

DOI: 10.11686/cyxb2016083

http://cyxb.lzu.edu.cn

席军强, 赵翠莲, 杨自辉, 郭树江, 王强强, 张剑挥. 荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆土壤水分空间分布及入渗特征. 草业学报, 2016, 25(11): 15-24.

XI Jun-Qiang, ZHAO Cui-Lian, YANG Zi-Hui, GUO Shu-Jiang, WANG Qiang-Qiang, ZHANG Jian-Hui. Soil moisture spatial distribution and infiltration characteristics of *Nitraria nebkha* in an oasis-desert ecotone. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(11): 15-24.

## 荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆土壤 水分空间分布及入渗特征

席军强<sup>1,2</sup>, 赵翠莲<sup>1\*</sup>, 杨自辉<sup>1</sup>, 郭树江<sup>1</sup>, 王强强<sup>1</sup>, 张剑挥<sup>1</sup>

(1. 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 甘肃 民勤 733300; 2. 平凉市关山林业管理局, 甘肃 平凉 744100)

**摘要:**本研究选取民勤荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆 3 个演化阶段: 雏形阶段(流动白刺沙堆)、沙堆形成阶段(发育 20 年, 半固定白刺沙堆)和结皮与土壤形成阶段(发育 40 年, 固定白刺沙堆)为研究对象, 采用空间代替时间的方法, 研究不同类型沙堆土壤物理属性对水分空间分布及入渗的影响, 探索白刺灌丛沙堆土壤水分运行规律, 为绿洲荒漠过渡带防护林体系优化配置、绿洲生态安全管理奠定理论基础。结果表明, 1) 土壤紧实度和结皮厚度: 固定白刺沙堆 > 半固定白刺沙堆 > 流动白刺沙堆。2) 表层土壤密度流动、半固定、固定白刺沙堆分别为 2.32, 2.30, 1.95 g/cm<sup>3</sup>; 最大持水量、毛管持水量、田间持水量和总孔隙度大小为: 固定白刺沙堆 > 半固定白刺沙堆 > 流动白刺沙堆, 而深层土壤各因子变化不稳定。3) 在干旱季节, 固定、半固定和流动白刺沙堆分别以 0, 70, 150 cm 土层含水量最小, 50, 130, 110 cm 土层含水量最大; 在多雨季节, 表层土壤含水量波动幅度较大, 深层土壤含水量基本保持不变。4) 不同演化阶段沙堆降雨量与累计入渗量之间存在显著的正相关性( $P < 0.01$ )。其中固定、半固定白刺沙堆随降雨事件的发生立即开始入渗, 流动白刺沙堆当降雨量达到临界降雨量后才开始入渗。在降雨量相同情况下, 当降雨量大于 0.12 mm 时, 累积入渗量依次为: 固定白刺沙堆 > 半固定白刺沙堆 > 流动白刺沙堆。

**关键词:** 白刺灌丛沙堆; 土壤物理性质; 水分入渗特征

### \*Soil moisture spatial distribution and infiltration characteristics of *Nitraria nebkha* in an oasis-desert ecotone

XI Jun-Qiang<sup>1,2</sup>, ZHAO Cui-Lian<sup>1\*</sup>, YANG Zi-Hui<sup>1</sup>, GUO Shu-Jiang<sup>1</sup>, WANG Qiang-Qiang<sup>1</sup>, ZHANG Jian-Hui<sup>1</sup>

1. Gansu Minqin National Field Observation & Research Station on Ecosystem of Desert Grassland, Minqin 733300, China; 2. Pingliang Guanshan Forestry Authority, Pingliang 744100, China

**Abstract:** This study utilized *Nitraria tangutorun* nebkhas vegetation growing in a desert-oasis ecotone in Minqin to investigate space distribution of soil moisture content and the influence of soil physical properties, particularly soil hardness and crust thickness on water distribution and infiltration of the three evolutionary stages of soil formation; stable sand dune, sand dune formation and moving sand. The aim was to explore the effect of *N. tangutorun* nebkhas on soil moisture and to establish a theoretical foundation for protective systems for oasis-desert ecotones. The results as follows: 1) Soil hardness and crust thickness were highest in

\* 收稿日期: 2016-03-03; 改回日期: 2016-06-06

基金项目: 国家重大林业公益性行业科研专项(201404306), 国家自然科学基金项目(31260200)和甘肃省青年基金计划项目(145RJYA270)资助。

作者简介: 席军强(1988-), 男, 甘肃会宁人, 助理工程师。E-mail: junqxi@163.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: zihyang@126.com

the stable dune, intermediate in forming dunes and least in moving sand. 2) Soil surface bulk density was 2.32, 2.30 and 1.95 g/cm<sup>3</sup> in moving sand, forming dunes and stable dunes respectively; maximum water holding capacity, capillary water content, field capacity and total porosity was highest in the stable dune, intermediate in the forming dune and least in the moving sand. Soil physical properties in the subsurface layer were variable in all dune formation stages. 3) In the dry season, the lowest soil moisture contents occurred in soils from forming dunes and moving sand at 0, 70, 150 cm depth, maximum soil moisture occurred at 50, 130, 110 cm; in the rainy season, surface soil moisture content fluctuated while soil moisture at depth was relatively stable. 4) There were significant correlations between rainfall and infiltration in all three stages of soil formation ( $P < 0.01$ ). Water infiltration after rainfall events occurred immediately in stable and forming dune soils whereas infiltration in moving sand only occurred when rainfall reached a critical threshold; with rainfall greater than 0.12 mm, infiltration was highest in the stable dune, intermediate in forming dune and least in moving sand.

