

黑河中游荒漠绿洲过渡带固沙植被土壤水分的分布特征

陈宏祥,胡广录*,赵晨宇,张宏伟,王德金

(兰州交通大学 环境与市政工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:土壤水分是干旱区固沙植被生长发育的主要限制因子,了解其时空分布特征对荒漠绿洲过渡带植被建设具有重要意义。于 2015 年雨季前、雨季后对甘肃临泽县荒漠-绿洲过渡带的泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、梭梭(*Haloxyylon ammodendron*) 3 种典型固沙植被 0~120 cm 深度剖面的土壤水分分布特征进行研究,结果表明,1)雨季前和雨季后,泡泡刺、沙拐枣和梭梭灌丛土壤含水量随土层深度的增加基本呈上升趋势,土壤含水量均是表层低、深层高,雨季对泡泡刺、沙拐枣和梭梭灌丛土壤水分的影响主要集中在水分活跃层;2)雨季前,3 种灌丛在不同水平距离处(0、1、2 m 与 5 m)土壤含水量的大小规律是泡刺灌丛>沙拐枣灌丛>梭梭灌丛;雨季后,3 种灌丛在不同水平距离处土壤含水量无明显规律;3)雨季前和雨季后,泡泡刺灌丛和沙拐枣灌丛土壤含水量空间特征表现为灌丛边缘大于灌丛内部,梭梭灌丛表现为灌丛内部大于灌丛边缘。

关键词:荒漠—绿洲过渡带;固沙植被;土壤水分;时空分布

中图分类号:S718.45 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)06-0067-07

Distribution Characteristics of Soil Moisture of Sand-fixing Vegetation in Desert-oasis Ecotone in the Middle Reaches of the Heihe River

CHEN Hong-xiang, HU Guang-lu*, ZHAO Chen-yu, ZHANG Hong-wei, WANG De-jin

(School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Soil moisture is the main limiting element for vegetation growth and development in arid area. Understanding the time-space distribution of soil moisture is important to the construction of vegetation. Before and after the rainy season in 2015, we examined the soil moisture distribution characters of the 0—120 cm profile of *Nitraria sphaerocarpa*, *Calligonum mongolicum* and *Haloxyylon ammodendron* shrubs that were three typical plants for sand fixation in desert-oasis ecotone of Linze County, Gansu Province. The results showed that 1) before and after the rainy season, the general trends of the soil water content of three shrubs were on the rise with the increase of soil depth. The soil water contents of three shrubs all low in the surface and high in deep soil. Soil moisture was influenced by rainy season at water active layer. 2) Before the rainy season, the rule of the soil moisture content of three shrubs in different horizontal distances (0, 1, 2, and 5 m) was in the order of *N. sphaerocarpa*>*C. mongolicum*>*H. ammodendron* shrubs. After the rainy season, the soil moisture content of three shrub species in different horizontal distances had no obvious regularity. 3) Before the rainy season, the spatial pattern of soil moisture of *N. sphaerocarpa* and *C. mongolicum* was soil moisture in the margin of the shrub>inside the shrub, while the spatial pattern of *H. ammodendron* was inside the shrub>margin of the shrub.

Key words: desert-oasis ecotone; sand-fixing vegetation; soil moisture; temporal and spatial distribution

收稿日期:2017-03-30 修回日期:2017-05-27

基金项目:国家自然科学基金(41161082,41561102)。

作者简介:陈宏祥,女,在读硕士,研究方向:环境生态。E-mail:18919035475@163.com

* 通信作者:胡广录,男,博士,教授,研究方向:生态水文及生态修复。E-mail:hgl0814@163.com

荒漠绿洲过渡带是指荒漠生态系统和绿洲生态系统之间的生态交错带,是荒漠化进程与绿洲化进程对立与斗争的最敏感部位,对维持绿洲稳定具有重要作用,其特征是植物种类少、群落结构简单、盖度整体不高、生态环境脆弱^[1-3]。黑河中游荒漠绿洲过渡带地处中国内陆西北干旱区,该区域降水稀少且季节性分配不均匀,蒸发量大,水资源严重短缺^[4]。20 世纪 70 年代以来,为了维护绿洲农业安全,防治风沙的侵袭,在河西走廊中段绿洲边缘人们陆续种植了大量人工植被,形成固沙植被区^[5]。过渡带土壤湿度和植被之间的相互关系是了解荒漠绿洲过渡带的重要科学问题^[6],而土壤水分作为土壤的重要组成部分,对于干旱区固沙植被的生长发育起主要的限制作用,因此,了解土壤水分的动态变化特征对沙区固沙植被的建设具有重要意义。近年来,荒漠—绿洲过渡带土壤水分的研究主要集中在不同植被盖度下土壤水分的动态变化^[7]、不同类型沙丘土壤水分的分布特征^[8-9]以及沙丘不同部位土壤水分的变化特征^[10-11],同时土壤水分的空间变异性也获得了极大关注^[12-14]。但对于荒漠绿洲过渡带雨季前和雨季後多种植被类型土壤水分分布特征的研究相对较少。比较不同植被类型下土壤水分时间、空间尺度上的分布规律,对于指导该区域生态保护和重建具有重要作用。本研究通过对荒漠绿洲过渡带固沙植被雨季前和雨季後土壤水分分布特征的研究,以为固沙植被的可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

