = ax + b$  |
|                        | 60                                 | 6.4  | 6.0 | 5.5  | 5.5  | 4.4 | -0.148                         | 6.599    | 0.902                 | 27.591 *   |               |
|                        | 80                                 | 3.6  | 4.2 | 4.9  | 5.0  | 5.1 | 0.129                          | 3.679    | 0.883                 | 22.682 *   |               |
|                        | 100                                | 4.0  | 4.5 | 4.8  | 4.8  | 5.6 | 0.113                          | 3.946    | 0.892                 | 24.894 *   | $y = ax^{-b}$ |
|                        | 120                                | 5.0  | 5.4 | 6.1  | 5.2  | 6.6 | 0.101                          | 4.958    | 0.490                 | 2.881      |               |
|                        | Mean                               | 8.9  | 5.8 | 5.1  | 4.7  | 4.5 | 8.746                          | 0.270    | 0.990                 | 284.692 ** |               |

\* *P*<0.05; \*\* *P*<0.01. 下同 The same below.

围内的土壤水分受蒸发影响散失的程度较严重,而在水平 60 cm 梯度处,由于很小比例水分能到达于此,其水分含量总体变化较小,故同等蒸发条件下,其在灌水周期内受蒸发影响减少得也不明显.垂直 0~40 cm 范围内的土壤水分受蒸发作用较显著,在灌水周期内,其随时间(日)变化下降相对明显;而垂直 60~120 cm 范围内的土壤水分由于受蒸发影响较小,随时间的推移未表现出明显变化.

2.2 土壤水分的空间分布特征

2.2.1 土壤水分水平分布 研究区绿地土壤水分的水平空间分布特征具有一致性(图 4).在 4—7 月(包括降雨与非降雨条件)的各试验灌水周期内,15 cm 的土壤平均含水量均最多,且在一个灌水周期内随时间变化下降得最明显;60 cm 的土壤平均含水量均最少,且在一个灌水周期内随时间变化下降得

最不明显;30 和 45 cm 的含水量及其变化程度居于二者之间.在水平 0~60 cm 范围内,距离滴头方向越近,土壤水分含量越高,其随时间递减也越明显;反之,土壤水分含量越低,其随时间递减也越轻微.这是因为点源滴灌使灌溉水分以滴头为中心,沿土壤水平方向不断向其四周传输,且水分在传输过程中存在衰减现象,最终引起土壤含水量的空间梯度性差异,使距离滴头越近的土壤得到的水分补给多,而在同等蒸发等条件下,其水分随时间变化的损失程度也相对严重.此外,梭梭根系的空间分布状况<sup>[11]</sup>也可能是影响土壤水分水平分布格局的一个重要原因.

经模型拟合及验证,4 个试验灌水周期内的土壤平均含水量与水平空间距离之间均满足一元线性递减的函数关系(表 3),且其显著性水平均在 0.01

表 3 土壤水分水平分布及其数学化模型

Table 3 Distributions of soil water on the horizontal space and its mathematical models

| 时间<br>Time                        | 平均含水率 Average water content (%) |       |       |       |       | 模型及检验 * Modelling and testing |          |                       |             |
|-----------------------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------|----------|-----------------------|-------------|
|                                   | 15 cm                           | 30 cm | 45 cm | 60 cm |       | <i>a</i>                      | <i>b</i> | <i>R</i> <sup>2</sup> | <i>F</i>    |
| 月份<br>Month                       | 4                               | 7.3   | 6.4   | 5.6   | 4.8   | 0.054                         | 8.068    | 0.999                 | 1963.598 ** |
|                                   | 5                               | 7.1   | 6.4   | 5.4   | 4.7   | 0.055                         | 7.974    | 0.995                 | 425.631 **  |
|                                   | 6                               | 9.2   | 8.5   | 7.6   | 6.7   | 0.058                         | 10.150   | 0.998                 | 960.679 **  |
|                                   | 7                               | 7.0   | 6.1   | 4.8   | 4.0   | 0.070                         | 8.106    | 0.990                 | 203.147 **  |
|                                   | 4—7                             | 7.7   | 6.9   | 5.8   | 5.0   | 0.059                         | 8.574    | 0.998                 | 888.598 **  |
| 灌水后天数<br>Days after<br>irrigating | 1                               | 13.8  | 10.5  | 6.9   | 4.5   | 0.209                         | 16.766   | 0.993                 | 280.957 **  |
|                                   | 4                               | 6.9   | 6.3   | 5.3   | 4.7   | 0.051                         | 7.634    | 0.991                 | 228.125 **  |
|                                   | 7                               | 5.6   | 5.3   | 4.9   | 4.6   | 0.022                         | 5.906    | 0.999                 | 2960.644 ** |
|                                   | 10                              | 4.9   | 4.8   | 4.5   | 4.4   | 0.012                         | 5.083    | 0.963                 | 51.626 *    |
|                                   | 13                              | 4.6   | 4.4   | 4.4   | 4.3   | 4.717                         | 0.007    | 0.897                 | 17.509 *    |
| 1 个灌水周期<br>One irrigating cycle   | 7.1                             | 6.3   | 5.2   | 4.5   | 0.060 | 8.029                         | 0.995    | 409.262 **            |             |