**Key words:** *Nitraria tangutorun* nebkhas; soil physical properties; feature of infiltration

荒漠绿洲过渡带是保障绿洲生态安全的重要屏障,它是绿洲生态系统的重要组成部分,也是荒漠生态系统退化的主要体现形式,可表征绿洲生态系统的安全性和稳定性<sup>[1]</sup>,而过渡带是荒漠生境和绿洲生境之间相互转化活动最剧烈、最突出的地区<sup>[2]</sup>,也是干旱区的生态敏感带<sup>[3]</sup>,荒漠绿洲过渡带在保护生物多样性、抑制荒漠化和维护绿洲生态安全方面起着极其重要的作用<sup>[4]</sup>。

在我国灌丛沙堆主要分布于农牧交错地带、沙漠边缘带及荒漠草原<sup>[5-8]</sup>,类型有小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、怪柳(*Tamarix ramosissima*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、芦苇(*Phragmites australis*)、蒿类(*Artemisia* spp.)和白刺(*Nitraria* spp.)等<sup>[9]</sup>。灌丛沙堆是荒漠区土壤风蚀、土地退化以及土壤初步形成的标志<sup>[10-11]</sup>,也是沙漠化的一种表现形式,在阻拦流沙入侵绿洲、保护荒漠区生物多样性、维持区域生态平衡、促进土壤形成等方面所起的作用不可忽视。白刺(*Nitraria tangutorun*)灌丛作为民勤绿洲荒漠过渡带分布面积最大的天然灌丛,随着灌丛沙堆年限的增长,形成了不同类型的土壤结皮,促进了成土过程,遏制了灌丛沙堆的活化。但是,近些年由于环境变化、不合理的人类活动干预以及过度利用水资源致使地下水持续下降等原因,使得民勤天然植被生存环境进一步恶化<sup>[12]</sup>,造成天然植被衰败,灌丛沙堆大面积的衰败枯死,体积变小,数量增加,部分灌丛沙堆出现活化、逐渐解体,原有的固定白刺沙堆逐渐活化成为新的风蚀源地,进一步发展,将会引起流沙入侵绿洲的危害,对民勤绿洲的危害性逐年加大<sup>[13-14]</sup>。另外,天然白刺幼苗在荒漠绿洲过渡带上生长发育,使得原来以流动白刺沙堆为主的沙漠景观演变成了一个复杂的天然荒漠生态系统。大气降尘、天然降雨等输送的物质对土壤物理性质、化学性质、生物特性、水文过程和形态特征等内外属性也发生不同程度的改变,促使流动沙粒向土壤转变,进而不同类型沙堆呈现各异的水分分布状况。因此,研究白刺灌丛沙堆水分空间分布和入渗特征,对荒漠生态环境的恢复以及沙漠化防治具有非常重要的现实意义。

近年来,国外学者对白刺灌丛沙堆的形态学<sup>[15-16]</sup>、沉积学<sup>[10]</sup>、生态学<sup>[16]</sup>和动力学过程<sup>[16-17]</sup>等方面进行了较系统的研究;国内学者从白刺灌丛沙堆的土壤特性<sup>[18]</sup>、生理生态特性<sup>[19-20]</sup>、灌丛生物量模拟<sup>[12]</sup>、空间格局<sup>[21]</sup>、防沙效益<sup>[22]</sup>及白刺灌丛对降水与地下水利用<sup>[23]</sup>等方面进行了探讨,在荒漠土壤的研究中,主要在土壤微生物多样性<sup>[24-27]</sup>、土壤种子库、土壤理化性质、土壤微生物数量、土壤微生物生物量和土壤酶<sup>[28-31]</sup>等方面开展了研究。但是以荒漠绿洲过渡带不同沙地类型白刺灌丛沙堆为研究对象,来探讨土壤水分空间分布格局及入渗特征等方面还尚未报到。因此,本研究通过对白刺灌丛沙堆土壤水分和物理性质进行研究,旨在探讨土壤物理性质、土壤水分变化规律及其与入渗的相互关系,了解土壤水分在沙地生态系统中所起的作用,以期对沙化土地治理及植被恢复提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区地处甘肃省河西走廊东端石羊河流域下游民勤绿洲边缘,位于巴丹吉林沙漠东南缘的沙井子荒漠绿洲过渡带上。地理位置在  $102^{\circ}03' - 104^{\circ}03' E$ ,  $38^{\circ}05' - 39^{\circ}06' N$  之间。东、北、西三面被腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠包围,属于我国典型的温带大陆性荒漠气候。其特点为:气候干燥、降水稀少、蒸发强烈、风大沙多、气候环境十分恶劣;多年平均气温  $7.6^{\circ}C$ , 年均日较差  $15.2^{\circ}C$ ;  $\geq 10^{\circ}C$  年积温为  $3036.4^{\circ}C$ , 无霜期 176 d; 多年平均降水量为 113 mm, 主要集中在每年的 6—9 月, 占年均总降水量的 60% 以上, 地下水位都在 20 m 以下, 植物生长和存活完全依靠天然降水, 多年平均蒸发量为 2664.0 mm; 研究区年  $\geq 8$  级大风日数为 27.8 d; 多年平均大风日数 26.3 d, 沙尘暴日 25.0 d, 扬沙日 37.5 d, 浮尘日 29.7 d, 是全国浮尘、扬沙、沙尘暴最严重地区之一, 也是我国沙尘暴的主要策源地。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 样地设置** 研究样地设在甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站(简称民勤国家野外站)荒漠绿洲过渡带的观测场, 随着不同年代沙堆演替形成流动白刺沙堆(0 年)、半固定白刺沙堆(20 年)和固定白刺沙堆(40 年)。分别在不同类型白刺灌丛沙堆中设 9 个  $10 m \times 10 m$  的典型固定样地, 样品和数据随机在 3 种类型样方中采集。

**1.2.2 测定方法** 土壤密度( $g/cm^3$ )、土壤最大持水量( $g/kg$ )、毛管持水量( $g/kg$ )、田间持水量( $g/kg$ )、总孔隙度(%)、毛管孔隙度(%)、非毛管孔隙度(%)等土壤水分物理性质指标均按照中国林业科学研究院《森林土壤水分—物理性质的测定》(LY/T1215-1999)标准测定(采用环刀法), 结皮厚度采用电子游标卡尺测定, 土壤紧实度采用土壤紧实度仪(指针式土壤硬度计 TYD-1)测定。

土壤水分测定: 于 2013 年 5 月—2015 年 5 月在研究区选取典型白刺沙堆试验样地, 埋设水分探头并安装 JY2PC-2S 型土壤湿度监测仪, 探头埋设的深度分别为 10, 30, 50, 70, 90, 110, 130, 150 cm, 并定时记录 8 个土层的土壤体积含水量, 每隔 60 min 监测 1 次, 每个样地 3 个重复。另外, 在雨季降雨后连续跟踪观测, 对降雨量在 10~20 mm 之间的降雨除用土壤湿度监测仪外, 用 TDR 辅助测定 0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 层土壤含水量, 每 12 h 测定一次, 连续观测 7 d, 大于 20 mm 降雨连续观测 15 d, 以了解其短期土壤水分入渗变化状况。

