

干旱荒漠区白刺灌丛沙堆土壤温度及水分养分变化特征

王景瑞¹, 孙涛^{3*}, 韩福贵^{2,3}, 张忠³, 张裕年³, 郭树江¹, 段晓峰¹

(1. 甘肃省治沙研究所 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. 甘肃省治沙研究所 甘肃河西走廊森林生态系统国家定位观测研究站, 甘肃 武威 733000;

3. 甘肃省治沙研究所 荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室培育基地, 甘肃 兰州 730070)

摘要:以民勤沙区不同变化阶段白刺灌丛沙堆为研究对象,测定白刺灌丛沙堆高度、长短轴、迎风坡与背风坡植被株高、盖度、枯枝和结实等形态特征,分析不同变化阶段土壤温度及水分养分变化特征。结果表明,1)土层0~10 cm处的土壤温度随着时间推移地面温度呈现出先逐渐升高而后缓慢下降的趋势,日变化规律为发育阶段>雏形阶段>稳定阶段>衰退阶段。2)在不同发育阶段土壤含水率在40~60 cm土层中最高,0~5 cm最低,随着土层深度增加水分含量呈现逐渐升高的趋势。3)不同变化阶段土层pH在5~10 cm最高,不同坡向pH均为迎风坡大于背风坡;衰退阶段背风坡中电导率最高,均大于其他发育阶段的坡向。4)土壤TN、速效磷平均含量发育阶段最高、有机质衰退阶段最高、稳定阶段均最低;土壤TN为雏形阶段、发育阶段和衰退阶段迎风坡中大于背风坡中,稳定阶段则相反;土壤有机质为雏形阶段和发育阶段背风坡中大于迎风坡中,稳定阶段和衰退阶段则相反;土壤速效磷为不同发育阶段迎风坡中大于背风坡中,土壤温度在0~10 cm处日动态呈现出先逐渐升高而后缓慢下降的趋势;土壤含水率在40~60 cm土层中最高,0~5 cm最低;pH在5~10 cm最高;电导率在衰退阶段背风坡中最高;土壤TN、有机质和速效磷在发育阶段表面养分含量达到最高,且显著高于其他几个阶段。研究结果为民勤荒漠区白刺群落植被恢复与保护提供科学理论依据。

关键词:民勤沙区;白刺灌丛;土壤温度;土壤水分;土壤养分

中图分类号:S718.516 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2023)02-0045-08

Variation Characteristics of Soil Temperature, Water and Nutrient in *Nitraria tangutorum* Shrub-Growing Sand Pile in Arid Desert Area

WANG Jing-rui¹, SUN Tao^{3*}, HAN Fu-gui^{2,3}, ZHANG Zhong³, ZHANG Yu-nian³,
GUO Shu-jiang¹, DUAN Xiao-feng¹

(1. Gansu Sand Control Research Institute/National Field Scientific Observation and Research Station of Desert Grassland Ecosystem in Minqin, Minqin 733300, Gansu, China; 2. Gansu Sand Control Research Institute/Gansu Hexi Corridor Forest Ecosystem National Positioning Observation and Research Station, Wuwei 733000, Gansu, China; 3. Gansu Institute of Desertification Control, Breeding Base of State Key Laboratory for Desertification and Sand Storm Control, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Taking the *Nitraria tangutorum* shrub-growing sand piles at different developmental stages in Minqin sandy area as research objects, the pile height, length axis, plant height, coverage, dead branches and fruiting of sand pile were measured. The variation characteristics of soil temperature, moisture and nutrients in different changing stages were analyzed. The results showed that 1) the soil temperature at 0–10 cm soil layer increased gradually and then decreased slowly with time, the daily change rule was in the or-

收稿日期:2022-03-15 修回日期:2022-04-11

基金项目:甘肃省自然科学基金项目(20JR10RA465);甘肃省青年科技计划项目(22JR5RA766);国家自然科学基金青年基金项目(31300595)。

第一作者:王景瑞,硕士,工程师。研究方向:物种多样性保护与荒漠化防治。E-mail:125431248@qq.com

* 通信作者:孙涛,博士,研究员。研究方向:荒漠生态、荒漠植被恢复及荒漠化防治。E-mail:suntaosun@163.com

der of developmental stage>preliminary stage>stable stage>decline stage. 2) The soil moisture content was the highest in 40—60 cm soil layer and the lowest in 0—5 cm soil layer at different development stages. 3) The soil pH at 5—10 cm soil layer of all sand piles with different changing stages was the highest. The soil pH of windward slope was higher than that of leeward slope. The electrical conductivity of leeward slope of the piles at declining stage was higher than those of other developing stages. 4) The average contents of total nitrogen and available phosphorus in soil were the highest in the developing stage; the contents of soil organic matter were the highest in the declining stage and the lowest in the stable stage; the contents of soil total nitrogen at preliminary stage, developmental stage, and decline stage were higher in windward slope than leeward slope, while in table stage, higher in leeward slope than windward slope; the contents of soil organic matter were higher in leeward slope than windward at preliminary stage and developmental stage, while they were opposite at stable stage; the contents of soil available phosphorus in windward slope were higher than leeward slope at all the developmental stages. The daily dynamic of soil temperature at 0—10 cm layer increased gradually at first and then decreased slowly. The soil water content was the highest in 40—60 cm soil layer, the lowest in 0—5 cm soil layer; the soil pH was the highest in 5—10 cm soil layer; the electrical conductivity was the highest in the leeward slope at decline stage; the contents of total soil nitrogen, organic matter and available phosphorus in surface soil were the highest at development stage, which were significantly higher than other stages. The results provide scientific and theoretical basis for the restoration and protection of *N. tangutorum* community in Minqin Desert area.

