

# 荒漠草原土壤水分时空变化对降水变化的响应

罗叙<sup>1</sup>, 李建平<sup>1,2</sup>, 张翼<sup>1</sup>, 井乐<sup>1</sup>, 王誉陶<sup>1</sup>, 张娟<sup>1</sup>

(1.宁夏大学 农学院, 银川 750021; 2.西北退化生态系统恢复与重建国家重点实验室培育基地, 银川 750021)

**摘要:**为了探讨荒漠草原土壤水分时空变化对降水变化的响应,以毛乌素沙地南缘荒漠草原为研究对象,利用人工遮雨棚和人工补水的方式模拟了5个不同的降水梯度处理(正常降水的33%,66%,100%,133%和166%),采用TDR技术监测0—200 cm土层土壤含水量,系统研究了降雨变化对荒漠草原土壤水分滞留规律。结果表明:(1)各降水处理下土壤含水量均在7月份达到最大值,且正常降水处理的土壤含水量高于其他降水处理。(2)不同土层土壤含水量对降雨变化的响应不同,0—40 cm土层含水量对降雨量最为敏感,40—80 cm土层水分比较稳定,随着土层深度的增加含水量增加,在120—200 cm土层水分值最大。(3)不同降水处理之间土壤水分变异系数波动范围较小,深层土壤含水量变异系数值相对较小。(4)降水增加提高了植被密度和生物量。(5)降雨量与土壤水分呈正相关关系,控雨处理下,大气温度与浅层土壤水分呈正相关。因此,全面探讨降水量对荒漠草原土壤水分时空变化的影响,需要考虑降雨季节与土层深度的交互作用,以及区域植被类型的特殊性。

**关键词:**荒漠草原;降水变化;不同土层;土壤含水量;变异系数;植被特征

中图分类号:P426.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0142-09

## Response of Spatial and Temporal Variation of Soil Moisture to Precipitation Change in Desert Steppe

LUO Xu<sup>1</sup>, LI Jianping<sup>1,2</sup>, ZHANG Yi<sup>1</sup>, JING Le<sup>1</sup>, WANG Yutao<sup>1</sup>, ZHANG Juan<sup>1</sup>

(1.School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2.Breeding Base of State Key Laboratory for Preventing Land Degradation and Ecological Restoration, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** In order to investigate the response of spatial and temporal variation of soil moisture to precipitation in desert steppe, the desert grassland in the southern Mu Us sandy land as the research object, we used the way of artificial awnings and artificial filling water to simulate the 5 different precipitation gradients (33%, 66%, 100%, 133% and 166% of normal precipitation), to monitor soil moisture content in 0—200 cm soil layer by TDR technology, and to systematically examine effect of rainfall on change patterns of soil moisture retention in desert grassland. The results show that: (1) the soil moisture contents in all precipitation treatments reached the maximum values in July, and the soil moisture content in normal rainfall treatment was higher than that in other precipitation treatments; (2) soil moisture contents of different soil layers had different responses to rainfall changes, the moisture content of surface soil (0—40 cm) was the most sensitive to rainfall, soil moisture in 40—80 cm layer was relatively stable, with the increase of soil depth, the water content in the 120—200 cm layer was the largest; (3) the variation coefficient of soil moisture fluctuated in a small range between different precipitation treatments, while the variation coefficient of soil moisture content in deep layer was relatively small; (4) precipitation resulted in the increases of vegetation density and biomass; (5) there was a positive correlation between rainfall and soil moisture; under rain-controlled treatment, atmospheric temperature was positively correlated with shallow soil moisture. Therefore, in order to comprehensively explore the effects of precipitation on the spatial and temporal variation of soil moisture in desert steppe, it is necessary to consider the interaction between rainfall season and soil depth as well as the particularity of regional vegetation types.

收稿日期:2020-08-21

修回日期:2020-09-30

资助项目:国家自然科学基金(31660143);宁夏自然科学基金(2019AAC03042);宁夏大学草学一流学科建设项目(NXYLXK2017A01)

第一作者:罗叙(1995—),男,甘肃白银人,在读硕士研究生,研究方向为草地生态、资源与环境。E-mail:2278890189@qq.com

通信作者:李建平(1982—),男,陕西延安人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事草原生态、模型构建与模拟分析研究。E-mail:lijianpingsas@163.com

**Keywords:** desert steppe; precipitation variation; different soil layers; soil moisture content; coefficient of variation; vegetation characteristics

随着全球气候变暖,降水分布格局也发生了一系列变化<sup>[1]</sup>,研究发现气候变暖会增加我国降水和极端降水事件发生的频率<sup>[2]</sup>,然而自然降水或者人为灌溉均要先通过转化为土壤水分才能被植物吸收利用<sup>[3]</sup>。在干旱、半干旱地区,土壤水分作为降水、地下水和地表水之间相互传输的桥梁不仅对植物的生长发育至关重要<sup>[4-5]</sup>,而且直接影响植被的分布与稳定<sup>[6]</sup>。在荒漠草原区,降水作为土壤水分补给的主要方式<sup>[7]</sup>决定着草原植被的分布及生态环境的稳定。土壤水分因受降水<sup>[8]</sup>、植被等<sup>[9]</sup>因素的影响,存在明显的时空变化特征<sup>[10]</sup>,而深层土壤水分作为植物生长的储备水源,在植物应对干旱等极端天气方面发挥着重要作用<sup>[11]</sup>。