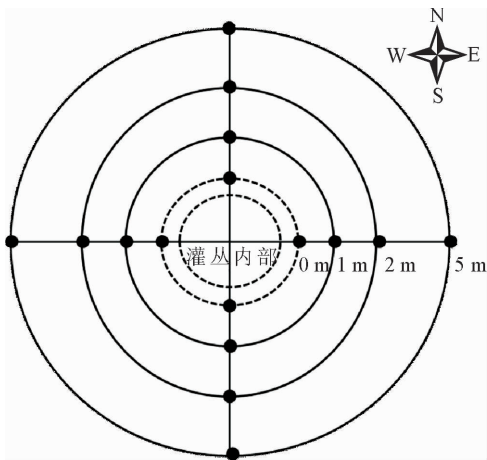
1.1 研究区概况

研究区位于河西走廊黑河中游的荒漠绿洲过渡带(39° 21′ 53. 069″ — 39° 22′ 01. 252″ N, 100° 09′ 12. 249″ — 100° 09′ 14. 615″ E),该区属于典型温带大陆性荒漠气候,多年平均降水量 117 mm,降水多集中在 6—9 月,约占全年降水量的 70%~80%,年平均蒸发量 2 390 mm 以上,空气相对湿度可达 46%;年均气温 7. 8℃,最低气温 - 27. 2℃,最高气温 39. 3℃。研究区地带性土壤为灰棕漠土,由于长期受风沙侵袭影响,绿洲边缘土壤多发育为风沙土。研究区域内以半固定沙丘为主,植被群落结构简单物种稀少,以灌木、半灌木群落为主,除了短期生和 1 年生的植物外,几乎全为超旱生植物,具有典型荒漠植被的特征,代表性植物有泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)等。

1.2 研究方法

研究区内植被主要有泡泡刺、沙拐枣和梭梭 3

种植被,它们的相互混合分布共同构成了过渡带独特的斑块状植被格局。2015 年雨季前(4 月 5 日前)和雨季後(10 月 25 日後)在斑块状植被区不同地理位置上分别选取 5 个典型的单一泡泡刺灌丛,沙拐枣灌丛,梭梭灌丛,泡泡刺、沙拐枣和梭梭灌丛的平均冠幅分别为 5. 07 m×3. 50 m、2. 71 m×2. 60 m 和 2. 2 m×1. 7 m。在东、南、西、北 4 个方向上,距离泡泡刺、沙拐枣、梭梭灌丛 0、1、2 m 与 5 m 处分别采集土样,采样点共 240 个(图 1),采样时间内无降雨。用土钻(Φ=5 cm)在每个样点分层采集 0~10 cm(含 10 cm)、10~20 cm(含 20 cm)、20~40 cm(含 40 cm)、40~60 cm(含 60 cm)、60~80 cm(含 80 cm)、80~100 cm(含 100 cm)及 100~120 cm(含 120 cm)土层的土样,随即将土样装入密封袋中带回实验室,测定各土层的土壤含水量。土壤含水量采用烘干法测定(称取约 100 g 土样装入土壤盒,在 105℃ 高温下连续烘干 12 h,达恒重後称量)。同层土样混合均匀後分装 3 个土壤盒,烘干後 3 盒土样含水量的平均值代表同一土层的土壤含水量。



注:虚线表示冠幅位置,实线表示采样线,实心圆表示点位置。

图 1 灌丛个体尺度土壤取样示意

Fig. 1 Schematic diagram of soil sampling design

1.3 数据处理方法

采用描述性统计分析、单因素方差分析、Duncan 多重比较($P<0.05$ 为差异显著)等方法对研究区域不同植被类型土壤水分的分布特征进行分析。平均数後不同字母表示两者间差异显著^[15]。数据的统计分析计算在软件 Excel 2007、Statistica7 内完成,制图在软件 Origin Pro8. 0 内完成。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型土壤含水量数据的描述性统计分析

雨季前,泡泡刺灌丛平均土壤含水量最小值为

2 m 处,最大值为 1 m 处,变异系数表现为 0 m>2 m>1 m>5 m;沙拐枣灌丛平均土壤含水量最小值为 5 m 处,最大值为 1 m 处,变异系数表现为 0 m>2 m>1 m>5 m;梭梭灌丛平均土壤含水量最小值为 1 m 处,最大值为 2 m 处,变异系数表现为 2 m>5 m>0 m>1 m。雨季后,泡泡刺灌丛平均土壤含