基于水量平衡原理, 单次降雨结束后土壤中含水量的增量即为此次降雨过程的累积入渗量<sup>[32]</sup>, 具体计算公式为:

$$I = \sum_j^k (\theta_{e_j} - \theta_{ij}) Z_j \times 10$$

式中:  $I$  为累积入渗量(mm);  $\theta_{e_j}$  为第  $j$  层降雨结束时的末期土壤体积含水量;  $\theta_{ij}$  为第  $j$  层降雨开始前的初始土壤体积含水量;  $Z_j$  为第  $j$  层的土层厚度(cm)。

### 1.3 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel、Origin 7.5 进行基本数据分析和绘图, 采用 SPSS 17.0 软件 one-way ANOVA 法进行方差分析, 采用 DPS 软件的 Duncan 法进行显著性检验, 所有数值以平均值  $\pm$  标准误表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同类型沙堆土壤紧实度与结皮厚度变化特征

民勤荒漠绿洲过渡带随着固定年限不断延长, 逐步演化成流动、半固定和固定白刺沙堆。其中, 固定白刺沙堆表层土壤紧实度最大, 半固定次之, 流动最小(表 1)。随着沙堆的不断固定, 在沙堆表层形成土壤结皮, 主要表现为固定白刺沙堆有较厚的藻结皮、物理结皮和苔藓结皮(20.59 mm), 是半固定白刺沙堆的 5 倍; 半固定白刺沙堆仅有物理结皮且较薄; 流动白刺沙堆未形成沙结皮而是疏松的流沙。可见, 不同封育年代的沙堆, 随着沙堆的固定形成土壤结皮且土壤紧实度不断增加, 这可能是为什么固定白刺沙堆灌木植物依次不断退化的主要原因。

## 2.2 不同类型沙堆土壤水分物理性质

就已封育 40 年的固定白刺沙堆而言,土壤密度表层最低,最大持水量、毛管持水量、田间持水量和总孔隙度表层最大,分别为 656.97 g/kg、608.54 g/kg、512.72 g/kg、6.24%,土壤总孔隙度越大,持水能力越强,即土壤保水能力越强,0~30 cm 土层土壤密度随深度增加而增大,最大持水量、毛管持水量、田间持水量和总孔隙度随深度增大而减小,但深层土壤密度、最大持水量、毛管持水量、田间持水量和总孔隙度变化不稳定(表 2),这可能是土壤在沙漠化过程中不断往复变化造成的。

从表 3 可以得出,对荒漠绿洲过渡带已封育 20 年的半固定白刺沙堆来说,在浅层土壤(0~10 cm)范围内,土壤密度由大变小,各持水量依次增大;在 50~90 cm 范围内,土壤密度随土层深度增大依次增大,最大持水量、毛管持水量、田间持水量变化不规律,而总孔隙度不同深度基本保持不变。

对于荒漠绿洲过渡带边缘未封育的流动白刺沙堆来说,土壤密度表层最大,总孔隙度浅层(0~10 cm)沙土小于深层(30~110 cm),而在 30~110 cm 范围内,最大持水量、毛管持水量、田间持水量、土壤密度和总孔隙度变化很不稳定(表 4),原因在于流动白刺沙堆植被稀疏,无土壤结皮,是裸露沙堆,在风沙活动频繁的环境下,表层沙粒不断移动,各土层往复变化致使土壤密度、持水量和总孔隙度变化无规律性。

表 1 不同类型沙堆土壤紧实度与结皮厚度特征

Table 1 The characteristics of soil crust thickness and hardness in different types of sandpile

| 样地类型<br>Plot type           | 土壤紧实度值<br>Soil hardness<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 结皮层厚度<br>Soil crust<br>thickness (mm) |
|-----------------------------|--|---------------------------------------|
| 固定白刺沙堆 Fixed sandpile       | 2.60±0.16a                                       | 20.59±0.21a                           |
| 半固定白刺沙堆 Semi-fixed sandpile | 2.11±0.09b                                       | 4.51±0.13b                            |
| 流动白刺沙堆 Flowing sandpile     | 0.53±0.03c                                       | 0.00±0.17c                            |

注:表中值为平均值±标准误,同列不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

Note: The table is the mean value±standard error, different lower-case letters indicate significant differences at  $P < 0.05$ .

表 2 固定白刺沙堆不同土层深度土壤水分物理性质

Table 2 Soil water physical properties of different soil depth on fixed *N. tangutorun* sandpile

| 土层深度<br>Soil depth<br>(cm) | 土壤密度<br>Soil density<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 最大持水量<br>Maximum capacity<br>(g/kg) | 毛管持水量<br>Capillary water<br>capacity (g/kg) | 田间持水量<br>Field capacity<br>(g/kg) | 非毛管孔隙度<br>Non-capillary<br>gap (%) | 毛管孔隙度<br>Capillary gap<br>(%) | 总孔隙度<br>Total porosity<br>(%) |
|----------------------------|--|-------------------------------------|---|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 0                          | 1.95±0.05                                    | 656.97±0.12                         | 608.54±0.21                                 | 512.72±0.11                       | 0.46±0.18                          | 5.78±0.06                     | 6.24±0.36                     |
| 10                         | 2.23±0.25                                    | 466.11±0.11                         | 440.18±0.16                                 | 346.15±0.13                       | 0.32±0.21                          | 5.43±0.16                     | 5.75±0.29                     |
| 30                         | 2.25±0.16                                    | 447.25±0.03                         | 415.15±0.56                                 | 330.89±0.17                       | 0.40±0.09                          | 5.17±0.23                     | 5.57±0.19                     |
| 50                         | 2.14±0.58                                    | 524.98±0.61                         | 489.90±0.25                                 | 394.32±0.29                       | 0.40±0.19                          | 5.59±0.09                     | 5.99±0.15                     |
| 70                         | 2.15±0.21                                    | 496.56±0.25                         | 465.16±0.38                                 | 355.25±0.33                       | 0.36±0.78                          | 5.33±0.35                     | 5.69±0.39                     |
| 90                         | 2.23±0.32                                    | 430.99±0.22                         | 363.26±0.17                                 | 296.34±0.39                       | 0.83±0.83                          | 4.45±0.18                     | 5.28±0.28                     |
| 110                        | 2.30±0.20                                    | 392.61±0.56                         | 359.52±0.16                                 | 199.47±0.05                       | 0.43±0.26                          | 4.67±0.31                     | 5.10±0.08                     |