全球气候变化使降水的不可预测性难度增大,在干旱缺水的地区,土壤水分的时空变化越来越受到国内外学者的关注<sup>[12]</sup>。已有研究表明,在大尺度上,如全球中纬度地区和大陆尺度,降水等气象因素对土壤水分空间异质性影响明显<sup>[13]</sup>;而在黄土丘陵小流域等小尺度上,地形和植被等环境因子和土壤结构、有机质等理化性质为主导因子<sup>[14]</sup>。Brocca 等<sup>[15]</sup>在田间和流域尺度上,利用遥感反演土壤水分变化规律并结合土壤水分监测数据,研究土壤水分的时空变异性。Matsui 等<sup>[16]</sup>研究了土壤水分入渗与土壤含水量的关系。王正安等<sup>[12]</sup>在六盘山半干旱区对华北落叶松林研究发现,0—10 cm 土层土壤含水率与降雨量变化趋势具有一致性,并且土壤含水率对不同雨强的响应表现出显著的差异。符娜等<sup>[17]</sup>在黄土区人工林地研究发现,土壤含水率随土层深度的增加而逐渐降低,并长期维持在较为稳定的范围内。沈志强等<sup>[18]</sup>通过野外坡面降雨试验研究发现不同土层对降雨的响应不同,植被密度大的试验区土壤水分对降雨的表现较为平缓与延迟。李小英等<sup>[19]</sup>发现,黄土高原地区表层土壤水分与降水量呈显著正相关关系,同时表层土壤水分分布存在较大时空差异和明显的季节性变化。苏莹等<sup>[20]</sup>研究发现降雨量的时间变化对于土壤体积含水率的时间变化具有重要影响。方楷等<sup>[21]</sup>研究发现生长初期的土壤水分是植物生长的关键影响因子,并且植物生长耗水主要来自 60—100 cm 土层。综上,相关研究人员对林地土壤水分在垂直方向的变化、降水量与表层土壤水分的关系、以及植被生长对土壤水分的消耗状况和利用层次进行了相关研究,而对不同降雨量下荒漠草原深层土壤含水量的研究比较少。鉴于此,本试验通过设置不同降雨梯度,分析研究荒漠草原不同土层土壤水分的时

空变化规律以及对植被生长的影响,揭示降雨量对荒漠草原不同土层土壤含水量的影响,以期为区域生态系统建设提供理论参考。

## 1 试验区概况

研究区位于宁夏回族自治区盐池县花马池镇四墩子村(37°76′N,107°28′E),其北邻毛乌素沙地,南接黄土高原,由南向北从黄土高原丘陵区向鄂尔多斯台地过渡。平均海拔 1 600 m,年平均气温 8.1℃,年降水量 289 mm,大部分集中在 6—9 月<sup>[22]</sup>;年均蒸发量 2 132 mm,≥0℃年积温为 3 430℃,属于典型的中温带大陆性气候<sup>[23]</sup>。地带性植被类型为荒漠草原,地带性土壤为灰钙土,土壤质地多为沙壤和粉砂壤,肥力低下。植被以旱生和中旱生植物类型为主,主要分布有胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)、远志(*Polygala tenuifolia*)、砂珍棘豆(*Oxytropis racemosa*)和猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)等<sup>[24]</sup>。

## 2 试验设计与数据来源

### 2.1 试验设计

试验于 2019 年 6 月—10 月在盐池县四墩子基地进行,通过对试验区近 40 a 的气象观测数据分析,以年平均降水量和波动极值为依据,利用遮雨棚和人工补水的方式模拟了 5 个不同梯度的降水处理,分别为正常降雨的 33%,66%,100%,133%,166%,按蛇形法随机设置小区,每个小区面积为 36 m<sup>2</sup> (6 m×6 m),间距 20 m,每个处理设置 3 个重复,共设置 15 个小区。试验前期各小区植被生长状态及植被数量基本一致,土壤水分无显著差异。整个试验期间,对 33%和 66%减雨区采用钢架结构和凹型长条透明塑料板通过人工遮雨的方式分别遮挡小区面积的 2/3,1/3,对 133%和 166%增雨区,每次降雨之后利用雨量筒测定降雨量,按照小区面积计算增雨量,并用洒壶补充到增雨区(补充的水为遮雨棚收集的自然降雨),正常降雨为 100%(图 1)。利用 HOBO MX2301 (Onset Computer Corporation, USA)检测各小区温度,温度采集间隔为 15 min。为防止水分扩散,每个小区四周利用 1.2 m 宽的塑料板进行水分隔离,地下埋藏深度 1.1 m,地上漏出 10 cm 阻止地表径流。小区中心设置一个 2 m 深的 TDR 管,每半个月(分别为每月的第 1 天和第 15 天)定点测定不同土层土壤含水量,每 40 cm 作为一个土层,共 5 个土层,每个月的数据取本月两次测量的平均

值。采用收获法<sup>[25]</sup>测定植被特征,在每个小区中随机设置 1 个 1 m×1 m 的小样方,测定各降水处理下

植物的密度、盖度、频度、高度及地上和地下生物量,称鲜重(g/m<sup>2</sup>),作为总生物量。

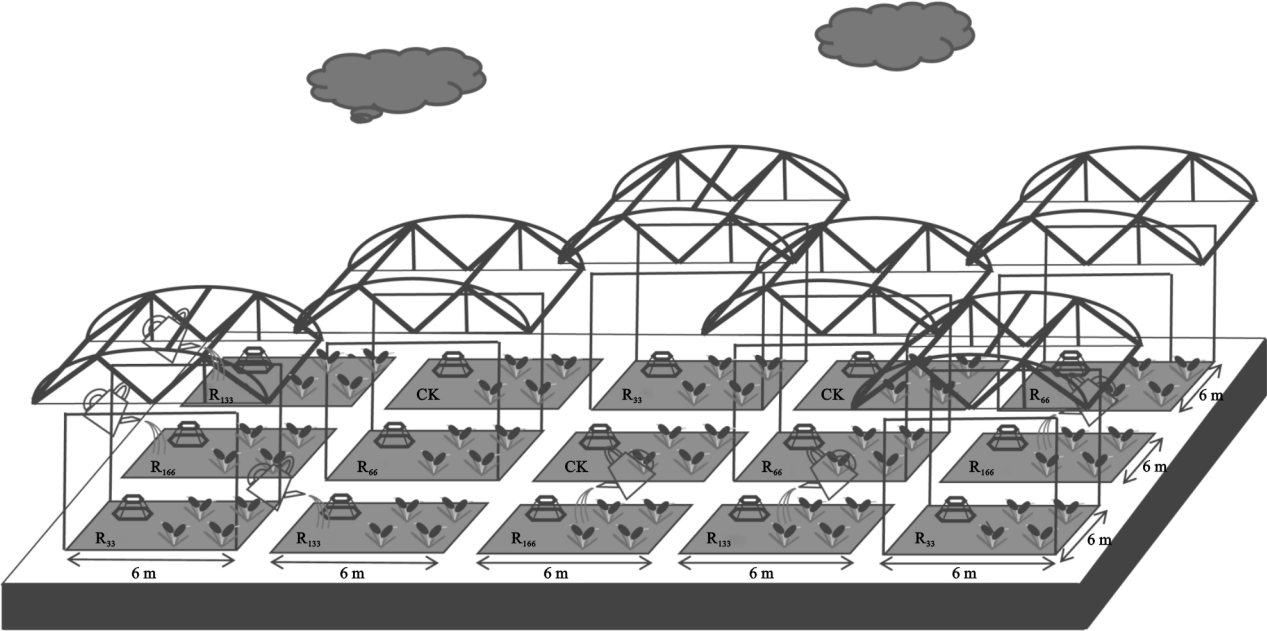


图 1 试验设计示意图

2.2 数据处理

应用 SPSS 22.0(IBM Corporation,USA)对各降水处理下不同土层土壤含水量采用 One-way ANOVA 和 Duncan 法进行单因素方差分析、多重比较 ( $p<0.05$ )及对土壤水分影响因素进行 Pearson 相关性分析,采用 Origin Pro 2017 (OriginLab Corporation,USA)对分析结果作图。

