

黄土高原植被演替过程中土壤水分亏缺

张永旺¹, 万珊珊¹, 王俊¹, 魏瑶瑶¹, 屈亚潭¹,
刘世鹏¹, 常海飞¹, 王妍¹, 上官周平²

(1.延安大学 生命科学学院, 陕西 延安 716000; 2.中国科学院 教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨陵 712100)

摘要:土壤水分亏缺在黄土高原植被恢复过程中表现较为严重,这对黄土高原的生态恢复与植被建设造成了很大的障碍。只有充分了解黄土高原的土壤水分特征及其亏缺状况,才能为植被恢复提供参考。对陕北黄土高原典型次生林地和草地的土壤水分进行了测量,对雨季和非雨季的山杨、沙棘、辽东栎和撂荒地土壤水分亏缺特征进行了定量评价。结果显示:3种林地 0—500 cm 土层的土壤含水量与储水量随着土层深度的增加都呈先增加后缓慢下降,撂荒地随着土层深度增加呈增加趋势,且其含水量与储水量是最高的。不同恢复植被的土壤含水量与储水量大小顺序为:撂荒地>沙棘>山杨>辽东栎。与撂荒地相比,3种林地的相对亏缺指数顺序为:辽东栎>山杨>沙棘,雨季的土壤亏缺状况较非雨季严重,植被类型、土壤质地和土层深度是影响植被演替过程中土壤水分亏缺状况的关键因子。

关键词:土壤水分亏缺;次生林地;植被类型;黄土高原

中图分类号:S154.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)05-0120-06

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2020.05.017

Soil Water Deficit During Vegetation Succession on the Loess Plateau

ZHANG Yongwang¹, WAN Shanshan¹, WANG Jun¹, WEI Yaoyao¹,

QU Yatan¹, LIU Shipeng¹, CHANG Haifei¹, WANG Yan¹, SHANGGUAN Zhouping²

(1.College of Life Sciences, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Soil water deficit is serious during the vegetation restoration on the Loess Plateau, which causes great obstacle to ecological restoration and vegetation construction on the Loess Plateau. Only by fully understanding the characteristics of soil moisture and its deficiency on the Loess Plateau can provide a theoretical basis for vegetation restoration. In this study, soil water contents of typical secondary forest and grassland on the Loess Plateau were measured, and soil water storage capacity and soil water deficit on the *Populus davidiana* Dode, *Hippophae rhamnoides* (Linn.), *Quercus liaotungensis* Koidz woodland and layland in rainy and non-rainy seasons were quantitatively evaluated. The results showed that the soil moisture contents and water storage capacities in the 0—500 cm soil layer of the three kinds of forestlands increased first and then declined slowly with the increase of soil depth, and those at the layland increased with the increase of soil depth, and the water content and water storage capacity were the highest; The soil water content and water storage of different restored vegetation decreased in the order: layland > *Hippophae rhamnoides* (Linn.) > *Populus davidiana* Dode > *Quercus liaotungensis* Koidz woodland; compared with the layland, the relative deficit index of three kinds of woodlands decreased in the order: *Quercus liaotungensis* Koidz > *Populus davidiana* Dode > *Hippophae rhamnoides* (Linn.) woodland, the soil deficit in the rainy season was more serious than that in the non-rainy season; vegetation type, soil texture and soil depth are the key factors affecting soil water deficit during the vegetation succession.

Keywords: soil water deficit; secondary forest; vegetation type; Loess Plateau

收稿日期:2019-11-22

修回日期:2019-12-05

资助项目:国家自然科学基金(41807520);陕西省自然科学基金研究计划(2018JQ3074);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金(A314021402-1813);延安大学科研项目(YDQ2018-21);博士科研启动项目(YDBK2017-25);陕西省教育厅专项科研计划项目(16JK1861);大学生创新创业训练项目(201813066);延安大学引导项目(YDY2017-09);陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(16JS118)

第一作者:张永旺(1988—),男,河南省林州市人,讲师,博士,主要从事生态水文方面研究。E-mail:yongwang19880405@163.com

通信作者:上官周平(1964—),男,陕西扶风人,硕士,研究员,主要从事生态学方面研究。E-mail:shangguan@ms.iswc.ac.cn

土壤水分是影响陆地植被生态系统和生物生长发育的重要因子^[1],位于中国中部偏北部的黄土高原,属于干旱大陆性季风气候,是世界水土流失最严重和生态最脆弱的地区之一。近年来我国虽在大规模实施退耕还林还草项目上取得了显著成果^[2-3],但由于该地区“低降水,高蒸发”的气候条件,以及植被恢复过程中分配不合理,导致土壤含水量低,甚至出现干层现象^[4-5],造成不同深层土壤亏缺现象严重的情况^[6-8]。这一现象对于黄土高原植被恢复与生态修复非常不利。目前不同土地利用方式的土壤水分亏缺的研究在国内外都是热点^[9-11],学者在评价土壤水分亏缺的探究中提出了土壤干化指数^[12]。开展植被恢复过程中不同植被类型的土壤水分亏缺研究对陕北高原生态环境恢复具有重要意义。