Key words: Minqin sand area; *Nitraria tangutorum* shrub; soil temperature; soil moisture; soil nutrient

灌丛沙堆是植被与风沙沉积物共同作用下形成的独特的地貌类型^[1],在荒漠过渡带、绿洲边缘地带分布广泛。灌丛沙堆一般是以植物拦截风积物为开始,经历雏形-发育-稳定-衰退 4 个阶段,最终当依附植被死亡后,沙堆解体。沙堆的发育阶段和形态对灌丛沙堆表面气流特征、风蚀堆积平衡、土壤水分和养分都有很大影响^[2-5],同时沙层厚度、沙粒粒度以及凋落物同位素含量等也可以揭示其不同变化阶段的气候和环境特征^[6-7]。随着研究的不断深入,许多学者开始认识到灌丛沙堆在干旱半干旱地区生态系统中的生态功能变化。灌丛沙堆的出现不仅能够拦截到丘间地的沉积物沙粒,防止新的沙源再次形成,而且能够富集水分和养分,保护生物多样性,使得退化生态系统的资源能够得到合理分配,遏制生态系统进一步退化^[8]。一些可食性差的灌木形成的灌丛沙堆更能保护生物多样性^[9]。

白刺(*Nitraria tangutorum*)属蒺藜科(Zygophyllaceae)白刺属(*Nitraria*)的旱生或超旱生灌木或小灌木,分枝稠密,抗旱、耐寒、阻固沙能力强,常以灌丛沙堆的形式存在。白刺具有耐沙埋的特点,沙埋后能迅速长出不定根,进而扩展枝叶、积沙成丘^[10],其发育主要受植被、当地沉积以及水文地质条件的影响^[11-12]。天然白刺大量地分布在民勤西沙窝,具有明显地带性分布特征,在地形、地貌和气候等条件的控制下,该区域天然植被仅有白刺能够大量生存。在强烈的风力搬运堆积作用下,离散的单

个灌丛形成了斑块状分布的灌丛沙堆景观^[13],对防止流沙入侵民勤绿洲、保持绿洲环境的稳定性具有重要的作用。

前人主要针对民勤沙区不同变化阶段白刺灌丛沙堆的土壤呼吸及分布格局和空间异质特征等进行了深入研究。靳虎甲等^[14]研究认为用二次函数较其他模型能更好地表达地下 10 cm 温度与土壤呼吸之间的关系,且两者之间相关性达到极显著;孙涛等^[15]研究认为在干旱半干旱地区降水可以促进沙堆表层微生物存活和快速繁殖;杜建会等^[16]研究认为灌丛沙堆是绿洲和沙漠之间一道重要的生态屏障,其最终的演化方向对绿洲地区的生态环境稳定有着很大影响。目前对民勤干旱沙区不同变化阶段白刺灌丛沙堆土壤温度及水分和养分变化特征系统性的研究较少,本研究通过对民勤地区白刺灌丛沙堆土壤温度、水分及养分的测定分析,揭示白刺灌丛沙堆生态系统功能的稳定性及植被的演化规律,为科学保育绿洲外围白刺灌丛种群恢复和生态环境稳定提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省民勤治沙综合试验站内 3 号降尘观测塔附近(38°35.9'65"N,102°57.4'37"E),海拔 1 378.5 m,属于典型的大陆干旱荒漠气候。多年平均气温 7.6℃,极端最高气温 38.1℃,最低气

温-28.8℃,年平均日较差 15.9℃,年均降水量 115.6 mm,年蒸发量 2 604.3 mm,年均风速 2.7 m·s⁻¹。天然优势植物种为白刺和蒙古沙拐枣(*Calligonum mongolicum*),此外,有 80 年代退耕还林(还草)人工栽植的梭梭(*Halaxylon ammodendron*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、短穗怪柳(*Tamarix laxa*),还有草本植物苦豆子(*Sophora alopecuroides*)等植物^[17]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 在民勤治沙综合试验站区 3 号降尘观测塔附近(西沙窝)选择白刺灌丛沙堆,设置样地大小 50 m×50 m,根据常兆丰等的研究方

法^[18]测定样地内的白刺灌丛沙堆高度、长短轴(冠幅)、迎风坡与背风坡植被枯枝株数、迎风坡与背风坡平均株高、迎风坡与背风坡植被盖度和结实等指标见表 1。同时用 GPS 定位记录每个变化阶段的经纬度、海拔。各项指标在 2014—2017 年 6—7 月测、2018 年 6 月下旬—7 月上旬补测。根据土壤及植被状况,依据文献^[17,19]的划分标准,将白刺灌丛沙堆发育过程划分为雏形、发育、稳定和衰退 4 个变化阶段见表 1。按照灌丛沙堆表面土壤、植被及其发育形态特征,各个阶段选择白刺生长状况相对一致,选择大小和高度相近的 3 个灌丛沙堆作为重复观测研究。

表 1 白刺灌丛沙堆不同发育阶段的形态特征

Table 1 Morphological characteristics of *Nitraria tangutorum* shrub growing pile at different developmental stages

沙包类型	沙包长轴/cm	沙包短轴/cm	沙包高/cm	迎风坡植被盖度(%)	背风坡植被盖度(%)	迎风坡平均株高/cm	背风坡平均株高/cm	形态特征
雏形阶段	4.2	2.4	40	60~65	25~30	16.3	5.80	白刺单株生长,沙堆形状较小,高度平缓(40 cm),无结皮,迎风坡白刺较多,有枯枝 6 个,背风坡白刺稀少,有枯枝 8 个,生长良好,无结实
发育阶段	5.0	4.4	85	90~95	20~50	30.17	28.40	白刺多株生长,分枝稠密,沙堆形状较高(85 cm),生长较好,迎风坡枯枝 10 个,结实量大;背风坡植被生长较差,枯枝 30 个,结实少,植被盖度最高
稳定阶段	9.4	6.4	180	80~92	25~35	35.00	23.80	白刺多株生长,侧枝稠密,迎风坡和背风坡无枯枝,沙堆外部形态呈半球球体,有结皮,沙堆高度、体积和盖度等处于稳定状态,植株长势较好,结实量多,植被盖度相对较高
衰退阶段	1050	710	150	50~55	18~20	42.50	37.17	白刺多株生长,侧枝稀疏,沙堆外部形态无规则,结皮较厚、坚固。活化严重,迎风坡枯枝较多 65 个,背风坡枯枝次之 45 个,结实较少。植被盖度较低