3 结果与分析

3.1 降雨量与各处理土壤含水量的动态分析

试验期间随着季节变化降雨量呈波动降低的趋势(图 2),6 月、7 月、8 月份降水较多,分别为 58.2, 55.5,55.3 mm;9 月、10 月份降水量分别为 40.1,38.0 mm。6 月份平均气温为 23.15℃,7 月份平均气温为 25.82℃,8 月份平均气温为 25.18℃,9 月份平均气温为 19.35℃,10 月份出现了零下温度,平均气温为 12.15℃;除 166%降水处理的土壤含水量在 9 月份最大外,其余各降水处理土壤含水量均在 7 月份达到最大值,之后 33%,66%和 100%降水处理出现了不同程度的下降,133%和 166%降水处理在降水较少的 9 月、10 月份土壤含水量出现了不同程度的回升。

3.2 不同降水梯度下土壤平均含水量的月变化动态

由图 3 可知,9 月份之前土壤含水量由高到低依次为 100%>66%>33%>166%>133%,增雨处理下土壤含水量相对较低,正常降雨处理下的土壤含水量均高于同期其他降水处理。每月土壤平均含水量

由高到低依次为 7 月>6 月>8 月>9 月>10 月, 33%,66%和 100%降水处理随着季节变化土壤含水量呈现先增加后减小的趋势;133%降水处理在 6 月、7 月份土壤含水量保持在 9.16%,9 月份下降至 8.31%,10 月份呈现小幅回升;166%降水处理在降水较少的 9 月、10 月份土壤含水量高于相较降雨较多的 6 月、7 月、8 月份。6 月、7 月份增雨处理与对照呈显著性差异 ( $p<0.05$ ),8 月份只有 133%降水处理与对照呈显著性差异 ( $p<0.05$ ),9 月、10 月份,同期各处理之间无显著性差异。

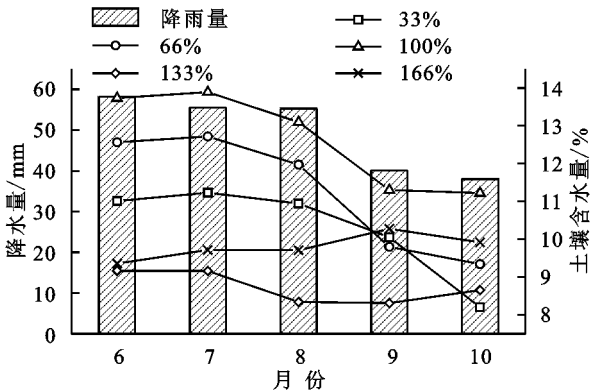


图 2 降水变化与土壤含水量的动态变化

3.3 不同土层土壤水分对降雨变化的响应

不同降水处理下 0—40 cm 土层土壤含水量的月动态变化见图 4A,各处理土壤含水量均在 7 月份达到最大值。166%降水处理在 6 月、7 月、8 月份土壤含水量均高于同期其他处理,9 月、10 月份除对照处理外,166%降水处理下土壤含水量高于同期其他处



理。除 33%降水处理外,其他处理均随季节变化呈升—降—升的变化趋势;100%和 133%降水处理在 9 月份出现回升,66%和 166%降水处理在 10 月份出现回升。6 月份,166%降水处理与 33%和 133%降水处理呈显著性差异( $p<0.05$ );7 月份,166%降水处理与 33%,66%和 133%降水处理呈显著性差异( $p<0.05$ );8 月份,166%降水处理与同期各处理均呈显著性差异( $p<0.05$ );9 月、10 月份 100%和 166%降水处理无显著性差异。

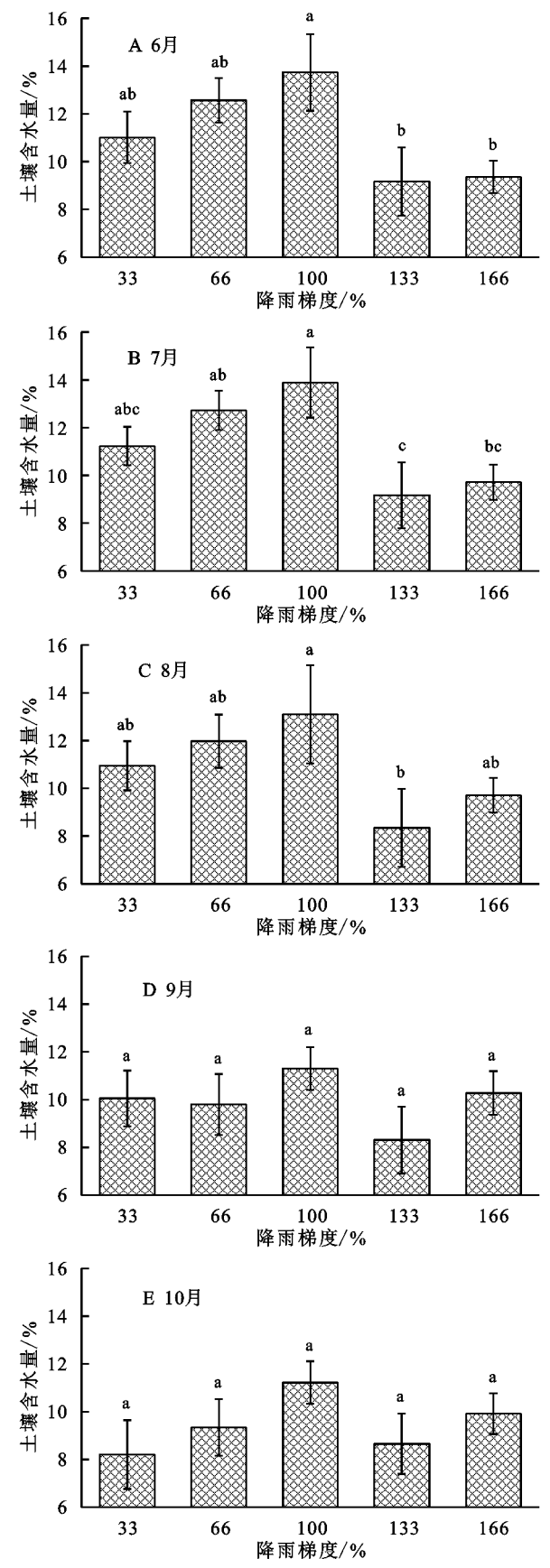
不同降水处理下 40—80 cm 土层土壤含水量的月动态变化见图 4B,各处理土壤含水量依然均在 7 月份达到最大值,减雨处理和对照处理在 6 月、7 月、8 月份土壤含水量高于 9 月、10 月份。对照处理在该层土壤含水量最高,增雨处理在该层土壤含水量相对较低。减雨处理与对照处理在 6 月、7 月、8 月份无显著性差异,增雨处理与对照呈显著性差异,但随着时间的推迟此差异逐渐变小;9 月、10 月份,虽然增雨处理与对照相比土壤含水量百分点分别降低了 4.04%,1.49%和 2.38%,1.47%,但同期各处理之间未达到显著差异。