表 3 半固定白刺沙堆不同土层深度土壤水分物理性质

Table 3 Soil water physical properties of different soil depth on semi-fixed *N. tangutorun* sandpile

| 土层深度<br>Soil depth<br>(cm) | 土壤密度<br>Soil density<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 最大持水量<br>Maximum capacity<br>(g/kg) | 毛管持水量<br>Capillary water<br>capacity (g/kg) | 田间持水量<br>Field capacity<br>(g/kg) | 非毛管孔隙度<br>Non-capillary<br>gap (%) | 毛管孔隙度<br>Capillary gap<br>(%) | 总孔隙度<br>Total porosity<br>(%) |
|----------------------------|--|-------------------------------------|---|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 0                          | 2.30±0.11                                    | 468.89±0.16                         | 442.62±0.08                                 | 370.79±0.07                       | 0.34±0.13                          | 5.73±0.02                     | 6.07±0.13                     |
| 10                         | 2.14±0.16                                    | 532.83±0.28                         | 505.63±0.03                                 | 417.00±0.06                       | 0.31±0.19                          | 5.76±0.00                     | 6.07±0.19                     |
| 30                         | 2.20±0.09                                    | 451.08±0.33                         | 400.73±0.13                                 | 335.28±0.05                       | 0.60±0.24                          | 4.78±0.08                     | 5.38±0.09                     |
| 50                         | 2.21±0.28                                    | 494.32±0.18                         | 456.39±0.18                                 | 364.05±0.00                       | 0.46±0.29                          | 5.54±0.03                     | 6.00±0.07                     |
| 70                         | 2.22±0.34                                    | 495.29±0.07                         | 456.00±0.35                                 | 378.25±0.16                       | 0.48±0.33                          | 5.57±0.11                     | 6.05±0.12                     |
| 90                         | 2.27±0.22                                    | 437.79±0.36                         | 404.74±0.15                                 | 311.87±0.11                       | 0.42±0.17                          | 5.14±0.11                     | 5.56±0.21                     |

表 4 流动白刺沙堆不同土层深度土壤水分物理性质

Table 4 Soil water physical properties of different soil depth on flowing *N. tangutorun* sandpile

| 土层深度<br>Soil depth<br>(cm) | 土壤密度<br>Soil density<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 最大持水量<br>Maximum capacity<br>(g/kg) | 毛管持水量<br>Capillary water<br>capacity (g/kg) | 田间持水量<br>Field capacity<br>(g/kg) | 非毛管孔隙度<br>Non-capillary<br>gap (%) | 毛管孔隙度<br>Capillary gap<br>(%) | 总孔隙度<br>Total porosity<br>(%) |
|----------------------------|--|-------------------------------------|---|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 0                          | 2.32±0.08                                    | 447.67±0.15                         | 398.49±0.03                                 | 348.86±0.21                       | 0.65±0.19                          | 5.27±0.02                     | 5.92±0.12                     |
| 10                         | 2.26±0.09                                    | 455.01±0.11                         | 375.68±0.05                                 | 318.48±0.15                       | 1.00±0.09                          | 4.74±0.08                     | 5.74±0.07                     |
| 30                         | 2.26±0.14                                    | 505.31±0.13                         | 464.19±0.07                                 | 407.58±0.19                       | 0.52±0.06                          | 5.87±0.15                     | 6.39±0.09                     |
| 50                         | 2.29±0.08                                    | 473.25±0.16                         | 394.92±0.10                                 | 339.00±0.15                       | 1.01±0.13                          | 5.09±0.10                     | 6.10±0.16                     |
| 70                         | 2.29±0.12                                    | 469.27±0.08                         | 411.91±0.06                                 | 355.01±0.23                       | 0.74±0.01                          | 5.31±0.00                     | 6.05±0.14                     |
| 90                         | 2.19±0.13                                    | 552.97±0.10                         | 514.25±0.15                                 | 456.68±0.11                       | 0.46±0.15                          | 6.11±0.09                     | 6.57±0.17                     |
| 110                        | 2.24±0.23                                    | 507.34±0.07                         | 474.20±0.09                                 | 407.68±0.10                       | 0.41±0.12                          | 5.87±0.13                     | 6.28±0.05                     |

综上所述,不同类型沙堆表层土壤密度大小依次表现为:流动白刺沙堆>半固定白刺沙堆>固定白刺沙堆;最大持水量、毛管持水量、田间持水量和总孔隙度大小依次为:固定白刺沙堆>半固定白刺沙堆>流动白刺沙堆;固定白刺沙堆在 0~30 cm 范围内,各土层土壤密度、持水量和孔隙度变化稳定,而半固定白刺沙堆和流动白刺沙堆变化不稳定,各类沙堆深层土壤密度、最大持水量、毛管持水量、田间持水量和总孔隙度变化无规律。

2.3 不同类型沙堆土壤水分变化特性

固定白刺沙堆土壤含水量变化情况如图 1 所示,土壤含水量随降雨量的变化呈现一定的动态特征和规律性。主要表现为在无自然降雨的情况下,浅层土壤含水量(0~15 cm)明显低于深层土壤(15~100 cm)。其中,50 cm 处土壤含水量最高,为 9%左右;随着小降雨事件的发生,表层土壤含水量基本保持不变,但随着降雨量的不断增加,表层土壤含水量在短时间内显著增大,尤其在 0~15 cm 范围内;在 30 cm 土层,大降雨事件一段时间后,土壤含水量才不断增大,而深层土壤 50~100 cm 范围内降雨事件的发生对其含水量基本没有影响。