1.2.2 土壤温度测定方法 采用 WT-1 针式测温仪和气象专用地面 0 cm 温度计(将温度计水平放在土壤表层水银头接触地面来观测),对固定的白刺灌丛沙堆进行土壤日动态测定。沿西北主风方向依次在白刺灌丛沙堆迎风坡底、迎风坡中、堆顶、背风坡中、背风坡底,共 5 个位点设置观测点,分别观测 0、5、10、15 cm 深度的土壤温度。因数据量较大,本研究根据靳虎甲等^[14]的研究方法取 10 cm 处温度数据做分析。2017—2019 年 7 月中下旬,选择晴朗、无大风的典型天气进行日动态观测。测定时间为 8:00—20:00,每次各选 10 个观测日,为了减小因受环境因素等造成的温度误差,测定时间尽量控制在 2 h 内完成,每次观测 3 次重复。

1.2.3 土壤样品分析 采用烘干法测定土壤含水率,以 0~5、5~10、10~20、20~40、40~60 cm 5 个土层深度分别用 1.5 m(AMS 一体式常规)土钻进行取样,取样后放入土壤盒称重,每个深度重复取样 3 次,然后在 110℃的恒温箱内烘至恒重,取平均值

为各土层绝对含水率,3 次平均值用 Excel 软件中的 STDEV 算出误差值,在图上标记出正负偏差棒。

电导率采用电导率仪(METTLER-TOLEDO S230-K,瑞士);pH 采用 pH 计(Sartorius PB-10 德国),水土比 5:1(g:mL);土壤全氮采用凯氏法(Peiou SKD-200 定氮仪);土壤速效磷测定采用钼锑抗比色法(S756P-紫外分光光度计,日本);土壤有机质采用外加热法。

1.2.4 数据分析 以 Excel 软件进行数据整理计算,并绘制各个动态图。采用 SPSS 21.0 数据处理软件进行统计分析,为检验不同变化阶段各统计指标的差异性,采用 Duncan(D)检验法对均值差异显著性进行检验(差异显著 $P<0.05$ 、差异无显著 $P>0.05$ 、差异极显著 $P<0.01$)。

2 结果与分析

2.1 白刺灌丛沙堆不同变化阶段土壤温度日动态 白刺灌丛沙堆不同变化阶段土壤温度日动态见

图 1,本研究以 10 cm 地温为研究对象,对白刺灌丛沙堆不同坡向各个时间段的地温日变化进行系统的分析,沙丘不同部位 10 cm 处的土壤温度,沙丘表面温度最低,但各测点值基本相近,9:00—12:00 以后地表温度逐渐升高,12:00—14:00 时地表温度基本稳定,14:00—16:00 温度达到峰值,白刺灌丛沙堆在发育阶段和稳定阶段 10 cm 处土壤温度最高,因白刺多株生长,分枝稠密,植被盖度较大地下保温性强。雏形阶段和衰退阶段 10 cm 处温度低于稳定阶段和发育阶段,因背风坡白刺稀少,且单株生长或沙

堆活化植株衰化,分枝稀疏、枯枝较多等使得植被盖度较低,保温性较差。16:00—19:00 又趋于稳定,19:00—20:00 呈现逐渐下降趋势。所以植物在不同变化阶段因植被盖度的不同,温度变化也不同,相同物种在不同生境中有不同的生长势和竞争力。随着全球气候变暖民勤沙区土壤温度较高、昼夜温差变化较大,使得土壤温度的日动态变化很不稳定。土壤温度的日变化规律为雏形阶段>发育阶段>稳定阶段>衰退阶段。