水量最小值为 0 m 处,最大值为 5 m 处,变异系数表现为 2 m>1 m>5 m>0 m;沙拐枣灌丛平均土壤含水量最小值为 0 m 处,最大值为 1 m 处,变异系数表现为 1 m>5 m>2 m>0 m;梭梭灌丛平均土壤含水量最小值为 0 m 处,最大值为 2 m 处,变异系数表现为 0 m>1 m>5 m>2 m(表 1)。

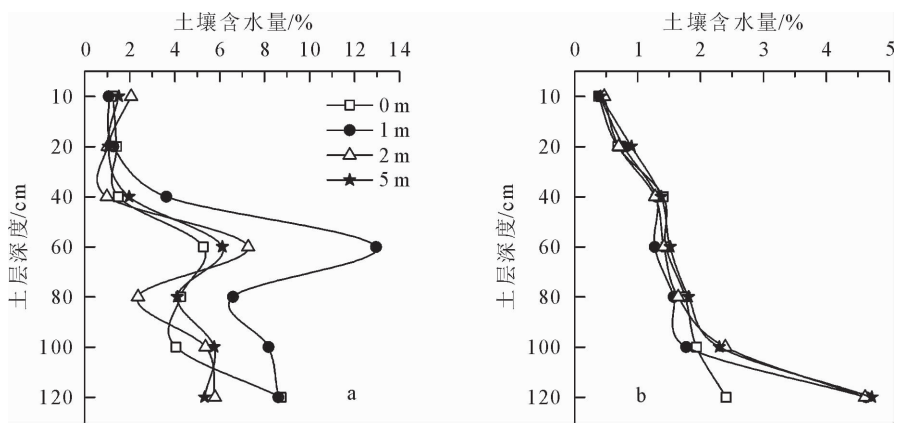
表 1 不同植被土壤含水量数据的描述性统计分析
Table 1 Descriptive statistics of soil water content at different plants

季节	植被类型	距离 /m	平均值 /%	最小值 /%	最大值 /%	标准差 /%	偏度	峰度	变异 系数
雨季前	泡泡刺(<i>Nitraria sphaerocarpa</i>)	0	3.75	0.11	25.10	5.59	2.55	6.56	1.49
		1	6.10	0.37	24.23	7.31	1.23	0.10	1.20
		2	3.56	0.32	22.72	5.28	2.14	3.58	1.48
		5	3.77	0.34	16.37	4.17	1.70	1.77	1.11
	沙拐枣(<i>Calligonum mongolicum</i>)	0	2.52	0.35	26.01	4.96	4.13	16.39	1.97
		1	3.55	0.36	23.69	5.61	2.63	6.08	1.58
		2	2.47	0.36	22.28	3.91	3.48	13.02	1.59
		5	2.32	0.23	14.65	3.15	2.60	6.09	1.36
	梭梭(<i>Haloxylon ammodendron</i>)	0	1.09	0.23	1.86	0.39	−0.28	−0.63	0.36
		1	0.93	0.30	1.70	0.33	0.20	−0.32	0.35
		2	1.13	0.30	5.08	0.74	3.09	13.62	0.65
		5	1.00	0.35	1.77	0.36	0.41	−0.78	0.37
雨季后	泡泡刺(<i>Nitraria sphaerocarpa</i>)	0	1.44	0.29	3.91	0.74	0.71	1.72	0.51
		1	1.67	0.27	8.53	1.61	3.17	10.64	0.96
		2	1.78	0.41	11.38	1.98	3.72	14.66	1.11
		5	1.87	0.32	9.10	1.67	2.93	9.76	0.90
	沙拐枣(<i>Calligonum mongolicum</i>)	0	1.20	0.21	2.23	0.50	0.20	−0.37	0.41
		1	1.57	0.31	5.49	1.25	2.30	4.68	0.79
		2	1.22	0.34	3.13	0.54	0.82	1.53	0.44
		5	1.42	0.46	5.63	0.83	2.85	11.63	0.58
	梭梭(<i>Haloxylon ammodendron</i>)	0	1.65	0.39	9.21	1.75	3.86	14.77	1.06
		1	1.49	0.29	7.93	1.38	3.44	13.29	0.93
		2	1.37	0.44	2.98	0.57	0.49	0.20	0.41
		5	1.56	0.35	8.23	1.43	3.42	12.49	0.92