由图 2 可以看出,在 0~30 cm 土层范围内,土壤含水量随降雨量的变化不稳定,随大降雨事件的发生土层含水量变化幅度较大,小降雨量情况下土壤含水量变化幅度不大;而在 30~150 cm 范围内,土壤水分含量随降雨量的变化比较稳定,降雨量的多少对深层土壤水分含量影响不大;且各土层在 130 cm 左右土壤含水量一直保持较高水平。

图 3 是流动白刺沙堆土壤水分连续观测的结果。当降雨量小于 4 mm 时,各土层土壤含水量基本稳定,在 0~4 mm 之间波动;当降雨量超过 7 mm 时,0~110 cm 范围内,随降雨量的变化各土层土壤水分含量变化幅度较大,尤其当降雨量大于 18 mm 一段时间后,70 cm 处土壤含水量变化特别明显;但深层土壤 110~150 cm 范围内,随降雨量的增加或减小,各土层土壤水分含量变化不显著,相对比较稳定。

总之,民勤绿洲荒漠过渡带天然降雨集中在 6~9 月,在没有降雨的情况下,浅层(0~10 cm)土壤含水量半固定和流动白刺沙堆大于固定白刺沙堆,深层土壤含水量固定白刺沙堆明显大于半固定和流动白刺沙堆,但随着降雨量和降雨时间的延长,表层土壤含水量变化波动幅度较大,深层土壤含水量基本保持不变。可见,在没有天然

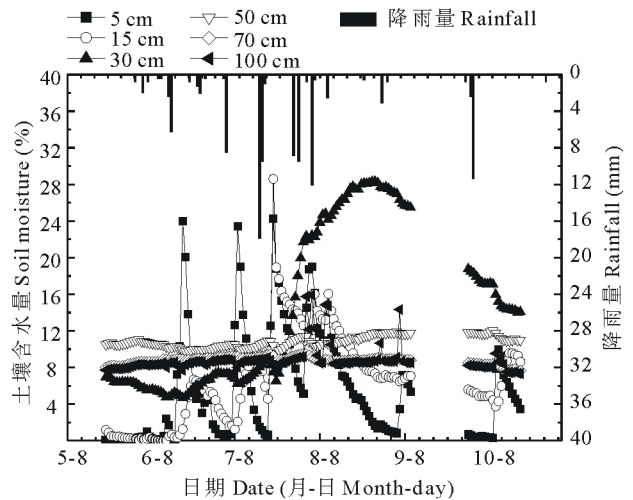


图 1 固定白刺沙堆土壤水分变化特征

Fig. 1 Soil water characteristics of fixed *N. tangutorun* sandpile

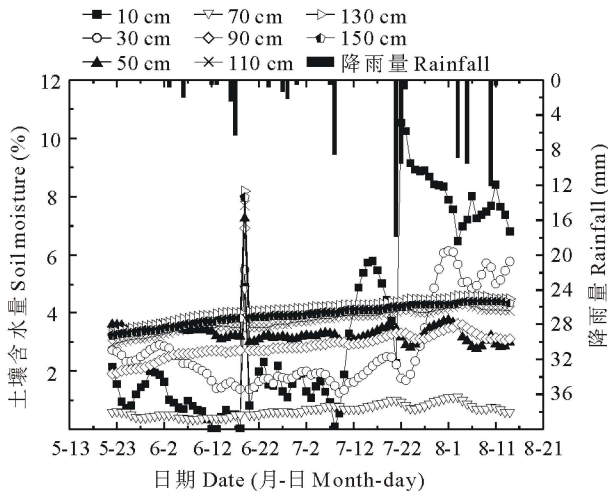


图 2 半固定白刺沙堆土壤水分变化特征

Fig. 2 Soil water characteristics of semi-fixed *N. tangutorun* sandpile

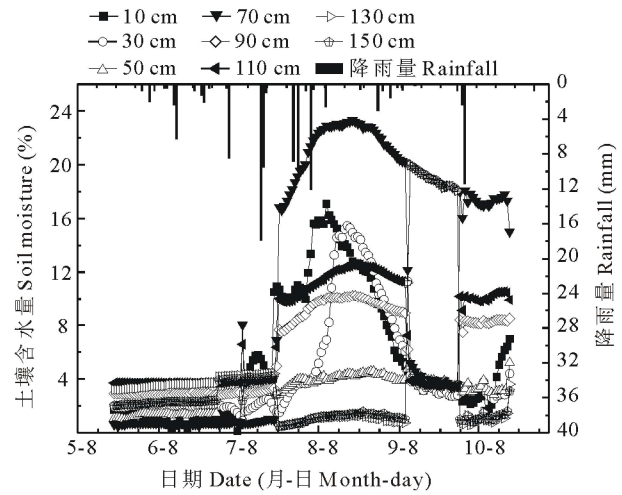


图 3 流动白刺沙堆土壤水分变化特征

Fig. 3 Soil water characteristics of flowing *N. tangutorun* sandpile

降雨事件的情况下,随着沙堆的演化和不断固定,土壤结皮的形成抑制深层土壤水分的蒸发,保持土壤含水量相对稳定,天然降雨有利于补给浅层土壤水分含量。

2.4 不同类型沙堆降雨量与入渗量的关系

将不同类型白刺灌丛沙堆降雨量与土壤累计入渗量进行线性回归分析(图 4),回归方程如表 5 所示,其中 X 代表降雨量, Y 代表累积入渗量,累积入渗量等于 0 时的降雨量为临界降雨量。如图 4 可知,3 种不同类型沙堆降雨量与累积入渗量之间都存在显著的正相关关系( $P < 0.01$ )。固定、半固定白刺沙堆随降雨事件的发生立即开始入渗,而流动白刺沙堆当降雨量达到临界降雨量后,水分才开始入渗,否则降雨结束时将全部蒸散损耗。流动白刺沙堆,植被稀疏,植物种类少,覆盖度低,蒸发量大,干沙层厚,无土壤结皮,需要较大的降雨量才能浸透干沙层开始下渗,其临界降雨量为 2.95 mm;半固定白刺沙堆较流动白刺沙堆植被覆盖度大,减弱了水分的蒸发,并形成一层较薄但表面没有褶皱的物理结皮,干沙层较流动白刺沙堆薄;而固定白刺沙堆表层形成一层有褶皱状的藻结皮和苔藓结皮,其褶皱状藻结皮有聚水性,苔藓结皮有吸水性,因此,只要有降雨事件的发生就开始入渗。另外,在降雨量相同的情况下,当降雨量大于 0.12 mm,累积入渗量大小分别为:固定白刺沙堆 > 半固定白刺沙堆 > 流动白刺沙堆。