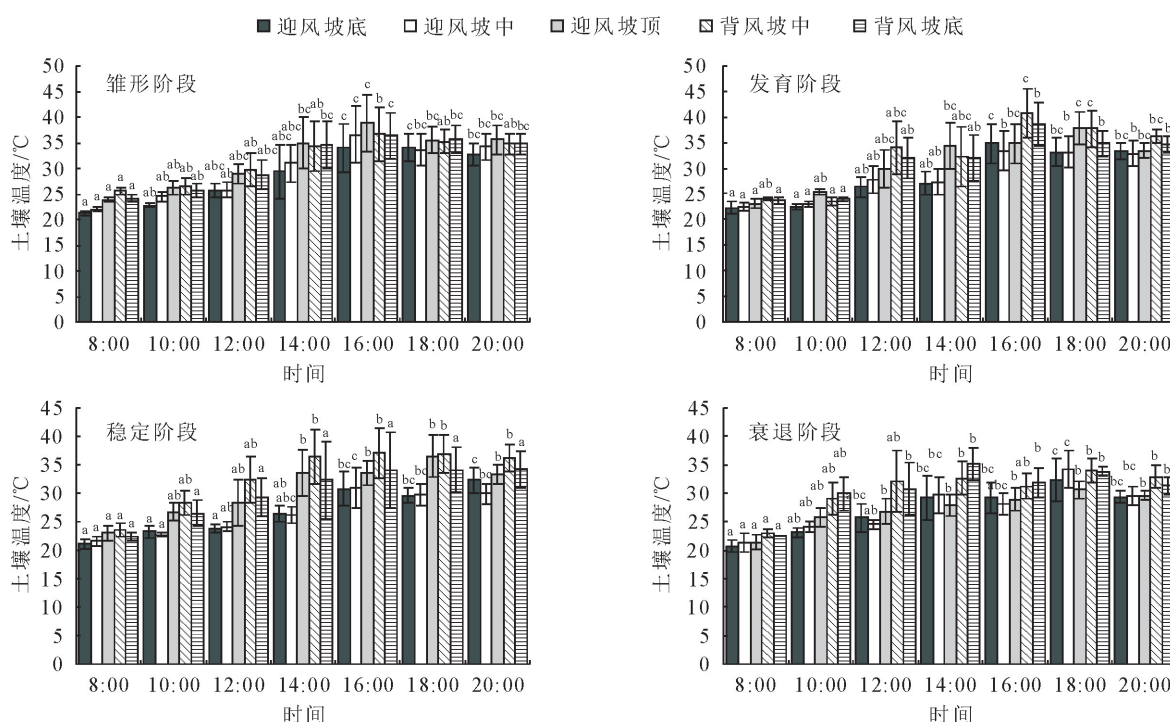


图 1 白刺灌丛沙堆不同变化阶段 10 cm 土壤温度日变化

Fig. 1 Diurnal variation of soil temperature of 10 cm at different developmental stages of *N. tangutorum* shrub growing pile

2.2 白刺灌丛沙堆不同变化阶段土壤水分变化

夏季白刺灌丛沙堆不同变化阶段土壤水分见图 2。雏形阶段土壤平均含水率迎风坡底最高,其次为背风坡底、背风坡中、迎风坡中、迎风坡顶最低。随着土层深度的增加,土层 40~60 cm 最高,平均为 4.31%;10~30 cm 居中,平均为 1.16%;表层 0~5 cm 最低,为 0.79%。发育阶段土壤平均含水率背风坡底最高,其次为迎风坡底、背风坡中、迎风坡中、迎风坡顶最低,土层 40~60 cm 最高,平均为 7.34%;10~30 cm 居中,平均为 2.10%;表层 0~5 cm 最低,为 1.47%。稳定阶段土壤平均含水率背风坡底最高,其次为背风坡中、迎风坡底、迎风坡顶、迎风坡中最低,土层 40~60 cm 最高,平均为 5.03%;10~30 cm 居中,平均为 1.28%;表层 0~5 cm 最低,为 1.08%。衰退阶段土壤平均含水率迎风坡底最高,其次为背风坡底、迎风坡中、迎风坡顶、

背风坡中最低,土层 40~60 cm 最高,平均为 6.94%;10~30 cm 居中,平均为 2.65%;表层 0~5 cm 最低,平均为 0.94%,随着土层深度的不断增加水分含量呈现逐渐升高的趋势。土壤水分各个阶段的差异明显,总趋势为发育阶段>衰退阶段>稳定阶段>雏形阶段。

2.3 白刺灌丛沙堆不同演替阶段 pH 及电导率

对不同变化阶段的土壤化学性质研究表明见图 3,稳定阶段灌丛沙堆的 pH 最大为 8.6,发育阶段的 pH 最小为 7.7,白刺灌丛沙堆衰退后,pH 出现了一定程度的增加。因衰退阶段沙包的土层结皮较厚,相应的 pH 也增高,但不同变化阶段灌丛沙堆的 pH 变化差异不大,不同坡向的 pH 迎风坡底最大,背风坡中最低,均表现为迎风坡大于背风坡。衰退阶段土壤电导率最低,稳定阶段与雏形阶段电导率居中,发育阶段土壤电导率最高,并高于其他 3 个阶