研究不同植被土壤水分的时空分布特征^[13]对于了解土壤缺水状况、防止生态环境退化,并合理有效地发展林业和进行生态恢复非常重要。目前有关黄土高原不同植被类型、土壤水分剖面垂直分布和空间分布格局的研究较多^[14],但对植被恢复过程中的不同植被类型的土壤水分亏缺的评价和差异及季节性储水特征的研究存在不足。因此,本研究选择黄土高原植被恢复过程中的撂荒草地、次生山杨林、沙棘林和辽东栎林作为研究对象,探究植被恢复过程中的土壤储水量的时空变化特征,分析雨季和非雨季 0—500 cm 土壤剖面水分亏缺状况,以期为研究区的植被恢复和水资源管理提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于黄土高原子午岭林区的甘肃省合水县连家砭林场(108°31′—108°32′E,36°03′—36°05′N),属中温带大陆性季风气候区。全年降雨量 560~590 mm,主要集中在 7—9 月份,海拔 1 211~453 m。土壤为次生黄土^[15]。本次研究选取撂荒草地、次生山杨林、沙棘林和辽东栎林进行土壤水分测定,分别测定其在 5 月、7 月、9 月、11 月的土壤储水量和水分亏缺值。

1.2 试验方法

于 2018 年 5—11 月每月月初采用土钻取土。在每个样地中选取标准木,然后在树冠边缘距树干 2/3 处打钻取土样,取样深度为 10,20,30,40,50,60,70,80,90,100,120,140,160,180,200,220,240,260,280,300,320,340,360,380,400,420,440,460,480,500 cm。采用烘干法测定土壤含水量,在 105℃ 高温条件下,烘 6~8 h,达到恒重即可。

1.3 土样采集与分析

研究区主要植被为阔叶林和针叶林,顶级群落为辽东栎(*Quercus liaotungensis* Koidz),群落覆盖度为 80%~95%,在子午岭林区,历史资料记载天然次生林是从 18 世纪 60 年代弃耕地上开始发展^[16]。所以本次研究主要选取撂荒草地、山杨、沙棘、辽东栎为研究对象,在每个群落设样方 5 个,设乔木样方为 20 m×20 m,灌木样方为 5 m×5 m,撂荒地样方为 2 m×2 m,共设样方 15 个。样地信息可见表 1。

表 1 样地信息

群落	树龄/a	黏粒含量/%	粉粒含量/%	砂粒含量/%
撂荒草地	—	13.31±0.04	33.25±0.10	53.44±0.14
沙棘林	27	11.51±0.04	30.94±0.13	57.55±0.16
山杨林	30	12.84±0.04	30.51±0.08	56.65±0.10
辽东栎林	35	12.40±0.04	34.11±0.09	53.49±0.10

1.4 数据分析方法

1.4.1 土壤储水量指土壤中含水的绝对数量^[17]

$$W_i = M_i \times D_i \times h \times 10/100 \quad (1)$$

式中: i 表示土层序列; W_i 表示土壤储水量(mm); D_i 表示土壤容重(g/cm^3); h 表示土层深度(cm); M_i 表示土壤含水量(%)。

1.4.2 不同样地间土壤水分相对亏缺程度^[17]

$$PD = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{W_{ci} - W_i}{W_{ci} - W_m}}{k} \quad (2)$$

式中:PD 表示样地土壤水分相对亏缺指数; W_i 表示样地第 i 土层土壤储水量(mm); W_{ci} 表示对照样地即多年撂荒地第 i 层土壤储水量(mm); W_m 表示萎蔫系数对应的土壤储水量(mm); k 表示样地土层的分层数。

1.5 数据处理方法

数据分析使用 Excel 2019,利用 SPSS 16.0 进行单因素(ANOVA)方差分析,利用 Sigmaplot 10.0 和 OriginPro 8 进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型土壤含水量特征分析

如图 1 所示,沙棘、山杨和辽东栎林的土壤含水量随土层深度的增加呈先增加后缓慢下降趋势,撂荒地呈不稳定状态,但所有林地整体随土层深度增加一直处于上升趋势,辽东栎含水量最低。在 5 月份非雨季的这种表现的最明显,从折线图可以看出 5 月份 3 种林地的土壤含水量的峰值大都集中在 160 cm,范围为 15%~25%。进入雨季的 7 月份土壤含水量显著高于非雨季的 5 月份,峰值分布点不一样,沙棘林出现在 140 cm,山杨林出现在 100 cm,而辽东

栎林出现在 80 cm, 范围为 17%~30%。雨季 7 月份的土壤含水量在过了峰值点之后随土层深度增加而下降的趋势较明显。雨季 9 月份的土壤含水量是 4 个月份中最稳定也是最高的月份, 除地表含水量低外其余深度含水量都较高且稳定。非雨季 11 月份含水量相较于雨季 9 月份呈现下降趋势。除辽东栎外,