\* 方程 Model:  $y = -ax + b$ .

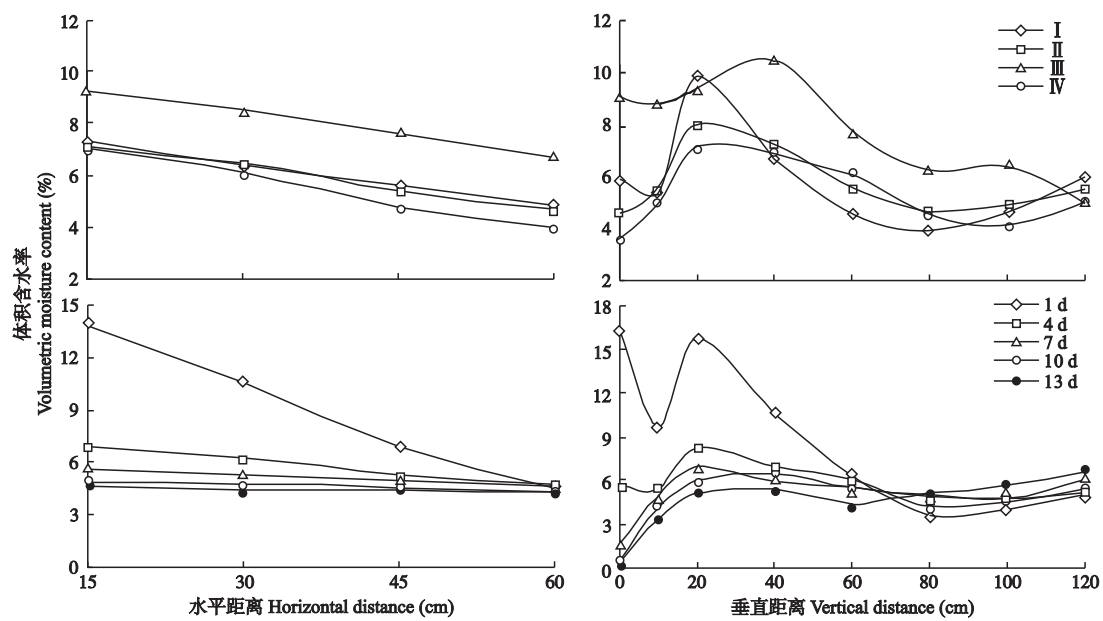


图 4 土壤二维空间平均水分分布  
**Fig.4** Two-dimensional spatial distributions of average soil moisture content.  
I : 4 月 April; II : 5 月 May; III : 6 月 June; IV : 7 月 July.

之上.说明土壤水分在水平空间尺度(0~60 cm)上呈线性衰减的分布,且这种衰减规律不受降雨与时间等因素的影响.