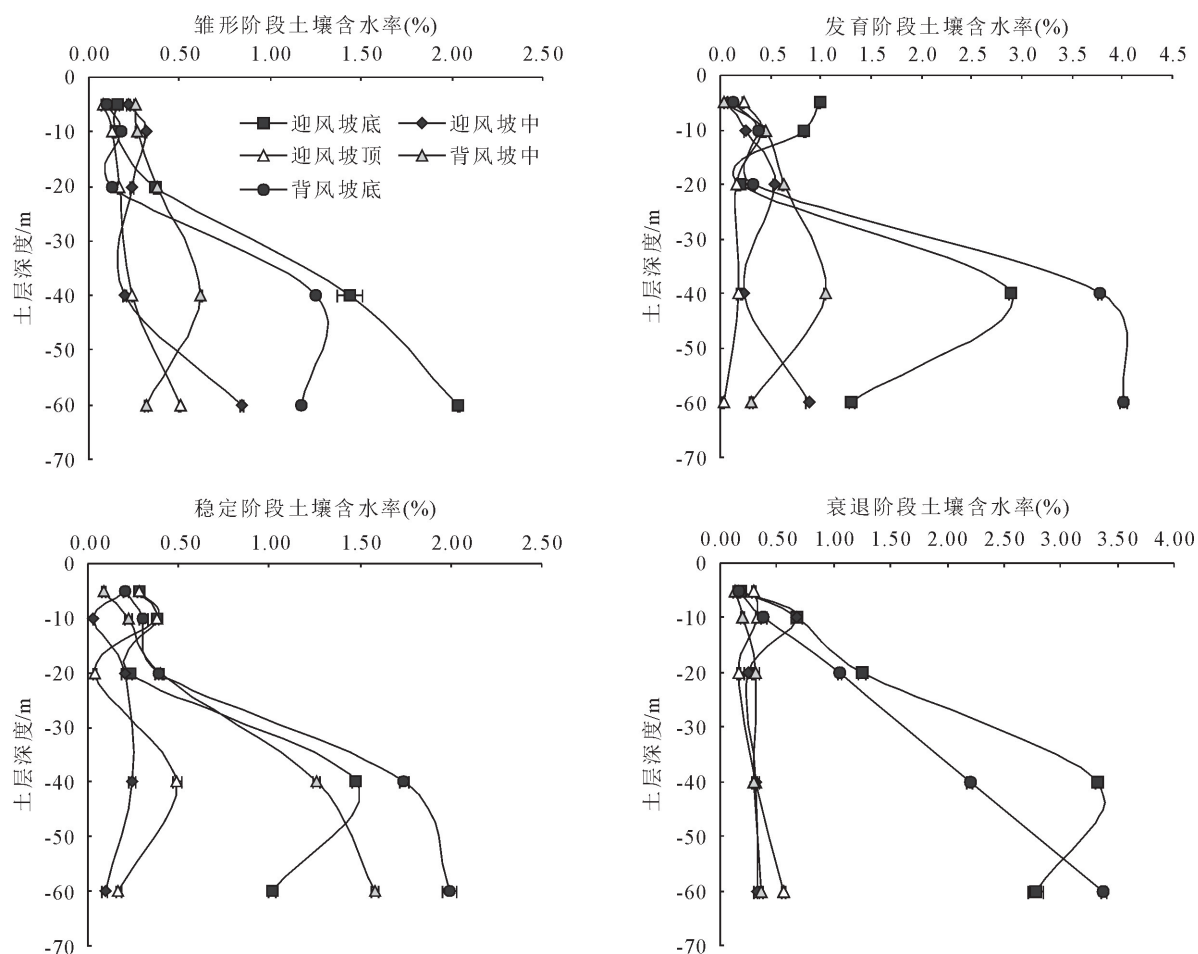


图2 白刺灌丛沙堆不同变化阶段土壤含水率垂直变化趋势

Fig. 2 Vertical variation trend of soil moisture content at different developmental stages of *N. tangutorum* shrub growing pile

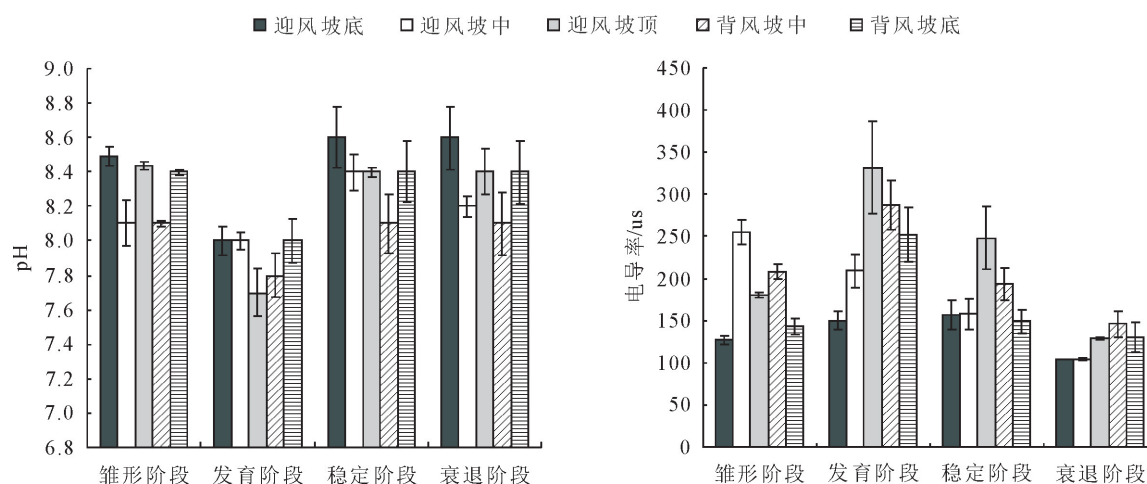


图3 白刺灌丛沙堆不同变化阶段土壤 pH 和电导率变化

Fig. 3 Changes of soil pH and electrical conductivity at different developmental stages of *N. tangutorum* shrub growing pile

段,且差异比较明显。沙堆衰退后,土壤电导率又迅速下降,可能与土层结皮厚热传导较慢有关,其电导率与雏形、发育以及稳定阶段相比比较明显,从不同坡向来看,不同演替阶段的背风坡大于迎风坡,并且差异明显。

2.4 白刺灌丛沙堆不同变化阶段土壤养分变化

白刺灌丛沙堆不同变化阶段土壤养分变化见表

2。雏形阶段迎风坡与背风坡相同深度土壤 TN 含量 0~5 cm 差异不显著 ($P>0.05$), 5~10、10~20 cm 差异显著 ($P<0.05$), 10~20 cm 差异极显著 ($P<0.01$)。土壤有机质含量 0~5、5~10 cm 差异极显著 ($P<0.01$), 其余各层差异不显著 ($P>0.05$)。土壤速效 P 含量 20~40 cm 差异显著 ($P<0.05$), 其余各层差异不显著 ($P>0.05$)。发育阶段

迎风坡与背风坡相同深度土壤全氮各层之间差异不显著($P>0.05$),土壤有机质含量 0~5 cm 差异显著($P<0.05$),5~10、10~20 cm 差异极显著($P<0.01$),20~40 cm 差异不显著($P>0.05$),土壤速效 P 含量 5~10 cm 差异显著($P<0.05$),其余各层差异不显著($P>0.05$)。稳定阶段迎风坡与背风坡相同深度土壤 TN 含量各层之间差异不显著($P>0.05$),土壤有机质含量 0~5 cm 差异显著($P<$