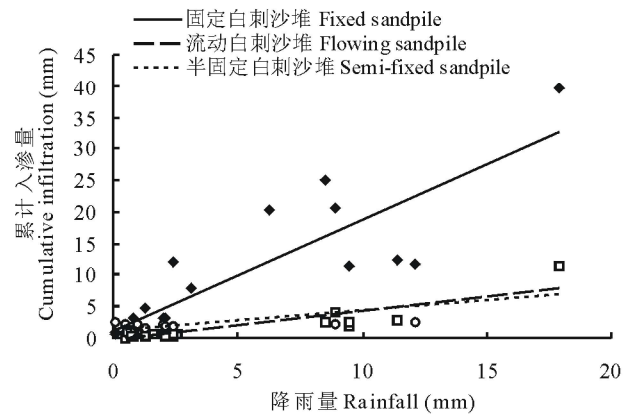


图 4 不同类型沙堆降雨量与入渗量的关系

Fig. 4 The correlation between rainfall and infiltration in different sandpile types

表 5 不同类型沙堆降雨量与入渗量关系回归方程

Table 5 The regression equation between rainfall and infiltration in different sandpile types

| 样地类型 Plot type              | 回归方程 Regression equation | $R^2$  | Sig.  |
|-----------------------------|--------------------------|--------|-------|
| 固定白刺沙堆 Fixed sandpile       | $Y=1.7603X+1.0427$       | 0.7358 | 0.009 |
| 半固定白刺沙堆 Semi-fixed sandpile | $Y=0.3147X+1.2038$       | 0.4991 | 0.001 |
| 流动白刺沙堆 Flowing sandpile     | $Y=0.4563X-1.344$        | 0.7603 | 0.000 |

### 3 讨论

#### 3.1 灌丛沙堆土壤物理变化特征

土壤紧实度和结皮层厚度作为重要的土壤物理属性,其紧实度大小和结皮层厚度演变成了不同沙堆类型。就民勤荒漠绿洲过渡带已形成的固定白刺沙堆,由于长期的封育、防护林阻拦、风积沙尘,形成了典型的苔藓结皮、藻结皮、物理结皮等,有效阻止了沙丘表层细砂粒移动<sup>[33]</sup>;半固定白刺沙堆植被覆盖度高,植物种类多,生物多样性复杂,形成了典型的小区域植被防沙体系,经过长期的阻拦,细砂粒沉积形成粘土和物理结皮;反之,流动白刺沙堆区域植被覆盖度较低,风速大,加之沙丘的长期运移和往复摆动,无结皮形成。可见,从荒漠区向绿洲区过渡的过程,也就是丰富生物多样性,形成风沙土和稳定的荒漠生态系统的过程。此外,随着土壤紧实度增大,土壤结皮的形成,降雨难以入渗,尤其固定白刺沙堆植被严重退化,对于这两大突出矛盾如何解决是今后有待进一步研究的课题。

另外,荒漠绿洲过渡带风沙土的密度、容重、孔隙度等直接影响着土壤的质地、结构、有机质含量、生物多样性及土壤酶活性和微生物数量,间接的影响着养分循环和能量交换<sup>[34]</sup>,决定着风沙土形成和成土快慢<sup>[35]</sup>。本研究发现不同类型沙堆表层土壤密度依次表现为:流动白刺沙堆>半固定白刺沙堆>固定白刺沙堆;最大持水量、毛管持水量、田间持水量和总孔隙度依次为:固定白刺沙堆>半固定白刺沙堆>流动白刺沙堆;固定白刺沙堆在0~30 cm 范围内,各土层土壤密度、持水量和空隙度变化稳定,而半固定白刺沙堆和流动白刺沙堆变化不稳定。尤其深层土壤密度、最大持水量、毛管持水量、田间持水量和总孔隙度变化不稳定,这与徐丽恒<sup>[36]</sup>的研究结果相一致。可见,随着荒漠区向绿洲区生态环境的不断演化,固定白刺沙堆表层形成藻结皮和苔藓结皮,半固定白刺沙堆形成物理结皮,所以土壤密度依次减小,持水能力、孔隙度依次增大,而流动白刺沙堆是裸露的沙堆,其结果恰好与其相反;但深层土壤随着沙堆从流动、半固定到固定不断演化的过程中风沙土往复运移、细颗粒物沉降和通过生物化学过程的作用,使深层土壤表现出不同的分层特征,如粗砂层、细砂层等,从而使深层土壤密度、持水能力和孔隙度表现出不稳定的变化特征。

#### 3.2 灌丛沙堆土壤水文变化特征

通过对民勤荒漠绿洲过渡带天然降雨量进行定位定时观测,发现降雨量主要集中在6—9月,但年总降雨量不超过200 mm;在无天然降雨的情况下,浅层(0~10 cm)土壤含水量半固定和流动白刺沙堆大于固定白刺沙堆,深层(50 cm 以下)土壤含水量固定白刺沙堆明显大于半固定白刺沙堆和流动白刺沙堆;这可能主要是由于固定白刺沙堆植被覆盖度很低,植物对水分的利用率小,根系分布较少以及内部环境的稳定可能使土壤含水量有所增加并保持稳定,所以深层土壤含水量较高,半固定白刺沙堆植被覆盖度较高,形成局部小环境气候、灌木植物遮阴、林冠截留作用等<sup>[37]</sup>,使表层含水量较高,而深层植物根系分布广,为保证其自然生长根系吸收大量水分,进而土壤含水量较低,流动白刺沙堆由于表层流沙的不断运移,使浅层常处于湿沙层;随着降雨事件的发生和降雨时间的延长,表层土壤含水量波动幅度较大,深层土壤含水量基本保持不变。