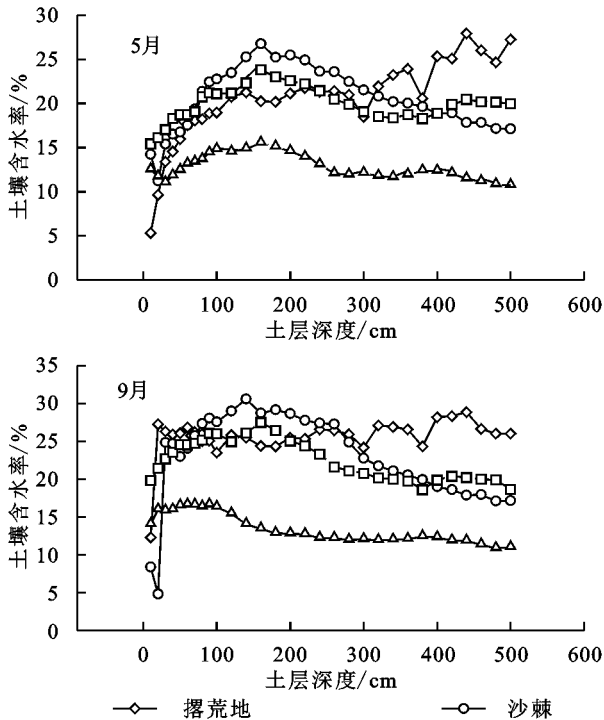
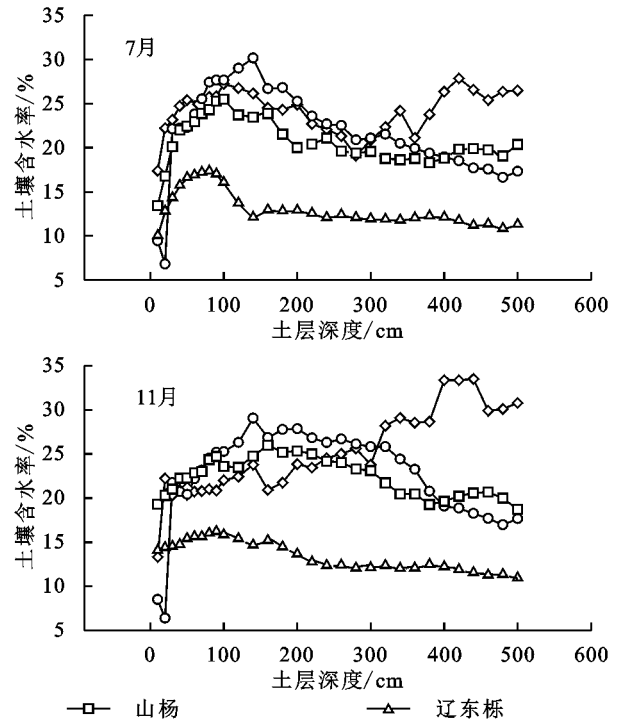


图 1 不同植被类型不同月份土壤含水量

2.2 不同植被类型土壤储水量的特征分析

从图 2 折线图可以看出 3 种林地的土壤储水量随土层深度变化的趋势与含水量随土层深度变化的趋势一致, 随着土层深度的增加呈先增加后缓慢下降的趋势, 撂荒地呈现不稳定且随土层深度呈上升趋势。图中土壤储水量的一个显著特点是在 100 cm 深度这一点后 3 种林地与撂荒地的储水量都出现了急速上升的趋势 (原因是因为 100 cm 之前都是以 10 cm 为测量单位, 100 cm 之后变成了 20 cm), 上升之后又出现了缓慢下降的趋势。从储水量分布图来看, 撂荒地的最高, 次之是沙棘, 然后是山杨, 最后是辽东栎, 与含水量情况一致。从图 3 不同植被每米深度土壤储水量可以看出, 撂荒地的土壤含水量在非雨季和雨季都呈现随土层加深而升高的现象, 但是此现象在非雨季较雨季更显著, 且 300 cm 以下土层每米的土壤储水量撂荒地是最高的。在 0—500 cm 的 5 个土层中, 随着植被恢复从灌木林 (沙棘) 到乔木林初始阶段 (山杨林) 再到乔木林顶级阶段 (辽东栎林) 呈显著下降的趋势, 除非雨季 5 月份的 0—100 cm 土层外, 辽东栎的储水量是最低的; 400 cm 以上, 3 种植被的雨季和非雨季的沙棘的

0—500 cm 土层雨季 9 月份和非雨季 11 月份的平均土壤含水量为 25% 左右。撂荒地土壤含水量明显高于其他 3 种林地。整体从 4 个月份来看, 撂荒地的土壤含水量一直都处于较高水平, 其次是沙棘林, 然后是山杨林, 辽东栎林的土壤含水量最低。