2.2 不同植被类型土壤水分垂向分布特征

雨季前土壤含水量在距泡泡刺灌丛不同距离处,均随土层深度的增加呈增大—减小—增大的趋势,0~40 cm 深度范围内,土壤含水量在不同距离处的变化不显著,且土壤含水量较低;40~100 cm 深度范围内,土壤含水量波动剧烈,土壤含水量在不同距离处的变化显著,其中 40~60 cm 土层深度附近达到最大值,100 cm 以下波动幅度减小(图 2a),与刘冰^[16]等在临泽荒漠绿洲过渡带泡泡刺灌丛所得到的研究结果一致。雨季后土壤含水量在距泡泡刺灌丛不同距离处,均随土层深度的增加呈现逐渐增大的趋势,0~100 cm 增大的趋势近于一致,土壤含水量在不同距离处的变化不显著,100~120 cm 增加的幅度变大,其中 1~5 m 范围内随深度增加土壤含水量增加的幅度近于一致(图 2b)。

雨季前土壤含水量在距沙拐枣灌丛不同距离处,随土层深度的增加呈逐渐递增的趋势,0~100 cm 深度范围内,土壤含水量增加的幅度较为缓慢,土壤含水量在不同距离处的变化不显著,且土壤含水量较低;100~120 cm 深度范围内,土壤含水量增加的幅度变大,且随深度增加不同距离处的变化差异显著(图 3a)。雨季后土壤含水量在距沙拐枣灌丛不同距离处,随土层深度的增加基本上呈现出增大—减小—增大的趋势,0~20 cm 深度范围内,土壤含水量较低,且随深度增加不同距离处的变化的差异不显著;20~80 cm 深度范围内,土壤含水量波动剧烈,土壤含水量在不同距离处的变化差异显著;80~120 cm 深度范围土壤含水量随深度增加变化幅度减小,在不同距离处的变化差异不显著,土壤含水量相对稳定(图 3b)。



注:a 代表雨季前,b 代表雨季后,下同。

图 2 雨季前、雨季后泡泡刺灌丛土壤水分状况

Fig. 2 Soil moisture of *Nitraria sphaerocarpa* before and after the rainy season

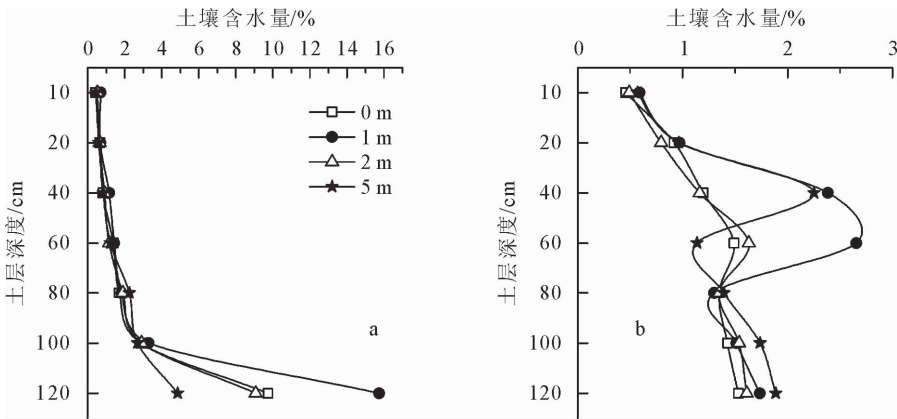


图 3 雨季前、雨季后沙拐枣灌丛土壤水分状况

Fig. 3 Soil moisture of *Calligonum mongolicum* before and after the rainy season

雨季前土壤含水量在距梭梭灌丛不同距离处,随土层深度的增加呈缓慢递增的趋势,不同距离处的变化趋势基本一致(图 4a)。雨季后土壤含水量在距梭梭灌丛不同距离处,随土层深度的增加呈现增大—减小的趋势,0~60 cm 深度范围内,土壤含水量增加的幅度较为缓慢,且在不同距离处的变化差异不显著;60~120 cm 深度范围内,土壤含水量波动剧烈,在不同距离处的变化差异显著(图 4b)。雨季后梭梭灌丛的土壤水分垂向分布规律与罗青红^[17]等在准噶尔盆地南缘人工梭梭林所得到的研究基本结果一致。

2.3 同一植被类型不同距离处土壤水分差异性比较

雨季前泡泡刺灌丛和梭梭灌丛在不同距离处的土壤含水量均存在显著差异,沙拐枣灌丛在不同距离处的土壤含水量不存在显著差异。雨季后,泡泡刺灌丛和沙拐枣灌丛在不同距离处的土壤含水量均存在显著差异,梭梭灌丛在不同距离处的土壤含水量不存在显著差异。对比雨季前后同一种植被在不

同距离处的土壤含水量大小,发现沙拐枣灌丛土壤含水量的最大值出现在 1 m 处,梭梭灌丛土壤含水量的最大值出现在 0 m 处,而泡泡刺灌丛土壤含水量没有明显的规律,不同距离处雨季前后差异较为显著(图 5)。