鲁瑞洁等<sup>[32]</sup>研究结果表明3类沙堆累积入渗量与降雨量之间都存在显著的正相关关系,达到临界降雨量后,累积入渗量随降雨量的增加而增大。降雨量只有达到某一临界值才发生下渗,否则降雨结束时将全部蒸散损耗。本研究结果与此有所不同,本研究发现固定和半固定白刺沙堆随降雨事件的发生立即开始入渗,而流动白刺沙堆当降雨量达到临界降雨量后,水分才开始入渗,否则降雨结束时将全部蒸散损耗。主要是由于固定白刺沙堆表层形成一层有褶皱状的藻结皮和苔藓结皮,其褶皱状藻结皮有聚水性,苔藓结皮有吸水性;半固定白刺沙堆较流动白刺沙堆植被覆盖度大,减弱了水分的蒸发,并形成一层较薄但表面没有褶皱的物理结皮,干沙层较流动白刺沙堆薄;流动白刺沙堆,植被稀疏,植物种类少,覆盖度低,蒸发量大,干沙层厚,无土壤结皮,需要较大的降雨量才能浸透干沙层开始下渗。

### 4 结论

1)固定、半固定和流动白刺沙堆之间土壤紧实度和结皮层厚度差异显著( $P < 0.01$ )。土壤紧实度大小分别为2.60,2.11,0.53 kg/cm<sup>2</sup>,结皮厚度依次为20.59,4.51,0 mm。

2) 表层土壤密度表现为: 流动白刺沙堆 > 半固定白刺沙堆 > 固定白刺沙堆, 分别为 2.32, 2.30, 1.95 g/cm<sup>3</sup>, 恰好与表层最大持水量、毛管持水量、田间持水量和总孔隙度大小相反, 但深层土壤各物理因子变化不规律。

3) 民勤绿洲荒漠过渡带天然降雨集中在 6—9 月, 在干旱季节, 浅层(0~10 cm) 土壤含水量半固定和流动白刺沙堆大于固定白刺沙堆, 深层土壤含水量固定白刺沙堆明显大于半固定和流动白刺沙堆; 在多雨季节, 随着降雨量和降雨时间的延长, 表层土壤含水量波动幅度较大, 深层土壤含水量基本保持不变; 不同类型沙堆降雨量与累计入渗量之间存在显著的正相关性( $P < 0.01$ )。其中固定、半固定白刺沙堆随降雨事件的发生立即开始入渗, 而流动白刺沙堆当降雨量达到临界降雨量后才开始入渗。

## References:

- [1] Jia B Q, Ci L J. The primary estimation of water demand by the eco-environment in Xinjiang. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(2): 243-250.
- [2] Huang S Z. Oasis Research[M]. Beijing: Scientific Publishing, 2003: 9-13.
- [3] Zhang X S. Ecological restoration and sustainable agricultural paradigm of mountain-oasis-ecotone-desert system in the north of the Tianshan mountains. *Acta Botanica Sinica; English editon*, 2001, 43(12): 1294-1299.
- [4] Jia B Q, Ci L J. Oasis Landscape Ecology Research[M]. Beijing: Scientific Publishing, 2003: 7-25.
- [5] Wang X, Wang T, Dong Z, *et al.* Nebkha development and its significance to wind erosion and land degradation in semi-arid northern China. *Journal of Arid Environments*, 2006, 65(1): 129-141.
- [6] Wang T, Wu W, Xue X, *et al.* Time space evolution of desertification land in northern China. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(3): 230-235.
- [7] Wang X M, Dong Z B, Zhang J W, *et al.* Geomorphology of sand dunes in the northeast Taklimakan Desert. *Geomorphology*, 2002, 42: 183-195.
- [8] Wang X M, Dong Z B, Zhang J W, *et al.* Formation of the complex linear dunes in the central Taklimakan Sand Sea, China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2004, 29: 677-686.
- [9] Yue X L, Ha S, Zhuang Y M, *et al.* Studies on sandy grassland nebkhas—A review. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(5): 738-743.
- [10] Tengberg A. A nebkhas dunes as indicators of wind erosion and land degradation in the Sahel zone of Burkina Faso. *Journal of Arid Environment*, 1995, 30: 265-282.
- [11] Dougill A J, Thomas A D. Nebkhas dunes in the Molopo Basin, South Africa and Botswana: Formation controls and their validity as indicators of soil degradation. *Journal of Arid Environments*, 2002, 50: 413-428.
- [12] Jia B Q, Ci L J, Cai T J, *et al.* Preliminary research on changing soil water characters at ecotone between oasis and desert. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(2): 203-208.
- [13] Wang B. Water and Heat Balance and Its Coupling Simulation at Transitional Region between Oasis and Desert[M]. Beijing: The Science & Technology Press, 2003.
- [14] Du J H, Yan P, E Y H. Distribution patterns and characteristics of *Nitraria tangutorum* nebkha at its different evolvement stages in the Minqin County of Gansu Province. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(8): 1165-1170.
- [15] Tengberg A, Faso B. A comparative analysis of nebkhas in central Tunisia and northern Burkina Faso. *Aeolian an Environments*, 1998, 22: 181-192.
- [16] Hesp P, McLachlan A. Morphology, dynamics, ecology and fauna of *Arctotheca populiifolia* and *Gazania rigens* nabkha dunes. *Journal of Arid Environments*, 2000, 44(2): 155-172.
- [17] Langford R P. Nebkha (coppice dune) fields of south-central New Mexico, U. S. A. *Journal of Arid Environments*, 2000, 46(1): 25-41.
- [18] Han S L, Ye D M, Qin J Q, *et al.* Moisture content and physical properties of *Nitraria tangutorum* in the Ulanbu Desert. *Arid Zone Research*, 2005, 28(4): 506-510.
- [19] Zhang J C, Zhao C M, Zhang Y C, *et al.* A research between photosynthetic, transpiration characteristics and impact of irrigated vegetation of *Haloxylon ammodendron* and *Nitraria tangutorum*. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, 25(1): 70-76.
- [20] Zhao C M, Wei X P, Wei Q S, *et al.* Photosynthetic characteristics of *Nitraria tangutorum* and *Haloxylon ammodendron* in the ecotone between oasis and desert in Minqin, Region, Country. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 1908-1913.
- [21] He Z B, Zhao W Z. Spatial pattern of two dominant shrub populations at transitional zone between oasis and desert of Heihe river basin. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(6): 947-952.