土壤储水量是最高的, 山杨次之。总的来说, 3 种植被在雨季的土壤储水量高于非雨季。

2.3 不同植被类型不同亏缺指数特征研究

不同植被的土壤水分亏缺指数可以用来表示土壤水分的亏缺程度。从图 4 不同植被不同月份土壤水分相对亏缺指数来看, 不论那个月份辽东栎的亏缺指数都是最高的, 亏缺指数越大, 亏缺现象越明显, 缺水情况越严重, 其次是山杨, 最后是沙棘, 这与图 1 和图 2 呈现的辽东栎林土壤含水量与储水量最低, 沙棘最高, 山杨次之相对应, 说明植被的土壤水分亏缺程度与其储水量和含水量呈反比。从图中可以看出, 土壤水分亏缺指数在非雨季的 5 月份和 11 月份要低于雨季的 7 月份和 9 月份, 说明在植被生育期内的旺盛生长期且是雨季的 7 月份和 9 月份的土壤亏缺情况较 5 月份和 11 月份严重。相较撂荒地而言, 辽东栎林的土壤从 5 月份到 11 月份处于持续亏缺状况, 但其亏缺状况有变化, 从 5 月份到 7 月份亏缺加重, 从 7 月份往后亏缺有所减缓; 而沙棘和山杨只在 7 月份和 9 月份的 300 cm 以下的土层中稍见亏缺, 在所有月份中 300 cm 以上的土层中土壤亏缺指数为负值,