不同降水处理下 80—120 cm 土层土壤含水量的月动态变化见图 4C,增雨处理下土壤含水量低于其他处理。8 月份之后 33%,66%和 100%降水处理在该层土壤含水量出现了不同程度的下降,而增雨处理在该层土壤含水量出现了一定程度的增加。6 月份,增雨处理与对照呈显著性差异,之后随着季节变化这种差异逐渐减小。9 月份,133%和 166%增雨处理相较于对照百分点分别降低了 2.91%,0.33%;10 月份,133%和 166%增雨处理相较于对照百分点分别降低了 1.20%,1.60%,但均未达到显著差异。

不同降水处理下 120—160 cm 土层土壤含水量的月动态变化见图 4D,对照处理在该层的土壤含水量高于其他人为干扰处理。8 月份之前各处理土壤含水量保持在相对稳定的状态,之后 66%,100%和 133%降水处理土壤含水量开始下降,9 月、10 月份增、减雨处理与对照处理之间土壤含水量差值呈逐渐减小的趋势。6 月、7 月、8 月份各处理与对照呈显著性差异( $p<0.05$ ),9 月、10 月份除 66%降水处理外,同期各处理之间无显著性差异。

不同降水处理下 160—200 cm 土层土壤含水量的月动态变化见图 4E,对照处理的土壤含水量均高于其他处理。6 月、7 月、8 月份不同时期各处理之间土壤含水量差异呈相同的变化趋势,土壤含水量由高到低依次为 100%>66%>33%>133%>166%。9 月份之后各处理土壤含水量趋于 12%。6 月、7 月、8 月份同期各处理之间呈显著性差异( $p<0.05$ ),9 月、