**2.2.2 土壤水分垂直分布** 在垂直空间上,随着土深增加,绿地土壤水分整体呈现出“低、高、低、高”的分布特点(图 4).0~10 和 60~100 cm 范围内的土壤平均含水量相对较少,而 20~40 cm 和 120 cm 的土壤平均含水量相对较多.这是由于多种因素综合作用的结果.其中,0~10 cm 深度尽管土壤有机质含量和物理性粘粒等较高,持水能力较强,但其土壤水分受蒸发的影响也最显著,由此造成的含水量损失也最多,故整体水分含量偏低;20~40 cm 的土壤由于蓄水能性较好<sup>[22]</sup>,同时受蒸发影响较表土层(0~10 cm)相对较弱,故持有的水量相对较高;60~100 cm 的土壤有机质含量和物理性粘粒均较少,截水能力差,故整体水分持有量相对较低.

进一步分析发现,绿地土壤水分随土壤垂直空间距离变化近似表现出双峰曲线的特征(图 4),并在 20 cm 梯度处有一个明显峰值.但由于研究尺度所限,另一峰值尚无法确定.经模型拟合与检验,4 个试验灌水周期内的土壤平均含水量在垂直空间尺度(0~120 cm)上的分布特征并没有表现出一定的函数规律.这是因为土壤自身空间变异性对水分的分布状况具有重要影响,绿地土壤各土层基本物理性质的不均匀性决定了其水分垂直分布特征的差异性.此外,植物根系的垂直分布状况可能也是影响水

分垂直格局<sup>[20]</sup>的原因之一.

3 讨 论

咸水滴灌条件下,塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地土壤水分在三维时空尺度上具有周期性动态规律,且在忽略降雨作用时,这种规律不随各月份灌水周期的时间序列变化而表现出明显差异.

时间变化方面:在灌水周期期间,土壤水分总体在 7 月(5.5%)偏低,在 4 月(6.0%)偏高,在有明显降雨的 6 月(8.0%)最高;随着月份增加,土壤平均含水量在 40~80 cm 的垂直空间内呈上升趋势,而在其余垂直空间和 0~60 cm 水平空间内呈下降趋势;整体上,土壤水分随月份增加而逐渐减少.在灌水周期内,土壤水分总体随日变化呈幂函数递减规律,并先后经历快速下降期、缓慢变化期和基本稳定期 3 个阶段;土壤水分在水平 0~45 cm 和垂直 0~40 cm 的空间内均满足幂函数递减规律,水分变化程度较剧烈,而在 60~120 cm 的垂直空间内总体符合一元线性递减规律,水分变化程度相对平缓.

空间分布方面:土壤水分在水平空间距离上呈现一元线性递减的分布,在垂直空间距离上则近似表现出双峰曲线特征,且在 20 cm 土层处有一显著峰值.说明土壤水分空间分布特征受降雨和时间变化序列等因素的影响较小,主要取决于土壤自身物理性质.

本研究中,不同灌水周期的时间序列对应了不

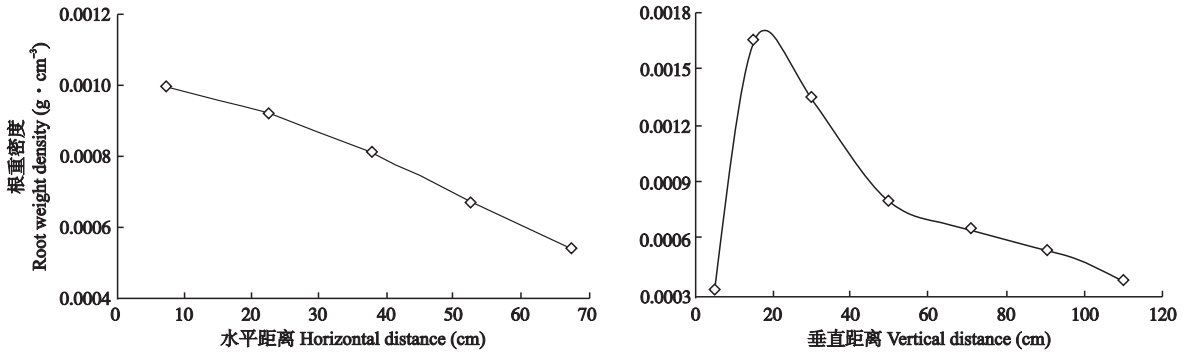


图 5 土壤二维空间梭梭平均根重密度分布

Fig.5 Distributions of average root weight density on two-dimensional space for *Haloxylon ammodendron*.