说明不存在亏缺现象。雨季的土壤亏缺状况从整体

来看要比非雨季的严重。

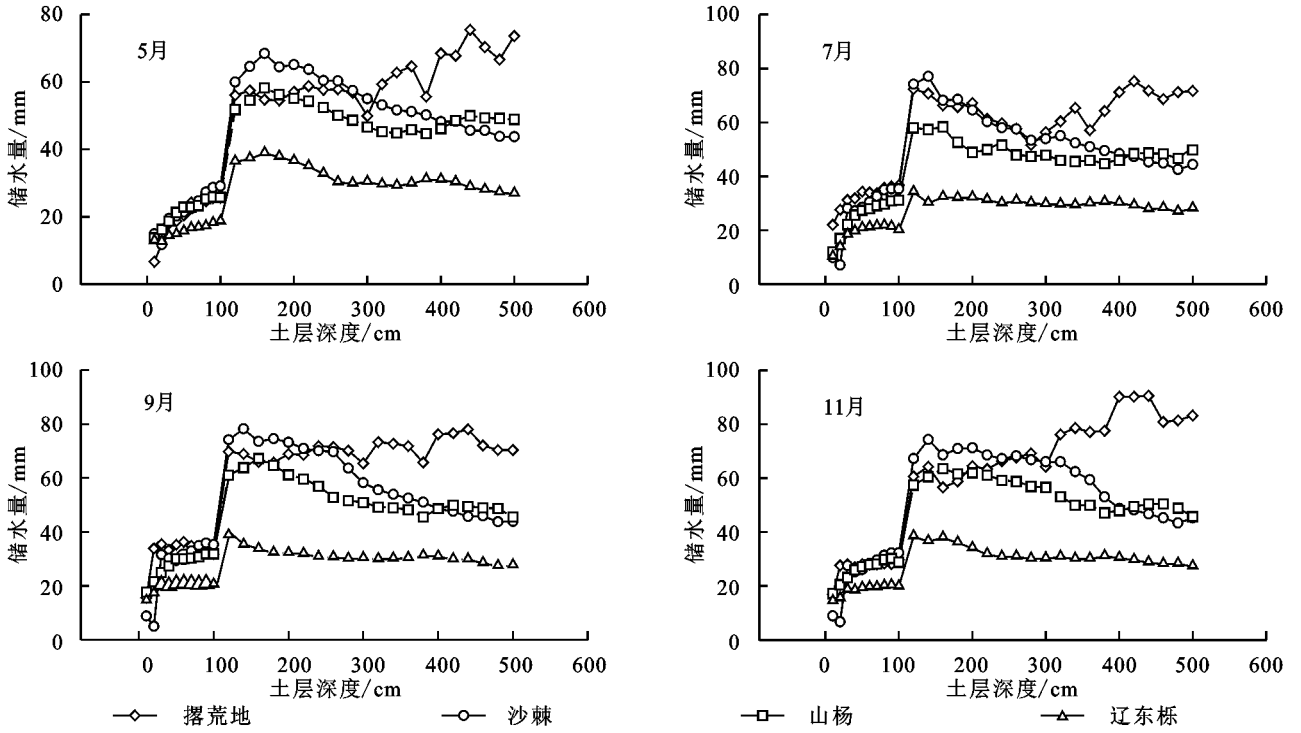


图 2 不同植被类型不同月份土壤储水量

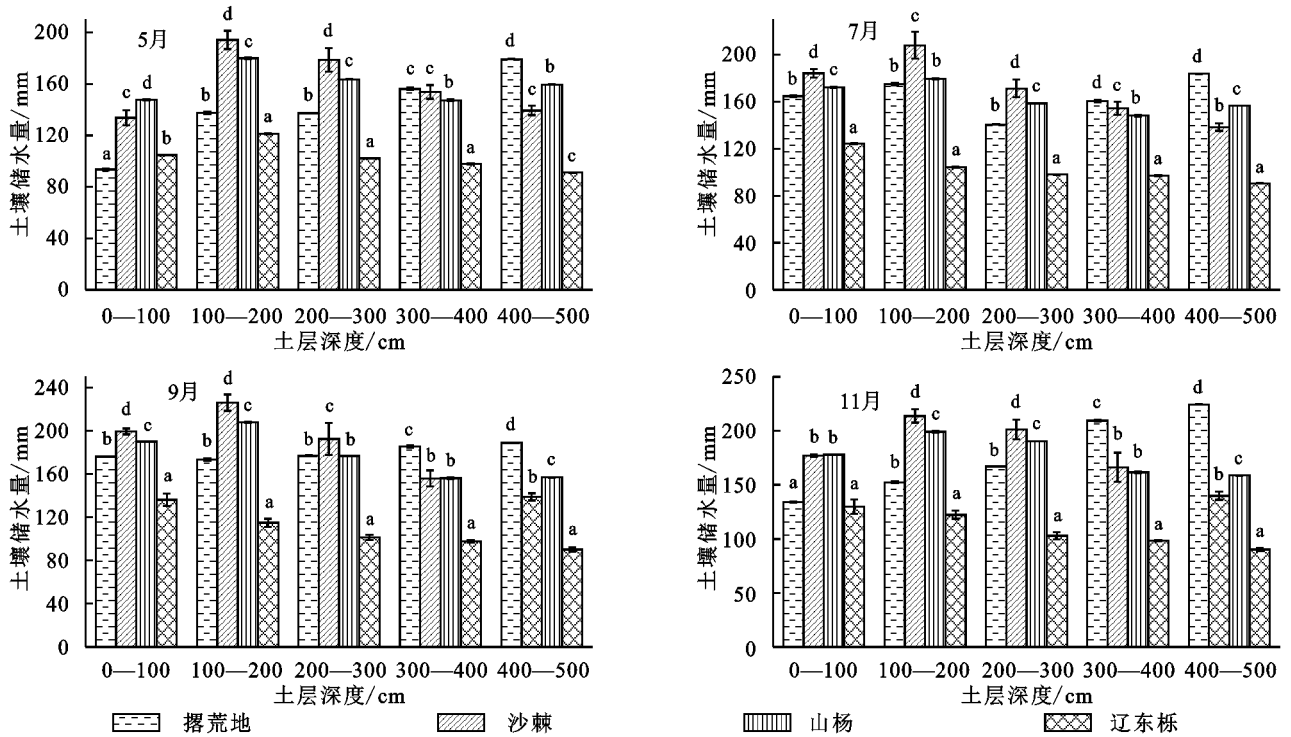


图 3 不同植被每米深度土壤储水量

2.4 分析不同植被相同深度相对亏缺显著性差异

从图 5 不同植被每米土层深度相对亏缺指数可以看出,在非雨季 5 月份 0—100 cm 土层中,山杨亏缺显著高于沙棘和辽东栎,且辽东栎没有亏缺现象,而在 100 cm 以下土层中,辽东栎的亏缺值显著高于沙棘和山杨,100—200,200—300 cm 土层中,沙棘显

著低于山杨,在 400—500 cm 土层中,沙棘显著高于山杨;在雨季 7 月份、9 月份和非雨季 11 月份,0—500 cm 的所有土层中都呈现出辽东栎林的亏缺值显著高于沙棘和山杨林,100—200,200—300 cm(9 月份除外)土层中,沙棘显著低于山杨,在 400—500 cm 土层中,沙棘显著高于山杨。