0.05),其余各层差异不显著($P>0.05$),土壤速效 P 含量 0~5 cm 差异极显著($P<0.01$),其余各层差异不显著($P>0.05$)。衰退阶段迎风坡与背风坡相同深度土壤 TN 含量 10~20 cm 差异不显著($P>0.05$),其余各层差异显著($P<0.05$),土壤有机质含量各层之间差异不显著($P>0.05$),土壤速效 P 含量 0~5、10~20 cm 差异显著($P<0.05$),其余各层差异不显著($P>0.05$)。

表 2 白刺灌丛沙堆不同变化阶段土壤养分

Table 2 Soil nutrients at different developmental stages of *N. tangutorum* shrub growing pile

不同阶段	坡位	深度/cm	TN(%)	有机质(%)	每 100 g 速效磷的含量/mg
雏形阶段	迎风坡	0~5	0.009±0.002Aa	0.131±0.006Aa	0.780±0.107Aa
		5~10	0.009±0.002Aa	0.160±0.002Aa	0.841±0.077Aa
		10~20	0.008±0.002Aa	0.220±0.019Ab	0.872±0.085Aa
		20~40	0.015±0.001Ab	0.207±0.017Ab	0.949±0.027Aa
	背风坡	0~5	0.003±0.001Aa	0.352±0.059Ba	0.764±0.027Aa
		5~10	0.002±0.001Ba	0.328±0.034Ba	0.795±0.041Aa
		10~20	0.002±0.001Ba	0.193±0.006Ab	0.657±0.041Aa
		20~40	0.004±0.001Ba	0.257±0.029Ab	0.718±0.070Ba
发育阶段	迎风坡	0~5	0.000±0.002Aa	0.153±0.012Aa	1.179±0.027Aa
		5~10	0.006±0.001Aab	0.244±0.016Ab	1.102±0.031Aa
		10~20	0.017±0.007Ab	0.135±0.006Aa	1.118±0.015Aa
		20~40	0.010±0.002Aab	0.160±0.006Aa	1.379±0.154Aa
	背风坡	0~5	0.017±0.006Aa	0.250±0.032Ba	0.964±0.126Aa
		5~10	0.013±0.005Aa	0.404±0.029Bb	0.887±0.067Ba
		10~20	0.012±0.003Aa	0.324±0.032Bb	1.071±0.015Aa
		20~40	0.009±0.003Aa	0.208±0.043Aa	0.995±0.027Aa
稳定阶段	迎风坡	0~5	0.006±0.003Aa	0.189±0.019Aa	1.146±0.107Aa
		5~10	0.006±0.002Aa	0.199±0.014Aa	0.709±0.136Ab
		10~20	0.011±0.002Aa	0.201±0.022Aa	0.485±0.058Abc
		20~40	0.000±0.005Aa	0.189±0.019Aa	0.395±0.022Ac
	背风坡	0~5	0.008±0.002Aa	0.276±0.016Ba	0.429±0.049Ba
		5~10	0.006±0.002Aa	0.188±0.001Ab	0.507±0.146Aa
		10~20	0.008±0.003Aa	0.127±0.014Ac	0.462±0.092Aa
		20~40	0.006±0.002Aa	0.175±0.006Ab	0.462±0.049Aa
衰退阶段	迎风坡	0~5	0.011±0.001Aa	0.242±0.006Aa	1.046±0.092Aa
		5~10	0.017±0.002Aa	0.307±0.050Aa	0.844±0.068Ab
		10~20	0.014±0.003Aa	0.305±0.023Aa	0.720±0.039Ab
		20~40	0.011±0.001Aa	0.239±0.013Aa	0.451±0.019Ac
	背风坡	0~5	0.006±0.001Ba	0.209±0.012Aa	0.630±0.040Bb
		5~10	0.005±0.002Ba	0.183±0.038Aa	0.821±0.051Aa
		10~20	0.007±0.001Aa	0.245±0.016Aa	0.574±0.011Bb
		20~40	0.004±0.002Ba	0.200±0.012Aa	0.406±0.049Ac

注:同列不同字母表示相同深度不同坡位处理间差异显著($P<0.05$),差异极显著($P<0.01$)。

3 讨论

植物的生活周期由多个生长发育阶段组成,同时,完成生长发育阶段需要一定的温度累积。对土壤温度影响较大是植被盖度、生物量、立枯物与枯落物量等,盖度越高土壤地表温度越低。7—8 月沙面吸热较快,一旦地表沙子与环境温度一致,将不再发

生热传导现象。随着土壤深度的增加,地下土壤水分含量较高,当地下土壤温度与环境温度相同时,地下土壤湿度高吸收的热量要比土壤表面沙子多。所以地下温度高于地上温度,这与沙堆热容量和热传导特征有关(在沙粒组成和密度一致的情况下,与湿度也有关)。根据民勤沙区多年气象观测资料得知,气温在 14:00—15:00 是一天当中温度高峰值^[20],

所以白刺灌丛沙堆土壤温度的日变化动态在14:00—15:00也相应较高。从沙堆的不同坡向来看地表温度迎风坡大于背风坡,随着土壤深度的不断增加,当土壤温度在10 cm时发生逆转背风坡大于迎风坡,这或许是由于日照方向或日照时数长短所引起的变化^[20]。在夏季地温变化比较明显,冬季地温变化不明显,增温也较为缓慢,这说明土壤温度有效性的改变,从而影响土壤温度与植物发育阶段的强弱,甚至也会发生逆转。

土壤水分是干旱荒漠地区众多生态过程的主要驱动因子之一。该地降水量少,蒸发量大,形成重力水下渗的数量有限^[21-25],主要在湿度与植被影响下的土壤水分下渗与吸收有关,土壤表层水分含量变化与天然降水息息相关,其变化也较大。本研究区白刺灌丛沙堆水分含量随着土层深度的不断增加呈现逐渐升高的趋势(土层以40~60 cm最高、0~5 cm最低),适当地破坏一些灌丛沙堆表面结皮能增加土壤水分下渗,使得白刺灌丛能及时利用天然降水来维持生机。