同的气温变化值,故在一定程度上可理解为温度对绿地土壤水分的动态规律影响较小,降雨对其的影响则较明显,因为非(或弱)降雨和(强)降雨条件下,二者之间土壤水分的时间变化差异性较显著。

灌水周期内土壤水分动态与时间之间满足幂函数递减规律关系,这与王永东等<sup>[17]</sup>持有的二者之间呈一元线性关系的观点不一致(可能与二者所研究的时空尺度范围等不同有关),而与黄强等<sup>[12]</sup>的研究成果较接近,即停止灌水 24 h 后土壤水分会急剧减少,而停止灌水 72 h 之后则变化缓慢。

绿地土壤垂直 20~40 cm 范围内的含水量较高,说明该土层范围内的蓄水能力较强。这与丁新原等<sup>[22]</sup>关于防护林土壤水分物理性质的研究成果较为一致。同时,20~40 cm 范围内相对较高的含水量与该空间相对较多的根系分布(图 5)相一致,很好地体现了植被对较好土壤水分环境的一种适应性。

一般而言,植物根系对土壤水分具有消耗与聚集作用,从而影响到其空间分布状况,而土壤水分环境又制约着植物的根系分布<sup>[11,20]</sup>。然而在沙漠地区,由于蒸散发十分强烈,植物的耗水量应大于其根系的聚水量。但是,根据图 5,防护林绿地梭梭的根系分布无论是在水平方向上还是在垂直方向上均与土壤水分的分布格局表现出较好的一致性。究其原因,可能与梭梭属于耐干旱植物种的生理特性有关,其退化的枝叶在一定程度上减少了水分蒸腾量,从而表现出的吸水性相对弱于聚水性,具体机理尚有待深入研究。

本研究尚存在不足之处:第一,由于研究条件所限,土壤水分三维时空变化的观测尺度较窄,未能将区域全年月份和土壤更深层次的水分动态特征揭示出来;第二,由于数据资料有限,未能界定出对土壤水分周期性变化规律产生显著影响的最低降雨量。这两点将有待于后续研究进行补充与完善。

土壤水分时空动态既受灌溉、蒸发、降雨、植被等环境条件<sup>[9,11,20-21]</sup>的影响,又与土壤自身物理性质密切相关。掌握土壤水分的时空动态规律,可改善沙地土壤的水分物理性质等,以满足人工植被对水分的需求和提高土壤水分的利用效率。这将是持续开展荒漠地区生态恢复与植被重建工作的一项长期任务。

#### 参考文献

- [1] Nish MS, Wierenga PJ. Time series analysis of soil moisture and rain along a line transect in arid rangeland. *Soil Science*, 1991, **152**: 189-198
- [2] Gries D, Zeng F, Foetzi A, et al. Growth and water relations of *Tamarix ramosissima* and *Populus euphratica* on Taklamakan desert dunes in relation to depth to a permanent water table. *Plant, Cell and Environment*, 2003, **26**: 725-736
- [3] Zhou HW, Li SY, Sun SG, et al. Effects of natural covers on soil evaporation of the shelterbelt along the Tarim Desert Highway. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**: 137-145
- [4] Feng Q (冯 起), Si J-H (司建华), Xi H-Y (席海洋). *Hydrothermal Process and Ecological Recovery Technology in the Desert Oasis*. Beijing: Science Press, 2009 (in Chinese)
- [5] Fan Y-X (潘颜霞), Wang X-P (王新平). Spatial variation of soil moisture in revegetated desert area. *Journal of Desert Research (中国沙漠)*, 2007, **27**(2): 250-256 (in Chinese)
- [6] Wang X-P (王新平), Zhang Z-S (张志山), Zhang J-G (张景光), et al. Review to researches on desert vegetation influencing soil hydrological processes. *Journal of Desert Research (中国沙漠)*, 2005, **25**(2): 196-201 (in Chinese)
- [7] Zhang B-Y (张北赢), Xu X-X (徐学选), Li G-Y (李贵玉), et al. Review of the research on the basic theoretic and its application of soil water. *Science of Soil and Water conservation (中国水土保持科学)*, 2007, **5**