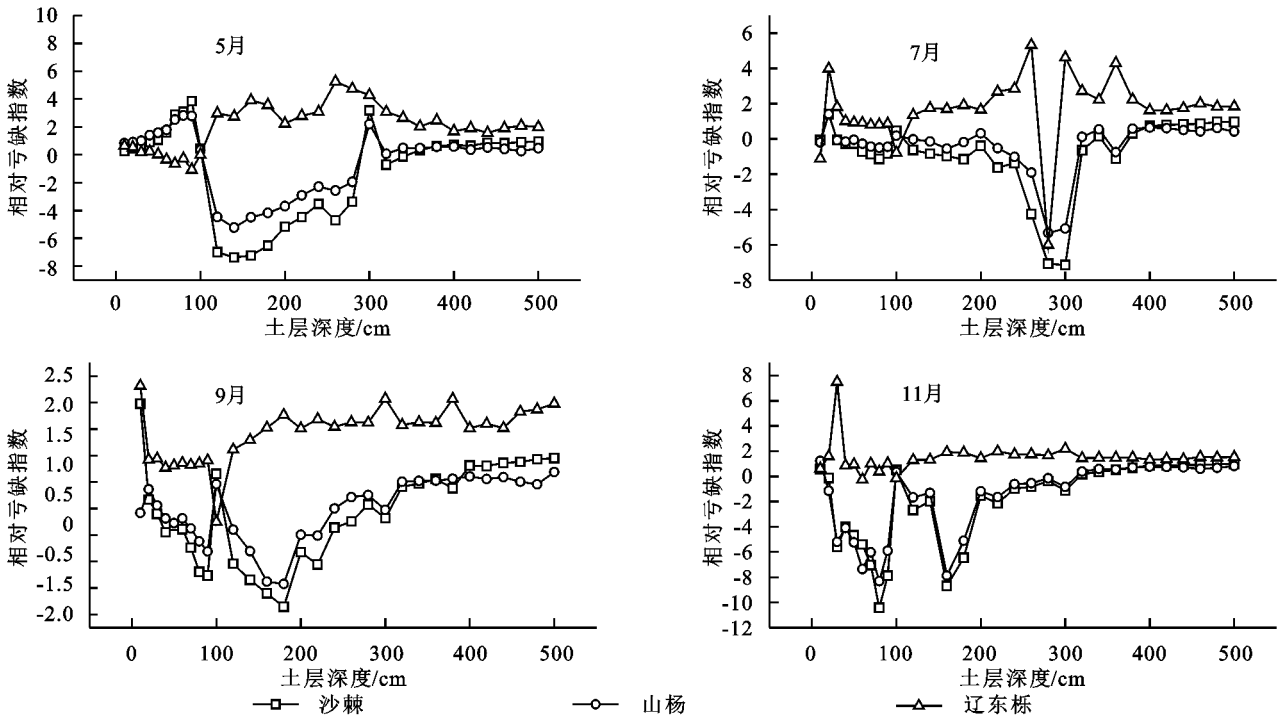


图 4 不同植被不同月份土壤水分相对亏缺指数

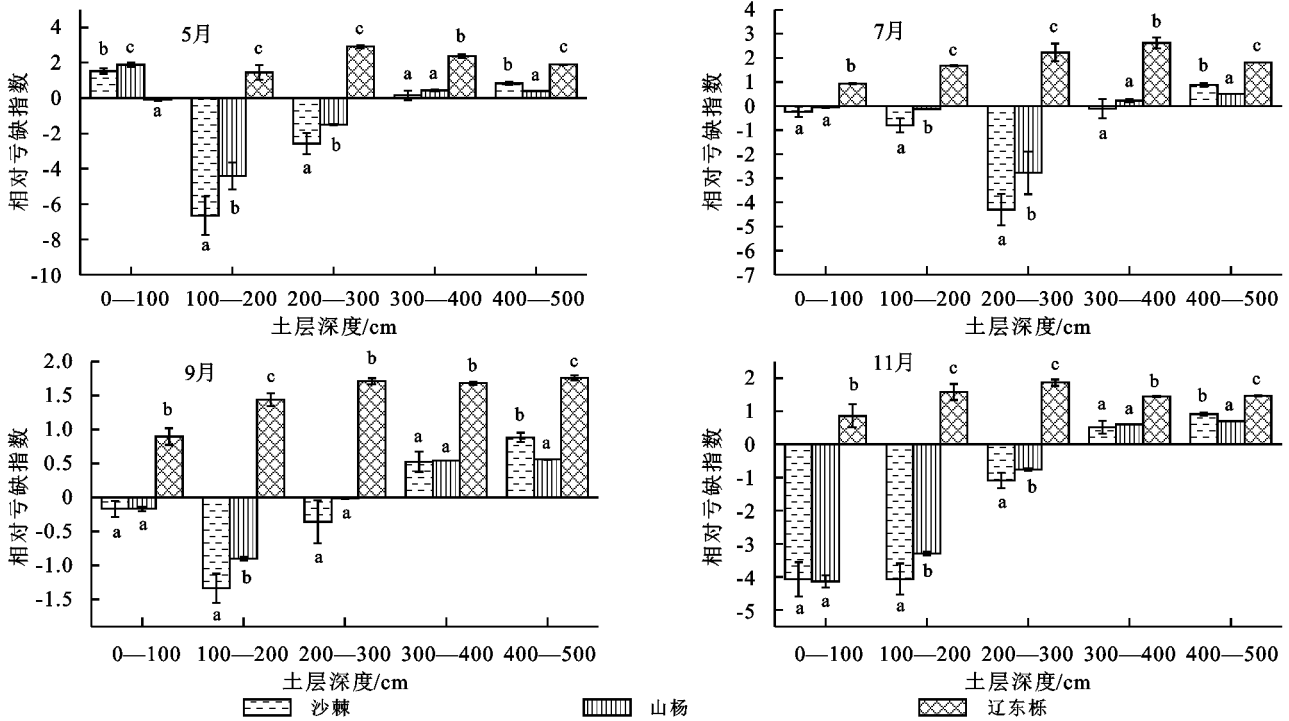


图 5 不同植被每米土层深度相对亏缺指数

3 讨论

3.1 植被对土壤水分特征的影响

不同植被由于其根系密度和深度的差异导致其消耗土壤水分的深度和强度不同,从而形成了不同植被林下土壤水分的差异^[18]。研究中,土壤含水量和土壤储水量随着自然植被恢复从撂荒草地到灌木林地再到乔木林地呈现逐渐下降的趋势,其原因可能是

由于随着植被恢复地上部生物量逐渐增大,枝叶更加繁茂,树体的蒸腾能力逐步增强,降水截留增多,树干径流增加,另外,地下部根系逐渐增多,分布增广,对土壤水分的吸收和消耗随之增多,从而引起土壤含水量和储水量的整体下降^[19-20]。研究中,不同植被的土壤水分亏缺现象,与撂荒草地相比,处于自然植被恢复顶级群落的辽东栎林的土壤水分相对亏缺显著高于植被恢复中期阶段的沙棘林和山杨林,且各植被的