土壤养分是气候、植被、地形、地貌、水文及土壤因素等自然条件的综合反映^[26-27]。土壤养分含量是反映土壤质量或土壤健康状况的一个重要指标,土壤养分状况往往制约着生态系统的演化过程和对环境变化的响应。白刺灌丛沙堆是深根系的灌木植物,再加之发达的水平根系,在深层土壤中养分消耗较大,在表层土壤中养分消耗较小。研究结果认为,白刺灌丛沙堆土壤TN、有机质和速效磷在发育阶段表层养分含量最高,且显著高于其他3个发育阶段,因土壤表层有多年的枯枝落叶回馈,经微生物分解后使土壤表层有机质含量提高,再加上根际微生物的作用,使得土壤表层TN、有机质与速效磷含量大幅度提高,从而给土壤补充了N,增加了有机碳含量,因此土壤TN含量随着有机质的增加而增加,具有明显的表聚效应。这与赵栋等^[28]对灌丛土壤理化性质研究结果相似,但与杜建会等^[9]对民勤白刺灌丛沙堆表面土壤理化性质研究结果不同。这或许是由于各研究区域白刺灌丛的人为干预和研究尺度的差异引起的结果。

4 结论

白刺灌丛沙堆土壤温度在14:00—15:00最高,随着时间推移,地表温度迎风坡大于背风坡。不同变化阶段土壤水分含量差异明显,白刺灌丛沙堆土壤水分含量随土层深度增加呈现逐渐升高的趋势。土壤pH 7.7~8.7,在稳定阶段pH最大,发育阶段最小。发育阶段土壤电导率最高,并高于其他3个

阶段,衰退阶段土壤电导率最低。土壤养分表层含量最高,相同土层深度锥形阶段、发育阶段、稳定阶段和衰退阶段背风坡大于迎风坡,在相同土层中土壤TN(锥形阶段)、土壤有机质(发育阶段)、土壤速效磷(稳定阶段)差异极显著($P < 0.01$),含量具有明显的表聚效应。

参考文献:

- [1] 席军强,杨自辉,郭树江,等.不同类型白刺沙丘土壤理化性状与微生物相关性研究[J]. 草业学报,2015,24(6):64-74.
XI J Q, YANG Z H, GUO S J, *et al.* The correlation between soil physical and chemical properties and soil microbes in different types of *Nitraria* dune[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(6): 64-74. (in Chinese)
- [2] 刘建泉. 甘肃民勤西沙窝唐古特白刺群落的生态特性[J]. 植物资源与环境学报,2002,11(3):36-40.
LIU J Q. Ecological characteristics of *Nitraria tangutorum* community in Xishawo, Minqin, Gansu Province[J]. Journal of Plant Resources and environment, 2002, 11(3): 36-40. (in Chinese)
- [3] 赵长明,魏小平. 民勤绿洲荒漠过渡带植物白刺和梭梭光合特性[J]. 生态学报,2005,25(8):1908-1923.
ZHAO C M, WEI X P. Photosynthetic characteristics of *Nitraria tangutorum* and *Haloxylon ammodendron* in Minqin oasis-desert ecotone[J]. Journal of Ecology, 2005, 25(8): 1908-1923. (in Chinese)
- [4] 张锦春,赵明,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[J]. 西北植物学报,2005,25(1):70-76.
ZHANG J C, ZHAO M, ZHANG Y C, *et al.* Photosynthetic and transpiration characteristics and influencing factors of *Haloxylon ammodendron* and *Nitraria tangutorum* under irrigation[J]. Journal of Northwest Botany, 2005, 25(1): 70-76. (in Chinese)
- [5] 任珺. 甘肃省白刺属植物的数量分类研究[J]. 西北植物学报,2003,23(4):572-576.
REN J. Numerical taxonomy of *Nitraria* in Gansu Province[J]. Journal of Northwest Botany, 2003, 23(4): 572-576. (in Chinese)
- [6] WANG X M, XIAO H L, LI J C, *et al.* N ebkh a d evelopm ent and its relationship to environm ental change in the Alaxa Plateau, China[J]. Environment Geology, 2008, 56: 359-365.
- [7] WANG X, WANG L, DONG Z, *et al.* N ebkha developm ent and its sign if icance to w ind erosion and land degradation in sem i-arid northem China[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 65: 129-141.
- [8] El-B ana M I, N ijs I, Khedr A A. The im por tance of phyto-genic m ounds (N ebkhas) for restoration of arid degraded rangelands in nor t h ern Sinai[J]. R estoration Ecology, 2003, 11(3): 317-324.
- [9] 杜建会,严平,丁连刚,等. 民勤绿洲不同演化阶段白刺灌丛沙堆表面土壤理化性质研究[J]. 中国沙漠,2009,29(2):248-253.
DU J H, YAN P, DING L G, *et al.* Study on soil physical and