10 月份同期各处理之间无显著性差异。



注:不同小写字母表示不同降水处理在同一个月份差异显著( $p<0.05$ ),下同。

图 3 不同降水梯度下土壤平均含水量的月变化动态

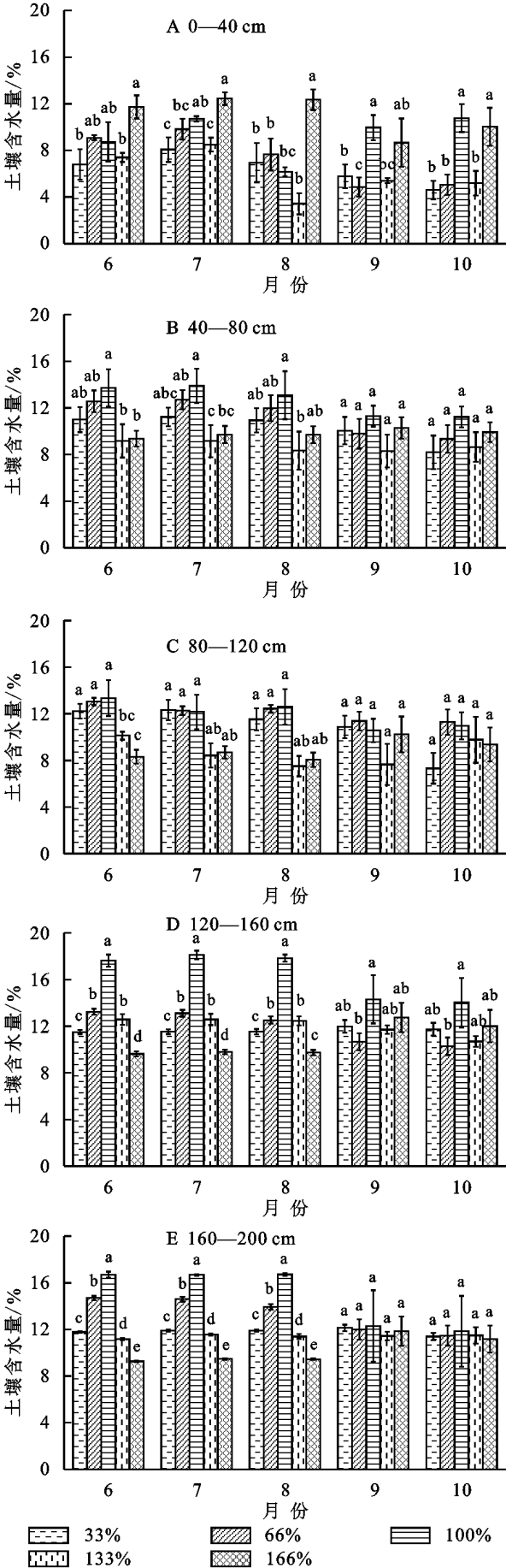


图 4 不同降水处理下各土层土壤含水量的月动态变化

3.4 不同土层土壤含水量的变异系数

不同降水处理下各土层土壤含水量的变异系数见图 5。变异系数在一定程度上能表现土壤水分在空间上的分布,变异系数越大,说明土壤含水量变化就越剧烈,反之土壤含水量变化就越小。一般认为变异系数 $<0.1$  为弱变异,变异系数在  $0.1\sim1.0$  为中等变异,变异系数 $>1.0$  为强变异<sup>[26]</sup>。整体来看,6 月、7 月、8 月份深层(120—200 cm)土壤水分变异系数较上层小,120 cm 以下变异系数均呈现出弱变异。9 月、10 月份各处理变异系数呈现升—降—升的“S”型变化。6 月、7 月、8 月份 133% 降水处理在 40—80 cm 土层处土壤水分变异系数明显高于其他处理,其值分别为 0.25,0.31,0.22,表现出中等变异。对照处理在 8 月份最大变异出现在 80—120 cm,9 月、10 月份的最小变异系数出现在 80—120 cm 土层。6 月份,33%,100% 和 166% 降水处理最大变异出现在 0—40 cm,66% 和 133% 降水处理最大变异系数出现在 40—80 cm;7 月、8 月份,减雨处理和 133% 降水处理土壤水分变异系数最大值出现在 0—40 cm,166% 降水处理变异系数最大值出现在 40—80 cm;9 月、10 月份,减雨处理和 166% 降水处理最大变异系数出现在 0—80 cm,133% 降水处理出现在 40—120 cm。

3.5 植被特征对降雨变化的响应

不同降雨处理下植被特征变化见图 6。增雨处理下植被密度大于减雨处理,除 133% 降水处理外,植被密度随着降雨量的增加表现出增加的趋势。166% 降水处理的植被密度最大,较对照处理高 17.70%,但各降水处理之间均未达到显著差异;植被盖度随降雨量的增加呈先增加后减小的趋势,增雨处理的植被盖度低于减雨处理,33%,66% 和 133%,166% 降水处理分别较对照低 43.50%,33.40%,47.03%,54.14%。33%,133% 和 166% 降水处理与对照呈显著差异( $p<0.05$ );增雨处理和减雨处理的植被频度均高于对照,各处理之间未达到显著差异;66% 和 133% 降水处理的植被高度较对照高,分别高出 30.70%,18.72%,各处理之间未达到显著差异水平;除 133% 降水处理外,地上、地下生物量随降水的增加呈增加趋势,166% 增雨处理下根系生物量与减雨处理和 133% 降水处理达到显著差异水平( $p<0.05$ ),与对照相比未达到显著差异。

3.6 土壤水分影响因素关联分析

表 1 统计了不同土层土壤水分与各影响因素之间的相关系数,土壤含水量与植被盖度、频度和高度呈负相关,与降水、温度、植被密度和地上、地下生物量呈正相关。

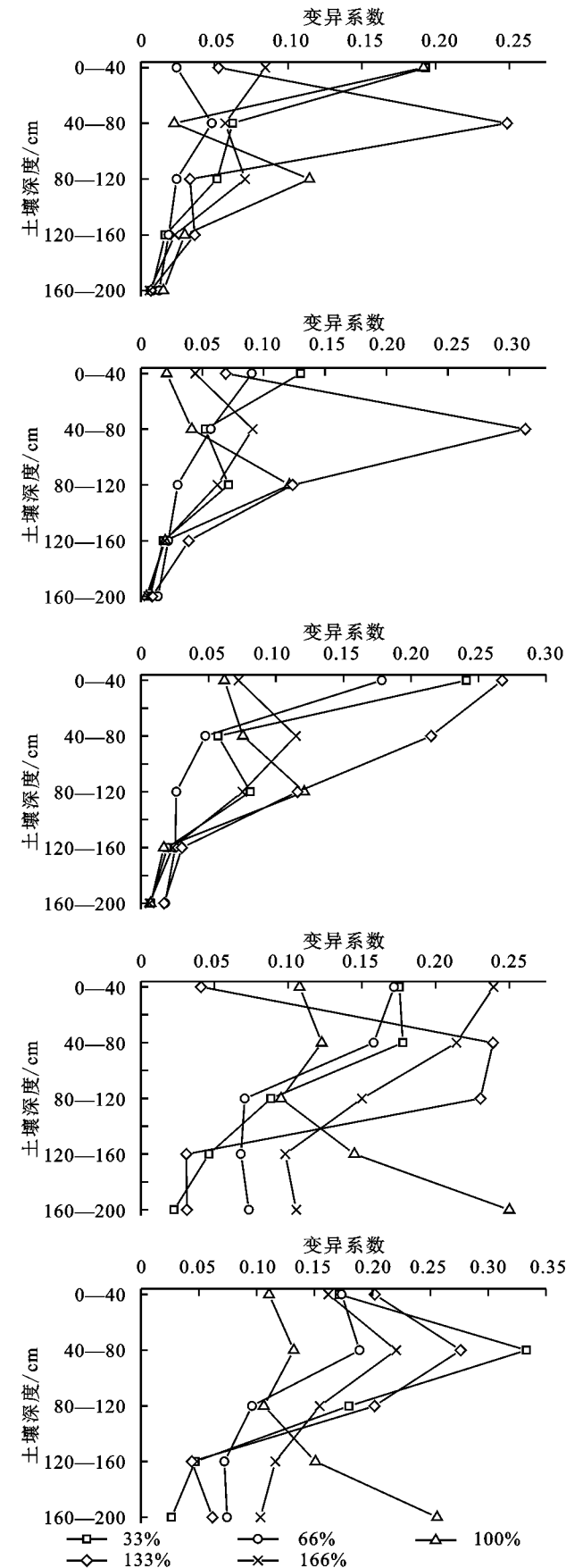


图5 各处理在不同时期各土层的变异系数

33%降水处理在土层深度为0—40 cm和80—120 cm时土壤含水量与温度呈显著相关( $p < 0.05$ ),

33%和66%降水处理在土层深度为40—80 cm时土壤含水量与温度表现出极显著相关( $p < 0.01$ )。66%和100%降水处理在120—200 cm时土壤含水量与温度呈显著相关( $p < 0.05$ ),133%降水处理在120—160 cm时土壤含水量与温度表现出极显著相关( $p < 0.01$ )。33%和166%降水处理下土壤浅层(0—40 cm)土壤含水量与降雨量在0.05水平上显著相关,66%和100%降水处理的0—80 cm和120—200 cm土层土壤含水量与降水量在0.01水平上显著相关。减雨处理在深层(160—200 cm)时植被密度与土壤含水量呈正相关,而增雨处理在浅层表现出正相关,并且随着降雨量的增加正相关土层减少。随着降水量的增加160—200 cm土层土壤含水量与植被盖度的相关性呈先增大后减小的变化趋势,正常降水处理下相关性最强,当降水量增加到166%时该层土壤含水量与植被盖度呈负相关。减雨处理下植被频度的相关性强于增雨处理。33%和133%降水处理在土层深度为40—120 cm,66%降水处理下土层深度为0—160 cm,166%降水处理土层深度为80—200 cm时,土壤含水量与高度呈正相关关系。除33%降水处理的0—40 cm土层外,减雨处理各土层地上、地下生物量与对应的土层土壤含水量的相关性相反,而增雨处理的相关性一致。