土壤在雨季和非雨季都呈现出深层的亏缺程度较浅层严重,这是由于植被生长与土壤水分是相互作用的,辽东栎林较沙棘和山杨林消耗更多的水分,且降水由于其较强的树冠截留和降水的补给量较少,降水资源对土壤亏缺的缓解能力大大下降,更加不能对深层次的土壤补充水分,从而导致了深层次土壤的亏缺现象的加重,这与郭忠升和程积民等的研究结果^[21-22]一致,高宇等认为在黄土高原不同区域,由于植物耗水量高于降水量导致植物消耗大量土壤储水而可能出现土壤水分负平衡现象^[18],这也是产生土壤水分亏缺现象的一个重要原因。陈洪松等的研究结果也表明土壤储水量出现负补偿的深度会达到 300 cm 左右^[23],王力等的研究结果表明黄土高原的耗水量大于补充量所造成的亏缺现象是普遍存在的,其土壤特性和气象因子是造成亏缺的决定因素,并不是由生物利用导致的^[24]。

3.2 土壤特性对土壤水分特征的影响

土壤水分除了受植被类型的影响外,还受土层深度、颗粒组成、入渗和季节等的影响。Yang 等的研究表明,随着植被恢复,土壤含水量显著降低,不同植被下土壤水分在表层差异不显著,在深层却显著不同,且在土壤深层的土壤水分表现一定的时间稳定性^[25],这与本研究的结果一致,本研究中,撂荒草地的土壤含水量与储水量呈逐渐上升的趋势,这可能由于随着土层的加深,草地的根系越来越少,对水分的消耗就相应地减少了,而沙棘、山杨和辽东栎林的土壤含水量和储水量呈先升高后下降的趋势,而拐点在 150 cm 左右的土层深度,这可能是由于在 150 cm 左右深度的土层中,根系逐步变得密集,并且其入渗深度有限,不能及时地补充到下层土壤中,从而使下层的土壤含水量不断下降,甚至出现干层。另外,本研究中的非雨季的土壤储水量显著低于雨季的土壤储水量,但与撂荒草地相比,灌木林地和乔木林地在雨季的土壤水分亏缺现象比非雨季的明显,表明雨季的降水资源较非雨季增多,较多的降水在一定程度上增加了土壤表层的储水量,缓解了表层的亏缺状况,但是其入渗深度不够,加之雨季虽降水较多,其正值旺盛生长期,耗水量较非雨季要多,所以其深层次的亏缺状况并没有明显改善,在雨季深层次的土壤储水量要低于非雨季。另外,相同土层撂荒草地的土壤含水量要高于灌木林地和乔木林地,这与 Yang 等的研究结果^[26]一致,这可能是由于土壤黏粒含量在撂荒草地中较高,而砂粒在灌木林地和乔木林地中较高,黏粒较砂粒能吸收更多的水分^[27],这也是导致灌木林

地和乔木林地的土壤水分亏缺高于撂荒草地的另一个原因。因此,植被类型、土壤质地和土层深度是影响植被演替过程中土壤水分亏缺状况的关键因子。

4 结论

(1) 沙棘、山杨和辽东栎林的土壤含水量随土层深度的增加呈先增加后缓慢下降趋势,撂荒草地呈不稳定状态,但整体随土层深度增加一直处于上升趋势。在雨季和非雨季,撂荒草地的土壤含水量一直都处于较高水平,其次是沙棘林,然后是山杨林,辽东栎林的土壤含水量最低,从非雨季到雨季,草、灌和乔木林地的剖面土壤含水量的峰值逐渐上移。

(2) 与撂荒草地相比,辽东栎林的土壤水分亏缺状况最严重,且从 5 月份到 11 月份处于持续亏缺状况,其次是山杨,最后是沙棘,另外,植被生育期内的旺盛生长期且是雨季的 7 月份和 9 月份的土壤亏缺情况较 5 月份和 11 月份严重,植被类型、土壤质地和土层深度是影响植被演替过程中土壤水分亏缺状况的关键因子。

参考文献:

- [1] Legates D R, Mahmood R, Levina D, et al. Soil Moisture: A central and unifying theme in physical geography[J]. *Progress in Physical Geography*, 2011,35(1):65-86.
- [2] 邵明安,贾小旭,王云强,等.黄土高原土壤干层研究进展与展望[J].*地球科学进展*,2016,31(1):14-22.
- [3] 李小英,段争虎.黄土高原土壤水分与植被相互作用研究进展[J].*土壤通报*,2013,43(6):1508-1514.
- [4] 赵景波,祁子云,魏君平,等.青海湖北土壤水分分布与土壤干层恢复[J].*地理科学进展*,2012,31(7):853-858.
- [5] 王力,卫三平,吴发启.黄土丘陵沟壑区土壤水分环境及植被生长响应:以燕沟流域为例[J].*生态学报*,2009,29(3):1543-1553.
- [6] 卞莹莹,宋乃平,王兴,等.荒漠草原区不同土地利用方式下土壤水分相对亏缺[J].*水土保持学报*,2015,29(1):201-207.
- [7] 刘庚,牛俊杰,朱炜歆,等.晋西北黄土丘陵区人工林地土壤水分亏缺评价[J].*水土保持通报*,2015,35(5):309-314.
- [8] Li Yan, Yehezkel C, Roni W, et al. On quantifying soil water deficit of a partially wetted root zone by the response of canopy or leaf conductance[J]. *Agricultural Water Management*, 2004,65(1):21-38.
- [9] Michelot A, Nathalie Breda, Damesin C, et al. Differing growth responses to climatic variations and soil water deficits of *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in a temperate forest[J]. *Forest Ecology & Management*, 2012,265(1):161-171.