2.4 不同植被类型在同一距离处的土壤水分差异性比较

雨季前,在 0、1、2 m 和 5 m 距离处,泡泡刺、沙拐枣和梭梭灌丛的土壤含水量均存在显著性差异,土壤含水量的大小规律是:泡泡刺灌丛>沙拐枣灌丛>梭梭灌丛。雨季后,在 0、2 m 和 5 m 距离处,泡泡刺、沙拐枣和梭梭灌丛的土壤含水量均存在显著性差异,在 1 m 距离处,3 种灌丛植被的土壤含水量无显著性差异。在 1、2 m 和 5 m 距离处,泡泡刺、沙拐枣和梭梭灌丛土壤含水量的大小规律是:泡泡刺灌丛>梭梭灌丛>沙拐枣灌丛;在 0 m 距离处,泡泡刺、沙拐枣和梭梭灌丛土壤含水量的大小规律是:梭梭灌丛>泡泡刺灌丛>沙拐枣灌丛(图 6)。

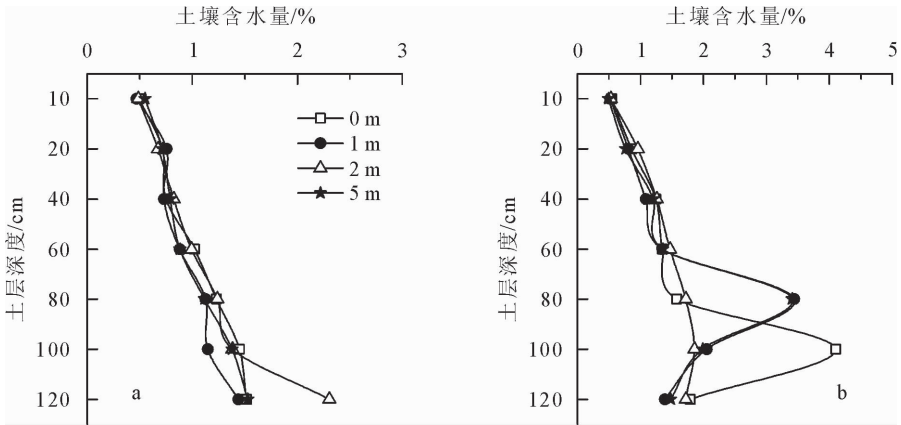
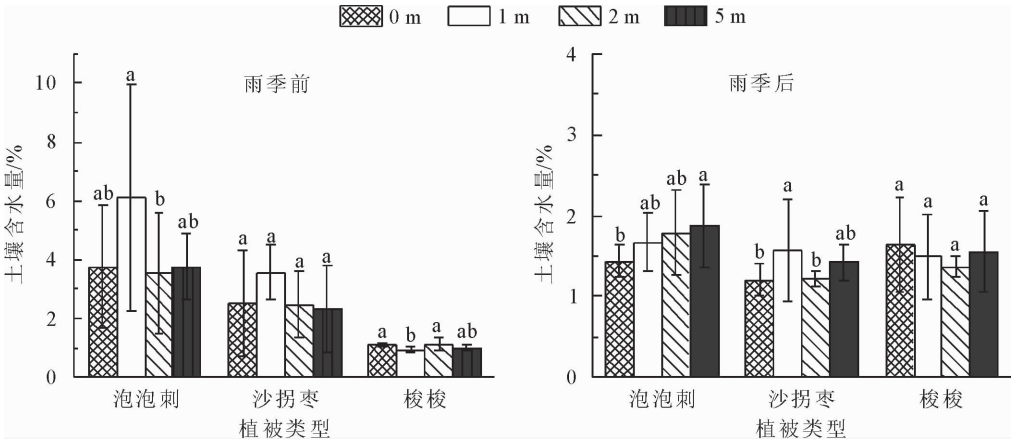


图 4 雨季前、雨季后梭梭灌丛土壤水分状况

Fig. 4 Soil moisture of *Haloxylon ammodendron* shrub before and after the rainy season



注:不同小写字母示差异显著($P<0.05$),下同。

图 5 雨季前、雨季后同一植被类型不同距离处土壤水分差异

Fig. 5 Comparisons of soil moisture among different distances of the same vegetation before and after the rainy season