- chemical properties of *Nitraria tangutorum* in different evolution stages in Minqin Oasis[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(2): 248-253. (in Chinese)
- [10] 张远东, 潘晓玲, 顾峰雪, 等. 阜康荒漠植被灌木与半灌木种群生态位的研究[J]. 植物生态学报, 2001, 25(6): 741-745.
ZHANG Y B, PAN X L, GU F X, *et al.* Study on niche of SHRUB and subshrub populations in desert vegetation of Fukang[J]. Plant Ecology, 2001, 25(6): 741-745. (in Chinese)
- [11] 岳必玲, 哈斯, 庄严美, 等. 沙质原灌从沙堆研究综述[J]. 中国沙漠, 2005, 16(4): 360-363.
YUE B L, HA S, ZHUANG Y M, *et al.* A review of the study on the primary sand-filling from the sand-pile[J]. Journal of Desert Research, 2005, 16(4): 360-363. (in Chinese)
- [12] Tengberg A. Nebkha dunes as indicators of wind erosion and land degradation in the Sahel zone of Burkina Faso[J]. Journal of Arid Environments, 1995, 30: 265-282.
- [13] 韩福贵, 满多清, 郑庆钟, 等. 青土湖典型湿地白刺灌丛沙堆群落物种多样性及土壤养分变化特征研究[J]. 草业学报, 2021, 30(1): 36-45.
HAN F G, MAN D Q, ZHENG Q Z, *et al.* Species diversity and soil nutrient changes of a *Nitraria tangutorum* shrub community in Qingtu Lake wetland[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(1): 36-45. (in Chinese)
- [14] 靳虎甲, 马全林, 张有佳, 等. 石羊河下游白刺灌丛演替发育过程的土壤呼吸及其影响因素分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(1): 140-147.
JIN H J, MA Q L, ZHANG Y J, *et al.* Soil respiration of *Nitraria tangutorum* nebkhas at different evolution stages in lower reaches of Shiyang river and its influencing factors[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(1): 140-147. (in Chinese)
- [15] 孙涛, 韩福贵, 安富博, 等. 民勤绿洲过渡带白刺沙堆土壤呼吸空间异质特性[J]. 草业科学, 2017, 34(4): 673-684.
SUN T, HAN F G, AN F B, *et al.* Spatial heterogeneity of soil respiration of *Nitraria tangutorum* nebkhas in the desert-oasis ecotone of Minqin[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(4): 673-684. (in Chinese)
- [16] 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[J]. 生态学杂志, 2007, 26(8): 1165-1170.
- [17] 韩福贵, 孙涛, 郭树江, 等. 干旱荒漠区不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤呼吸特征及其影响因素分析[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(5): 1-7.
HAN F G, SUN T, GUO S J, *et al.* Characteristics of soil respiration of *Nitraria tangutorum* at different succession stages in desert areas & the influencing factors[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(5): 1-7. (in Chinese)
- [18] 常兆丰, 赵明. 民勤荒漠生态研究[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2006.
- [19] DU J H, YAN P, E RUSSIA I C. Distribution patterns and characteristics of *Nitraria tangutorum* nebkha at its different evolution stages in the Minqin County of Gansu Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(8): 1165-1170.
- [20] 韩福贵, 韩生慧, 常兆丰, 等. 民勤沙区 46 a 主要气候特征及其变化趋势研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(11): 45-49.
HAN F G, HAN S H, CHANG Z F, *et al.* Study on the main climatic characteristics and its changing trend of 46 years in Minqin Sandy area[J]. Resources and environment in arid area, 2008, 22(11): 45-49. (in Chinese)
- [21] 赵从举, 雷加强, 王雪芹, 等. 古尔班通古特沙漠腹地春季土壤水分空间分异研究[J]. 干旱区地理, 2003, 26(2): 154-158.
ZHAO C J, LEI J Q, WANG X Q, *et al.* The spatial distribution of the spring soil moisture in the Hinter Land of Gurbantonggut desert[J]. Arid geography, 2003, 26(2): 154-158. (in Chinese)
- [22] 张国盛. 干旱、半干旱地区乔灌木树种耐旱性及林地水分动态研究进展[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 364-370.
ZHANG G S. Advances in research on drought tolerance of tree and shrub species and water dynamics of forest land in arid and semi-arid regions[J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(4): 364-370. (in Chinese)
- [23] 刘忠玲, 刘建明, 胡伟, 等. 不同密度胡桃楸次生林枯落物和土壤持水特性的研究[J]. 森林工程, 2021, 37(3): 52-59, 66.
LIU Z L, LIU J M, HU W, *et al.* Water-holding characteristics of litter and soil of *Juglans mandshurica* natural secondary forest with different densities[J]. Forest Engineering, 2021, 37(3): 52-59, 66. (in Chinese)
- [24] 李新荣, 马风云, 龙立群, 等. 沙坡头地区固沙植被土壤水分动态研究[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3): 217-222.
LI X R, MA F Y, LONG L Q, *et al.* Study on soil moisture dynamics of sand-fixing vegetation in Shapotou area[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(3): 217-222. (in Chinese)
- [25] 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[J]. 应用生态学报, 2000, 11(6): 923-926.
YANG Z H, GAO Z H. Effects of precipitation and groundwater on growth and decline of *Nitraria tangutorum* community at the edge of Desert Oasis[J]. Journal of Applied Ecology, 2000, 11(6): 923-926. (in Chinese)
- [26] 王晶, 吕照智, 钱翌, 等. 新疆准噶尔盆地典型荒漠区不同景观植被对土壤养分的影响[J]. 中国沙漠, 2010, 30(6): 1367-1373.
WANG J, LÜ Z Z, QIAN Y, *et al.* Soil nutrients under vegetation cover of different desert landscapes in Junggar Basin, Xinjiang[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(6): 1367-1373. (in Chinese)
- [27] 毛靓, 贾京默. 黑龙江县域农林用地景观格局变化特征[J]. 森林工程, 2022, 38(2): 44-53.
MAO L, JIA J M. Study on the change characteristics of landscape pattern of agricultural and forestry land at County area in Heilongjiang[J]. Forest Engineering, 2022, 38(2): 44-53. (in Chinese)
- [28] 赵栋, 屠彩芸, 李丹春. 封育年限对于干旱河谷灌丛土壤理化性质的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 39-44, 49.
ZHAO D, TU C Y, LI D C, *et al.* Effects of fencing time on soil physicochemical properties of *sophoraviciifolia* in semi-arid valley[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 39-44, 49. (in Chinese)