## 4 讨论

土壤水分是限制植被形成与发展的关键因子,其在气候干旱、生态环境相对脆弱的荒漠草原区发挥着重要作用<sup>[27]</sup>。本研究通过对2019年6—10月植物生长期降雨量变化对荒漠草原不同土层土壤含水量在时间和空间变化的分析,得出除166%降水处理土壤含水量在9月份最高外,其余各降水处理土壤含水量均在7月份达到最大值,且增雨处理在9月、10月份土壤含水量相较于8月份表现出不同程度的回升。说明是土壤含水量的变化对增雨变化有一定的滞后性;正常降水处理的土壤含水量在同期各处理之间最高,不同降水处理土壤水分含量变化趋势不同。其原因是2019年6月份开始测量时,此时宁夏中部干旱带处于春末夏初,植被刚刚萌发,风速较大,空气湿度相对低,土壤水分蒸发强烈。6月15日开始,自然降雨增加,土壤开始补充水分,相应的土壤含水量逐渐增加,较高的土壤含水量有利于补充植被消耗和土壤蒸散的水分,7月份测得土壤含水量达到最大。8月份自然降水减少,加之该时期是植被生长的旺盛期,



对水分的需求非常敏感。同时该区气温高,导致植物、土壤蒸腾蒸发量升高。9月、10月份自然降雨较8月份更少,植被只能消耗土壤贮存的水分,并且此时试验地日照时间缩短,蒸发量减少。说明植被对水分的利用影响了土壤水分在时间尺度上的变异<sup>[28]</sup>。

增雨处理植被密度大于减雨处理,原因是增雨处理下的一部分土壤水分用于植物生长且 166% 降水处理丰富的地上生物量(主要植被为胡枝子、蒙古冰草和远志)对雨水有很好的截留和保持能力;而减

雨处理伴随干旱胁迫的持续导致植被生长弱小,土壤裸露面积较增雨处理大,加上试验期间植物正处于生长期,土壤水分只能蓄积在深层以保证植物正常蒸腾需水。说明土壤水分对降雨的响应受样地植被及草本植物密度大小的影响<sup>[18]</sup>。8月份之后,土壤含水量出现了不同程度的下降,9月、10月份时各降水处理之间土壤含水量未达到显著性差异。由此可见,土壤含水量与降雨量表现一致,这与李新荣等<sup>[29]</sup>研究一致。