- (2): 122–129 (in Chinese)
- [8] Zhao Y-T (赵玉涛), Yu X-X (余新晓), Zhang Z-Q (张志强), *et al.* Study on the moisture transmission layer interface rules of *Abies fabri* forest land plants in subalpine in upper reaches of Yangtze River. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2002, **16**(3): 118–121 (in Chinese)
- [9] Ma X-D (马晓东), Li W-H (李卫红), Zhu C-G (朱成刚), *et al.* Spatio-temporal variation in soil moisture and vegetation along the lower reaches of Tarim River, China. *Acta Ecological Sinica* (生态学报), 2010, **30**(15): 4035–4045 (in Chinese)
- [10] Thomas FM, Foetzki A, Arndt SK, *et al.* Water use by perennial plants in the transition zone between river oasis and desert in NW China. *Basic and Applied Ecology*, 2006, **7**: 253–267
- [11] Yang Y-F (杨艳凤), Zhou H-F (周宏飞), Xu L-G (徐利岗). Dynamic variations of soil moisture in *Haloxylon ammodendron* root zone in Gurban Tunggut Desert. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(7): 1711–1716 (in Chinese)
- [12] Huang Q (黄强), Li S-X (李生秀), Song Y-D (宋郁东). The movement of water and salt in sandy land after irrigated with saline water. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2003, **40**(4): 547–553 (in Chinese)
- [13] Liu X-P (刘新平), Zhang T-H (张铜会), Zhao H-L (赵哈林), *et al.* Research advances on moisture dynamic of desertified lands in arid and semi-arid regions. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2005, **12**(1): 63–68 (in Chinese)
- [14] Zhang J-G (张建国), Xu X-W (徐新文), Lei J-Q (雷加强), *et al.* Change in soil physical and chemical property in the Tarim Desert highway shelterbelt under saline water drip-irrigation. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2009, **17**(4): 667–672 (in Chinese)
- [15] Zhang J-G (张建国), Xu X-W (徐新文), Lei J-Q (雷加强), *et al.* Effect of drip-irrigation with salinity water on soil environment of the Tarim Desert highway shelterbelt. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2008, **24**(10): 34–39 (in Chinese)
- [16] Zhou Z-B (周智彬), Xu X-W (徐新文), Lei J-Q (雷加强), *et al.* Water balance and movement of Tarim Desert highway shelterbelt irrigated by saline water. *Arid Land Geography* (干旱区地理), 2010, **33**(6): 904–908 (in Chinese)
- [17] Wang Y-D (王永东), Xu X-W (徐新文), Lei J-Q (雷加强), *et al.* The study of soil moisture dynamics in Tarim Desert highway shelter-forest. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2008, **53**(suppl. 2): 89–95 (in Chinese)
- [18] Yan B (闫冰), Zhou Z-B (周智彬), Lei J-Q (雷加强), *et al.* Studies on soil infiltration of shelter-forest along Tarim Desert highway. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2012, **26**(4): 98–103 (in Chinese)
- [19] Li X (李雪), Li G-M (李国敏), Wang Z-M (王志民), *et al.* Soil water and salt with different water table depths along the Tarim Desert highway. *Arid Land Geography* (干旱区地理), 2013, **36**(3): 393–399 (in Chinese)
- [20] Liu J (刘健), He X (贺晓), Bao H-L (包海龙), *et al.* Distribution of fine roots of *Salix psammophila* and its relationship with soil moisture in Mu Us Sandland. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2010, **30**(6): 1362–1366 (in Chinese)
- [21] Shi Z-H (史志华), Zhu H-D (朱华德), Chen J (陈佳), *et al.* Spatial heterogeneity of soil moisture and its relationships with environmental factors at small catchment level. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(4): 889–895 (in Chinese)
- [22] Ding X-Y (丁新原), Zhang G-Y (张广宇), Zhou Z-B (周智彬), *et al.* The soil water physical properties in the Tarim Desert highway shelterbelt under saline water drip-irrigation. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2015, **29**(1): 250–256 (in Chinese)

**作者简介** 丁新原,男,1990年生,硕士研究生.主要从事土壤水盐动态、水土保持与生态恢复等研究. E-mail: henandxy.well@163.com

**责任编辑** 杨弘