- [22] Luo J B, Sun B P. Study on techniques of vegetation restoration in arid region—A case research along the Yuelianghu highway in the Tengger Desert, China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005, 19(4): 205-208.
- [23] Yang Z H, Gao Z H. Impact of precipitation and underground water level in the edge of oases on growth and decline of *Nitraria tangutorum* community. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(6): 923-926.
- [24] Ashish B, Monica B. Microbial diversity in desert ecosystems. *Microbial Diversity*, 2005, (1): 91-100.
- [25] Shamir I, Steinberger Y. Vertical distribution and activity of soil microbial population in a sandy desert ecosystem. *Microbial Diversity*, 2007, (2): 349-347.
- [26] Chanal A, Chapon V, Benzerara K, *et al.* The desert of Tataouine: an extreme environment that hosts a wide diversity of microorganisms and radio tolerant bacteria. *Environmental Microbiology*, 2006, (3): 514-525.
- [27] Orlando J, Alfaro M, Bravo L, *et al.* Bacterial diversity and occurrence of ammonia-oxidizing bacteria in the Atacama Desert soil during a “desert bloom” event. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, (7): 1183-1188.
- [28] Dou H X, Wang M J. The temporal and spatial dynamics of soil seed bank under different types of sand dunes in Hunsandake sandy land. *Pratacultural Science*, 2008, 25(3): 116-118.
- [29] Guo Y R, Zhao H L, Zhao X Y, *et al.* Study on crust development and its influences on soil physicochemical properties in Horqin Sand. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(1): 135-139.
- [30] Yang X J, Wang Y S, Duan L D, *et al.* Changes of soil microbial biomass and enzymatic activities among restoration stages of Langshan Forest Park, Hunan Province. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(1): 142-148.
- [31] Hu L, Wang C T, Wang G X, *et al.* Changes in the activities of soil enzymes and microbial community structure at different degradation successional stages of alpine meadows in the headwater region of three rivers, China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(3): 8-19.
- [32] Lu R J, Tang Q L, Wei D S, *et al.* Rain water infiltration at dunes under various rainfall events in sandy and to the east of Qinghai lake. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(5): 797-802.
- [33] Williams J D. Microphytic crust influence on interrill erosion and infiltration capacity. *Engin*, 1995, 38(1): 139-146.
- [34] Tyler S W, Wheatcrafu S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53: 987-996.
- [35] Liu N J. Effect of artificial *Haloxylon ammodendron* forest on the physical and chemical properties of sand soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(6): 1480-1482.
- [36] Xu L H, Wang J H, Li Y, *et al.* Variations of soil physical properties in desertification reversion process at south edge of Tengger Desert. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(4): 690-694.
- [37] Zhu Y J, Jia Z Q. Water source of *Haloxylon ammodendron* plantations in autumn at the southeast edge of Badain Jaran Desert. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(8): 1-5.

#### 参考文献:

- [1] 贾宝全. 新疆生态用水量的初步估算. *生态学报*, 2000, 20(2): 243-250.
- [2] 黄盛璋. 绿洲研究[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 9-13.
- [3] 张新时. 天山北部山地—绿洲—过渡带—荒漠系统的生态建设与可持续农业范式. *植物学报: 英文版*, 2001, 43(12): 1294-1299.
- [4] 贾宝全, 慈龙骏. 绿洲景观生态研究[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 7-25.
- [12] 贾宝全, 慈龙骏, 蔡体久, 等. 绿洲—荒漠交错带土壤水分变化特征初步研究. *植物生态学报*, 2002, 26(2): 203-208.
- [13] 王兵. 绿洲荒漠过渡区水热平衡规律及其耦合模拟研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.
- [14] 杜建会, 严平, 俄有浩. 甘肃民勤不同演化阶段白刺灌丛沙堆分布格局及特征. *生态学杂志*, 2007, 26(8): 1165-1170.
- [18] 韩胜利, 叶冬梅, 秦佳琪, 等. 乌兰布和沙漠白刺灌丛土壤水分及物理特性的研究. *干旱区地理*, 2005, 28(4): 506-510.
- [19] 张锦春, 赵长明, 张应昌, 等. 灌溉植被梭梭、白刺光合蒸腾特性及影响因素研究. *西北植物学报*, 2005, 25(1): 70-76.
- [20] 赵长明, 魏小平, 尉秋实, 等. 民勤绿洲荒漠过渡带植物白刺和梭梭光合特性. *生态学报*, 2005, 25(8): 1908-1913.
- [21] 何志斌, 赵文智. 黑河流域荒漠绿洲过渡带两种优势植物种群空间格局特征. *应用生态学报*, 2004, 15(6): 947-952.
- [22] 罗俊宝, 孙保平. 腾格里沙漠月亮湖公路沿线退化白刺沙堆封育及其防沙效益. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(4): 205-208.
- [23] 杨自辉, 高志海. 荒漠绿洲边缘降水和地下水对白刺群落消长的影响. *应用生态学报*, 2000, 11(6): 923-926.
- [28] 窦红霞, 王明玖. 浑善达克沙地不同沙堆类型土壤种子库时空动态. *草业科学*, 2008, 25(3): 116-118.
- [29] 郭铁瑞, 赵哈林, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地结皮发育对土壤理化性质影响的研究. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 135-139.
- [30] 杨贤均, 王业社, 段林东, 等. 湖南良山森林公园不同植被条件下土壤微生物量及酶活性研究. *草业学报*, 2014, 23(1): 142-148.

- [31] 胡雷, 王长庭, 王根绪, 等. 三江源区不同退化演替阶段高寒草甸土壤酶活性和微生物群落结构的变化. 草业学报, 2014, 23(3): 8-19.
- [32] 鲁瑞洁, 唐清亮, 魏殿生, 等. 青海湖湖东沙地不同沙堆降雨入渗研究. 中国沙漠, 2013, 33(5): 797-802.
- [35] 刘乃君. 人工梭梭林对沙地土壤理化性质的影响. 水土保持通报, 2008, 39(6): 1480-1482.
- [36] 徐丽恒, 王继和, 李毅, 等. 腾格里沙漠南缘沙漠化逆转过程中的土壤物理性质变化特征. 中国沙漠, 2008, 28(4): 690-694.
- [37] 朱雅娟, 贾志清. 秋季巴丹吉林沙漠东南缘人工梭梭林水分来源. 林业科学, 2012, 48(8): 1-5.