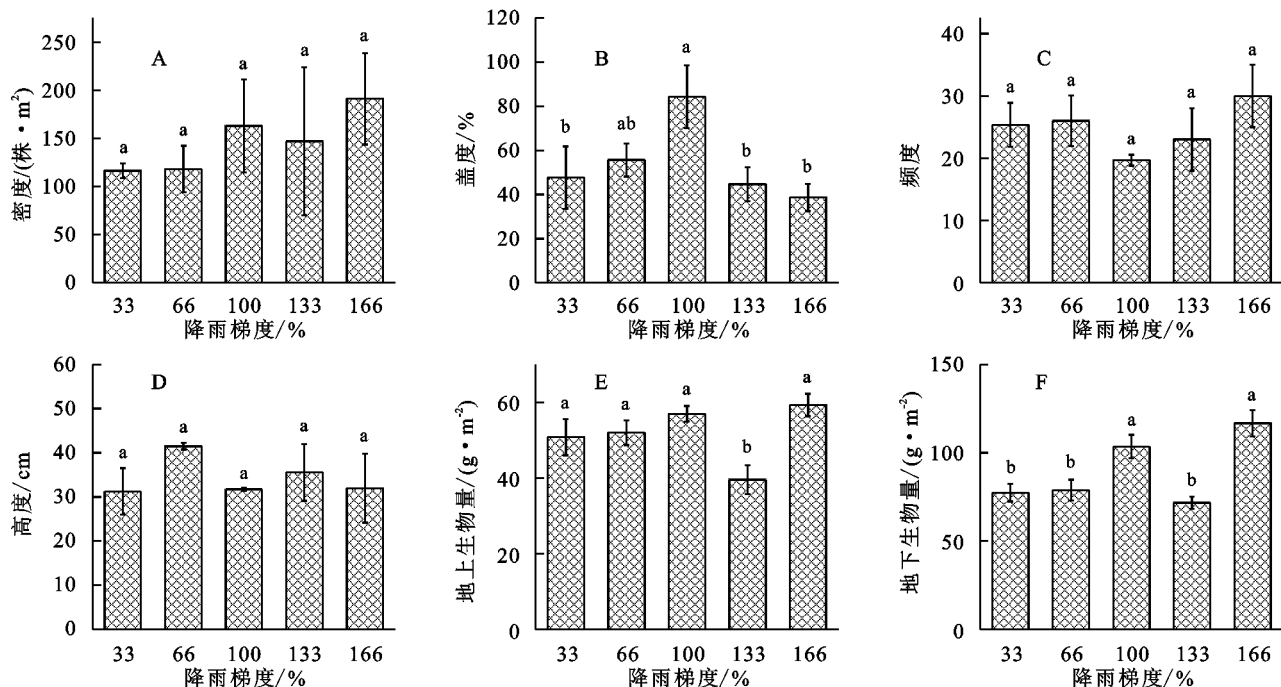


图 6 各降水处理下植被特征的变化

不同土层对降雨量变化的响应不同,166%最大降水处理的土壤含水量在土壤浅层(0—40 cm)最高,这与马生花等<sup>[7]</sup>研究一致。原因是 33%, 66%, 100%, 133% 降水处理植被生物量低,表层土壤与大气直接接触,地表蒸发强烈,即使降雨较多的月份表层土壤含水量仍然不会有太大的升高。在 40—120 cm 土层中增雨处理土壤含水量低于其他降水处理,因为草原植被生长耗水主要是在 60—100 cm 土层<sup>[21]</sup>;随着土层深度的增加降水对土壤水分的补给减弱,对土壤含水量的影响越来越小。这与潘颜霞等<sup>[30]</sup>研究的降雨是引起土壤水分空间变异的主要影响因素的结论一致。不同深度的土壤含水量受降雨的影响不同,其中 0—40 cm 最大,降雨量较小时,深层土壤含水量几乎不受影响。不同降水处理土壤含水量随着时间的推迟呈现“S”型变化,且减雨处理表层土壤含水量低于深层土壤含水量,这与王艳莉等<sup>[28]</sup>在人工固沙植被区研究结果有所差异,但总体

说明了土壤含水量对降水变化的响应比较敏感<sup>[30]</sup>。增雨处理下土壤水分变化的土层深度大于减雨处理,这与王艳莉等<sup>[28]</sup>研究的干旱年份与湿润年份结果一致。除 133% 降水处理平均变异系数为 0.117 外,其他降水处理土壤含水量的平均变异系数均表现出弱变异水平,说明不同降水变化对土壤水分变异的影响较小,这与前人研究结果一致<sup>[31-32]</sup>。不同降水处理下表层土壤含水量变异系数大于深层土壤含水量的变异系数,变异系数较小值集中在深层,这与李小英等<sup>[19]</sup>研究一致。说明降雨量变化对土壤水分蒸发和植被蒸腾对 0—80 cm 土层的影响最大,随着土层深度的增加变异系数逐渐减小。166% 增雨处理在降雨较多的 6 月、7 月、8 月份变异系数较小,因为期间该样地较大的植被覆盖度使一部分雨水被截留,同时也减少了土壤水分的蒸发,在一定程度上减小了土壤水分的损失。33% 减雨处理变异系数较大是因为植被盖度低,降雨进入土壤后容易被蒸发。9 月、10 月份增雨处理和正常降雨

0—200 cm 土层土壤水分变异系数大于减雨处理,分析其原因是正常降雨和增雨处理下植被覆盖度大,降雨量减少时消耗的土壤水分多<sup>[33]</sup>。

增雨处理较减雨处理的植被密度大,说明在荒漠草原降水较少的情况下增加降水可以促进一年生植物的萌发。原因是在降水较少的荒漠草原区,表层土壤水分相对比较匮乏,减水处理进一步降低了土壤水分,从而限制植物对水分的吸收。此外,研究区优势植物群落主要是多年生植物(蒙古冰草、砂珍棘豆、远志),其根系分布于土壤浅层<sup>[34]</sup>,对表层土壤水分利用效率较高<sup>[35]</sup>。在一定降水量范围内,植被盖度随

降水量的增加呈增加的趋势,这主要是增水能增加植物的生长;各降水处理植被频度和高度均未达到显著差异水平。

荒漠草原区植被生物量对降水的响应敏感<sup>[36]</sup>,166%降水处理地上、地下生物量均高于 33%降水处理,这与 Zhang 等<sup>[37]</sup>研究得出的较高的植被密度能使植物更好地利用环境资源,从而提高生物量的结论一致。降水量在正常降水范围波动时生物量维持在相对稳定的状态,可能与植被生长状况密切相关<sup>[38]</sup>;133%降水处理下植被高度较低的原因可能与样方内植被类型分布有关。

表 1 土壤水分影响因素相关分析

处理	土层/cm	土壤含水量/%	温度	降水量	密度	盖度	频度	高度	地上生物量	地下生物量
33%	0—40	6.73	0.955 *	0.938 *	0.076	0.955	−0.989	−0.733	−0.336	−0.085
	40—80	10.40	0.974 * *	0.923 *	0.587	−0.536	0.659	0.119	0.865	−0.579
	80—120	11.71	0.953 *	0.855	−0.950	−0.062	−0.092	0.487	−0.995	0.948
	120—160	12.65	−0.600	−0.844	−0.637	−0.951	0.893	0.991	−0.269	0.644
	160—200	11.87	0.651	0.313	0.996	0.452	−0.310	−0.794	0.873	−0.997
66%	0—40	11.99	0.810	0.974 * *	−0.939	−0.707	−0.998 *	0.747	−0.951	0.996
	40—80	12.52	0.971 * *	0.976 * *	−0.787	−0.455	−0.929	0.506	−0.809	0.920
	80—120	12.81	0.753	0.894 *	−0.542	−0.139	−0.757	0.197	−0.573	0.741
	120—160	12.70	0.882 *	0.993 * *	−0.655	−0.277	−0.841	0.333	−0.683	0.828
	160—200	13.59	0.892 *	0.994 * *	0.576	0.866	0.322	−0.835	0.545	−0.344
100%	0—40	11.27	−0.500	−0.385	−0.665	−0.641	−0.778	−0.683	0.642	0.435
	40—80	10.54	0.923 *	0.965 * *	0.874	0.353	0.941	0.405	−0.859	−0.115
	80—120	12.29	0.683	0.867	0.999 *	−0.096	0.994	−0.039	−0.997	0.334
	120—160	13.93	0.905 *	0.987 * *	−0.604	0.877	−0.467	0.848	0.628	−0.967
	160—200	11.16	0.899 *	0.983 * *	−0.366	0.974	−0.210	0.960	0.394	−1.000 *
133%	0—40	6.74	0.278	0.467	0.759	−0.978	0.874	−0.395	−0.422	−0.247
	40—80	5.80	−0.224	−0.345	0.784	−0.393	0.644	0.827	0.810	0.904
	80—120	9.82	−0.407	−0.030	0.700	−0.274	0.543	0.891	0.877	0.951
	120—160	12.15	0.980 * *	0.936 *	−0.454	−0.027	−0.267	−0.986	−0.981	−1.000 * *
	160—200	11.42	−0.178	−0.276	−0.663	0.225	−0.500	−0.913	−0.900	−0.965
166%	0—40	10.91	0.719	0.890 *	0.772	0.376	−0.105	−0.562	−0.988	−0.482
	40—80	10.92	0.849	0.639	−0.036	0.444	0.814	−0.247	0.541	−0.336
	80—120	12.38	−0.620	−0.801	−0.854	−0.503	−0.037	0.673	1.000 * *	0.602
	120—160	12.80	−0.771	−0.939	−0.681	−0.250	0.236	0.447	0.959	0.362
	160—200	11.88	−0.751	−0.933	−0.880	−0.547	−0.088	0.710	0.999 *	0.642
	0—200	11.24	0.231	0.456	0.479	−0.406	−0.868	−0.843	0.622	0.658