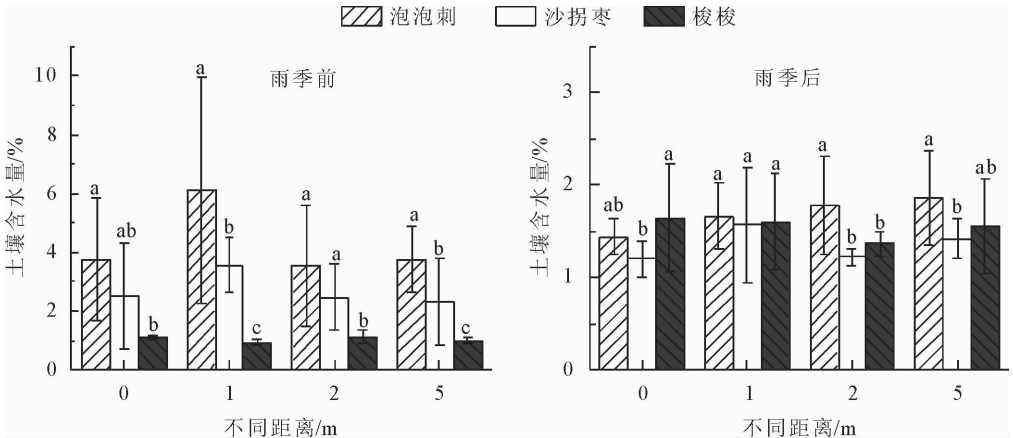


图 6 雨季前、雨季后不同植被类型同一距离处土壤水分差异

Fig. 6 Comparison of soil moisture among the same distance of different vegetation before and after the rainy season

3 结论与讨论

冯起^[18]等通过对荒漠—绿洲过渡带流动沙丘、丘间地、红柳沙丘和林地土壤水分垂向分布的研究,将荒漠—绿洲过渡带土壤水分垂向分层变化大致分为四层:即表层干沙层、水分稳定层、水分活跃层和

深部较活跃层。本研究发现不同植被类型的土壤水分在垂向上表现出明显的分层特征,根据雨季前和雨季后实测的土壤含水量在不同深度处的变化特征,可将泡泡刺灌丛土壤水分垂直分布大致划分为:表层干沙层 0~10 cm、水分稳定层 10~40 cm、水分活跃层 40~100 cm、深部较活跃层 100 cm 以下;将

沙拐枣灌丛土壤水分垂直分布大致划分为:表层干沙层 0~10 cm、水分稳定层 10~20 cm、水分活跃层 20~80 cm、深部较活跃层 80 cm 以下;将梭梭灌丛土壤水分垂直分布大致划分为:表层干沙层 0~10 cm、水分稳定层 10~60 cm、水分活跃层 60~100 cm、深部较活跃层 120 cm 以下。此划分结果基本上与相关文献^[19-21]中对荒漠绿洲过渡带土壤水分的分层情况一致。通过对雨季前和雨季后不同植被土壤含水量的对比可知,雨季对不同植被土壤含水量的影响主要集中在水分活跃层。无论泡泡刺灌丛、沙拐枣灌丛还是梭梭灌丛,其周围土壤含水量均是表层低、深层高。然而,不同植被对于不同土层深度土壤含水量影响的具体过程尚需要进一步探讨。植被的生长对深层土壤水分有强烈的依赖性,深层土壤水分的垂直分布特征对植被的根系和正常生长也有着重要的影响,即土壤含水量与植被生长需水、植被根系生长深度以及环境变化等存在着密切关系^[22-23]。

土壤水分是土壤—植物—大气连续体的关键因子,也是土壤系统养分循环和流动的载体,研究土壤水分动态变化对植物生存环境的影响具有重要意义^[24]。土壤水分状况对土壤理化性质和植被的生长有重要影响,植被也在一定程度上改变土壤水分空间特征^[25-26]。本研究通过对同一植被类型不同距离处土壤水分差异性比较发现,雨季前和雨季后泡泡刺、沙拐枣和梭梭灌丛的土壤含水量在水平梯度上差异各不相同,但泡泡刺、沙拐枣灌丛在水平距离 1 m 处的土壤含水量大于 0 m 处,即灌丛外围近距离处大于灌丛边缘;梭梭灌丛在 0 m 处的土壤含水量大于水平距离 1 m 处,即灌丛边缘大于灌丛外围近距离处,外围其他水平距离处的土壤含水量雨季后变化较复杂,无可比性。由于研究区泡泡刺灌丛、沙拐枣灌丛较大,基部多分枝,且灌丛下有发育良好的土堆存在,降雨径流难以到达灌丛内部只能在灌丛边缘入渗,而梭梭灌丛周围无明显的土堆形成,径流容易到达灌丛植被内部。因此,缘于三者灌丛属性的差异,泡泡刺、沙拐枣、梭梭灌丛土壤含水量具有不同的空间分布特征^[27-28]。荒漠植物长期水分利用效率的排列顺序为梭梭>沙拐枣>泡泡刺^[29],说明在荒漠地区梭梭对于土壤水分的需求小于沙拐枣和泡泡刺。本研究发现雨季前不同距离处,3 种灌丛植被土壤含水量的大小是泡泡刺灌丛>沙拐枣灌丛>梭梭灌丛,从另一方面印证了梭梭在干旱环境下对于土壤水分的需求小于沙拐枣和泡泡刺。

参考文献:

[1] CRAWFORD R M M. Eco-hydrology: plants and water in terrestrial and aquatic environments [J]. Journal of Ecology, 2000, 88(6): 1095-1096.