注: \* 表示 0.05 水平(双侧)上显著相关, \* \* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

本研究发现,除 33%降水处理 120—160 cm 土层、100%降水处理 0—40 cm 土层和 133%降水处理 40—120 cm,160—200 cm 土层以及 166%降水处理的 80—200 cm 土层外,土壤含水量与降雨量、温度均呈正相关关系。减雨处理下土壤水分与温度的相关性土层较增雨处理的浅,说明减雨处理下温度对浅层

土壤含水量有显著影响。66%降水处理的土层土壤含水量与植被高度的正相关土层(0—160 cm)的分布浅于增水处理的土层(80—200 cm),表明增雨处理下深层土壤水和减雨处理下浅层土壤水可以促进荒漠草原植被的生长高度。减雨处理下植被盖度与频度的相关性可能强可能与一年生草本的盖度值较低有关<sup>[38]</sup>。



## 5 结论

在荒漠草原区,土壤含水量主要受降雨量的影响,且两者呈正相关关系。雨季后增雨处理的土壤水分表现出明显的滞后性,当自然降水减少时,正常降水处理更有利于土壤保水;降雨量对土壤含水量的影响主要集中在土壤浅层(0—40 cm),对深层影响较小;降水量多的月份(6—8月)土层深度对变异系数的影响大于降雨量对其的影响,降水较少的月份(9月和10月)深层土壤水分变异增大;166%降水处理能提高荒漠草原生产力,适度的减水(66%)和增水(133%)处理下,降雨量与各土层土壤含水量能保持较强的相关性且能增加荒漠草原植被高度;极度缺水情况下,浅层土壤水分与温度呈显著相关。

### 参考文献:

- [1] IPCC. Summary for Policymakers of the Synthesis Report of the IPCC Forth Assessment Report[R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Hsu P C, Li T, Murakami H, et al. Future change of the global monsoon revealed from 19 CMIP5 models[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(3):1247-1260.
- [3] 葛波,杜妍,常猛,等.不同降雨等级下杉木林土壤含水率和侧向流变化特征[J].水土保持研究,2019,26(2):161-166.
- [4] Chen L, Wei W, Fu B, et al. Soil and water conservation on the Loess Plateau in China: review and perspective[J]. Progress in Physical Geography, 2007, 31(4):389-403.
- [5] 王誉陶,李建平,井乐,等.模拟降雨对黄土高原典型草原土壤化学计量及微生物多样性的影响[J].生态学报,2020,40(5):1517-1531.
- [6] Ge R L, Gao R H. A study on moisture balance of artificial Haloxylon ammodendron forest in Kubuqi Desert[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2010, 31(3):125-129.
- [7] 马生花,谢应忠,胡海英,等.荒漠草原2种典型群落类型下土壤含水量与土壤粒径分布的关系[J].中国水土保持,2019(7):61-65.
- [8] 左小安,赵学勇,赵哈林,等.科尔沁沙地沙质草场土壤水分对干旱和降雨响应的空间变异性[J].水土保持学报,2005,19(1):140-144.
- [9] 尹秋龙,焦菊英,寇萌.极端强降雨条件下黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤水分特征[J].自然资源学报,2015, 30(3):459-469.
- [10] 车宗玺,李进军,汪有奎,等.祁连山西段草地土壤温度、水分变化特征[J].生态学报,2018,38(1):105-111.
- [11] Yang F T, Feng Z M, Wang H M, et al. Deep soil water extraction helps to drought avoidance but shallow soil water uptake during dry season controls the inter-annual variation in tree growth in four subtropical plantations[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 234/235:106-114.
- [12] 王正安,邸利,王彦辉,等.六盘山半干旱区华北落叶松林土壤水分对降雨的响应[J].干旱区资源与环境,2018,32(4):144-151.
- [13] 邱扬,傅伯杰,王军,等.土壤水分时空变异及其与环境因子的关系[J].生态学杂志,2007,1(1):100-107.
- [14] Entin J K, Robock A, Vinnikov K Y, et al. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2000, 105(D9):11865-11877.
- [15] Brocca L, Melone F, Moramarco T, et al. Spatial-temporal variability of soil moisture and its estimation across scales[J]. Water Resources Research, 2010, 46. DOI:10.1029/2009WR008016.
- [16] Matsui T, Omasa K, Horie T. The difference in sterility due to high temperatures during the flowering period among Japonica-Rice Varieties[J]. Plant Production Science, 2001, 4(2):90-93.
- [17] 符娜,宋孝玉,夏露,等.黄土区人工林地土壤水分对气候特征的响应[J].排灌机械工程学报,2019,37(2):160-165.
- [18] 沈志强,华敏,卢杰,等.西藏拉萨河谷山地土壤水分对降雨的响应[J].中国农村水利水电,2016(10):104-107,115.
- [19] 李小英,段争虎.基于 SMOS 的黄土高原区域尺度表层土壤水分时空变化[J].中国沙漠,2014,34(1):133-139.
- [20] 苏莹,陈林,李月飞,等.荒漠草原不同类型土壤水分时空变化特征[J].干旱区研究,2018,35(6):1308-1316.
- [21] 方楷,宋乃平,魏乐,等.荒漠草原不同地形条件下土壤水分和地上生物量的时空分异[J].干旱区研究,2012, 29(4):641-647.
- [22] 郭天斗,赵亚楠,周玉蓉,等.宁夏东部荒漠草原灌丛引入过程中土壤呼吸响应特征[J].草业科学,2019, 36(12):3052-3064.
- [23] 陈晓莹,陈林,宋乃平,等.荒漠草原两种类型土壤的水分动态对比[J].应用生态学报,2020,31(5):1560-1570.
- [24] 陈娟.荒漠草原土壤水分对降水的响应[D].银川:宁夏大学,2019.