[2] 王惠, 赵文智, 常学向. 黑河中游荒漠绿洲过渡带土壤水分与植被空间变异[J]. 生态学报, 2007, 27(5): 1731-1739.

WANG H, ZHAO W Z, SHANG X X. Spatial variability of soil moisture and vegetation in desert oasis ecotone in the middle reaches of Heihe River Basin [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 27(5): 1731-1739. (in Chinese)

[3] 张继义, 李秉新, 张宏斌, 等. 黑河中游生态环境建设的思路与对策[J]. 西北林学院学报, 2001, 16(Supp. 1): 62-65.

ZHANG J Y, LI B X, ZHANG H B, *et al.* The thought and countermeasures for ecological environment construction in Middle Reaches of Heihe River [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2001, 16(Supp. 1): 62-65. (in Chinese)

[4] 樊立娟. 荒漠绿洲过渡带斑块植被区土壤水分时空异质性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.

[5] WANG G, DING Y, SHEN Y, *et al.* Environmental degradation in the Hexi Corridor region of China over the last 50 years and comprehensive mitigation and rehabilitation strategies [J]. Environmental Geology, 2003, 44(1): 68-77.

[6] 周爱国, 孙自永, 马瑞. 干旱区地质生态学导论[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.

[7] 张建兵, 熊黑钢, 李宝富, 等. 绿洲—荒漠过渡带不同植被覆盖度下土壤水分的变化规律研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(12): 161-166.

ZHANG J B, XIONG H G, LI B F, *et al.* Variation of soil water with different vegetation coverage in oasis-desert ecotone [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(12): 161-166. (in Chinese)

[8] 符超峰, 赵景波. 毛乌素沙地东南缘不同类型沙丘土壤水分分布特征[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 377-383.

FU C F, ZHAO J B. Distribution of soil moisture content in different types of sand dunes in the Southern Marginal Zone of the Wu Us Sandy Land [J]. Arid Zone Research, 2011, 28(3): 377-383. (in Chinese)

[9] 伍永秋, 张健枫, 杜世松, 等. 毛乌素沙地南缘不同活性沙丘土壤水分时空变化[J]. 中国沙漠, 2015, 35(6): 1612-1619.

WU Y Q, ZHANG J F, DU S S, *et al.* Temporal and spatial variation of soil moisture in dunes with different vegetation coverage Southern of the Wu Us Sandy Land [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(6): 1612-1619. (in Chinese)

[10] 张建兵, 熊黑钢, 郭宇翔, 等. 古尔班通古特沙漠南缘春季沙丘不同部位表层土壤水分空间变异性研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(2): 125-129.

ZHANG J B, XIONG H G, GUO Y X, *et al.* Study spatial variability of surface soil moisture in different positions of sand dunes in South Gurbantonggut Desert [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(2): 125-129. (in Chinese)

[11] 郭挺, 徐先英, 柴成武, 等. 民勤绿洲—荒漠过渡带微区土壤水分及粒度特征研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(5): 157-163.

GUO T, XU X Y, CHAI C W, *et al.* Soil moisture and grain size characteristic of micro-area in oasis-desert of Minqin [J].

- Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(5): 157-163. (in Chinese)
- [12] LEGENDRE P, FORTIN M J. Spatial pattern and ecological analysis[J]. Plant Ecology, 1989, 80(2): 107-138.
- [13] 廖亚鑫, 胡广录, 樊立娟, 等. 黑河中游荒漠-绿洲过渡带斑块状植被区土壤水分变异特征分析[J]. 兰州交通大学学报, 2015, 34(3): 159-165.
- LIAO Y X, HU G L, FAN L J. Spatial variability characteristics of soil moisture of patch vegetation area in desert-oasis ecotone in the Middle Reaches of the Heihe River[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2015, 34(3): 159-165. (in Chinese)
- [14] 王艳莉, 刘立超, 高艳红, 等. 人工固沙植被区土壤水分动态及空间分布[J]. 中国沙漠, 2015, 35(4): 942-950.
- WANG Y L, LIU L C, GAO Y H, *et al.* Dynamic and spatial distribution of soil moisture in an artificially re-vegetated desert area[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(4): 942-950. (in Chinese)
- [15] 明道绪. 田间试验与统计分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [16] 刘冰, 赵文智. 荒漠绿洲过渡带柽柳和泡泡刺光合作用及水分代谢的生态适应性[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1): 101-107.
- LIU B, ZHAO W A. Ecological adaptability of photosynthesis and water metabolism for *Tamarix ramosissima* and *Nitraria sphaerocarpa* in desert-oasis ecotone[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(1): 101-107. (in Chinese)
- [17] 罗青红, 宁虎森, 陈启民. 准噶尔盆地南缘人工梭梭林土壤理化特性时空动态研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 309-315.
- LUO Q H, NING H S, CHEN Q M. Spatiotemporal characteristic of soil physical and chemical properties in *Haloxylon ammodendron* stand at the southern margin of Junggar Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(6): 309-315. (in Chinese)
- [18] 冯起, 司建华, 席海洋. 荒漠绿洲水热过程与生态恢复技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [19] 张晓艳, 褚建民, 孟平, 等. 民勤绿洲荒漠梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 土壤水分特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1206-1216.
- ZHANG X Y, CHU J M, MENG P, *et al.* Characteristics of soil moisture in the area growing *Haloxylon ammodendron* in the Minqin Desert-Oasis Ecotone[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(5): 1206-1216.
- [20] 周学雅, 杨婷婷, 王安志, 等. 科尔沁沙地沙丘-丘间低地降雨前后土壤水分分布特征[J]. 生态学杂志, 2017, 36(1): 157-163.
- ZHOU X Y, YANG T T, WANG A N, *et al.* Soil water distribution before and after a rainfall event at sand dune-interdunes in Horqin Sandy Land, Northern China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(1): 157-163. (in Chinese)
- [21] 牛海, 李和平, 赵萌莉, 等. 毛乌素沙地不同水分梯度根系垂直分布与土壤水分关系的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 157-163.
- NIU H, LI H P, ZHAO M L, *et al.* Relationship between soil water content and vertical distribution of root system under different ground water gradients in Mao Wu Su Sandy Land [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(2): 157-163. (in Chinese)
- [22] 杨磊, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土丘陵沟壑区深层土壤水分空间变异及其影响因子[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(4): 355-362.
- YANG L, WEI W, CHEN L D, *et al.* Spatial variation of deep soil water in the Loess Hilly and Gully Regions and its influencing factors[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, 28(4): 355-362. (in Chinese)
- [23] PARIENTE S. Spatial patterns of soil moisture as affected by shrubs, in different climatic conditions [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2002, 73(3): 237-51.
- [24] 张建国, 李应罡, 徐新文, 等. 间伐对塔里木沙漠公路防护林乔木状沙拐枣生长与土壤水分盐分布的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2377-2382.
- ZHANG J G, LI Y G, XU X W, *et al.* Effects of thinning on *Calligonum arborescens* growth and soil water-salt distribution in Tarim Desert Highway shelterbelt, Xinjiang of Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(9): 2377-2382. (in Chinese)
- [25] 曹军胜, 朱清科, 薛智德. 黄土高原地区土地植被承载力与植被生态恢复建设[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(1): 39-43.
- CAO J S, ZHU Q K, XUE Z D. Vegetation carrying capacity of land and vegetation restoration and construction in the Loess Plateau region[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(1): 39-43. (in Chinese)
- [26] 葛广华, 殷彩云, 王家强, 等. 塔里木河上游荒漠河岸林土壤水分盐分布规律研究[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(6): 7-12.
- GE G H, YIN C Y, WANG J Q, *et al.* Soil water distribution rule in desert riparian forests in the Upstream of Tarim River [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(6): 7-12. (in Chinese)
- [27] 侯建秀, 张元明, 陶冶, 等. 沙漠水渠人工固沙区沙蒿和沙拐枣灌丛的土壤水分特征对比[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(4): 164-167.
- HOU J X, ZHANG Y M, TAO Y, *et al.* Contrastive study on soil water content characters of *Artemisia arenaria* and *Calligonum mongolicum* shrubs in artificial sand-fixation area in Gurbantunggut Desert of Northwest China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(4): 164-167. (in Chinese)
- [28] 李小军. 地表径流对荒漠灌丛生境土壤水分空间特征的影响[J]. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1576-1582
- LI X J. Spatial pattern of soil moisture affected by runoff in desert shrubland area of Tengger Desert[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(6): 1576-1582. (in Chinese)
- [29] 苏培望, 赵爱芬, 张立新, 等. 荒漠植物梭梭和沙拐枣光合作用、蒸腾作用及水分利用效率特征[J]. 西北植物学报, 2003, 23(1): 11-17.
- SU P X, ZHAO A F, ZHANG L X, *et al.* Characteristic in photosynthesis, transpiration and water use efficiency of *Haloxylon ammodendron* and *Calligonum mongolicum* of desert species[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(1): 11-17. (in Chinese)