(下转第 132 页)

- [5] 袁祝香,杨雪艳,刘玉汐,等.松辽流域 1961—2017 年极端降水变化特征[J].水土保持研究,2019,26(3):199-203,212.
- [6] 杜华明,贺胜英.岷江流域降水特征与旱涝灾害趋势分析[J].水土保持研究,2015,22(1):153-157..
- [7] 罗那那,巴特,巴克,等.基于标准化降水指数的北疆地区近 52 年旱涝变化特征[J].水土保持研究,2017,24(2):293-299.
- [8] 李烁阳,刘小燕,杨贵羽,等.湖北省降水及旱涝时空分布特征分析[J].水土保持研究,2019,26(2):202-207.
- [9] 吴贵蜀.农牧交错带的研究现状及进展[J].四川师范大学学报:自然科学版,2003(1):108-110.
- [10] 赵唯茜,杜华明,董廷旭,等.2005—2014 年南方农牧交错带净初级生产力时空分布特征[J].水土保持研究,2018,25(6):236-241.
- [11] 傅伯杰.景观生态学原理及应用[M].北京:科学出版社,2001.
- [12] 胡甲秋,杨云川,邓思敏,等.基于多尺度 SPI 的广西干湿特征与未来趋势[J].水土保持研究,2018,25(5):319-324,336.
- [13] 马佳宁.近 50 年黄河上游流域年均降水与极端降水变化分析[J].高原气象,2019,38(1):124-135.
- [14] 汤国安. ArcGIS 地理信息系统空间分析试验教程.第 2 版[M].北京:科学出版社,2012.
- [15] Bonaccorso B, Bordi I, Cancelliere A, et al. Spatial Variability of Drought: An Analysis of the()SPI in Sicily[J]. Water Resources Management, 2003, 17(4): 273-296.
- [16] 中国气象局.气象干旱等级:GB/T 20481—2017[M].北京:中国标准出版社,2018:3.

(上接第 125 页)

- [10] Raiio G, Provenzano G. Modelling eco-physiological response of table olive trees to soil water deficit conditions[J]. Agricultural Water Management, 2012,120(2):79-88.
- [11] Mengistu D K. The influence of soil water deficit imposed during various developmental phases on physiological processes of tef[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009,132(3/4):283-289.
- [12] 李军,陈兵,李小芳,等.黄土高原不同干旱类型区苜蓿地深层土壤干燥化效应[J].生态学报,2007,27(1):75-89.
- [13] 朱炜歆,牛俊杰,刘庚,等.植被类型对生长季黄土区土壤含水量的影响[J].干旱区资源与环境,2016,30(1):152-156.
- [14] 韦红波,李锐,杨勤科.我国植被水土保持功能研究进展[J].植物生态学报,2002,26(4):489-496.
- [15] 张平仓,郑粉莉.土壤侵蚀与生态环境演变[J].中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊,1993,1(3):11-16.
- [16] Wang Y, ming'an Shao, Shao H. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2010,381(1/2):9-17.
- [17] 杨磊,卫伟,莫保儒,等.半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺[J].生态学报,2011,31(11):3060-3068.
- [18] 高宇,樊军,彭小平,等.水蚀风蚀交错区典型植被土壤水分消耗和补充深度对比研究[J].生态学报,2013,34(23):7038-7046.
- [19] Wang Y, Shao M, Liu Z, et al. Regional spatial pattern of deep soil water content and its influencing factors [J]. Hydrological Sciences Journal, 2012,57(2):265-281.
- [20] Wang, Y, Liu, et al.. Vertical distribution and influencing factors of soil water content within 21-m profile on the Chinese Loess Plateau[J]. Geoderma, 2013, 193:300-310.
- [21] 郭忠升.半干旱区柠条林利用土壤水分深度和耗水量[J].水土保持通报,2009,29(5):69-72.
- [22] 程积民,万惠娥,王静,等.黄土丘陵半干旱区天然草地土壤水分调控研究[J].草地学报,2003,11(4):296-300.
- [23] 陈洪松,邵明安,王克林.黄土区荒草地和裸地土壤水分的循环特征[J].应用生态学报,2005,16(10):1853-1857.
- [24] 王力,邵明安,王全九,等.黄土区土壤干化研究进展[J].农业工程学报,2004,20(5):27-31.
- [25] Yang L, Wei W, Chen L, et al. Response of temporal variation of soil moisture to vegetation restoration in semi-arid Loess Plateau, China[J]. Catena, 2014,115:123-133.
- [26] Yang L, Wei W, Chen L, et al. Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2012, 475:111-122.
- [27] Satyanaga A, Rahardjo H, Leong E C, et al. Water characteristic curve of soil with bimodal grain-size distribution[J]. Computers & Geotechnics, 2013,48(3):51-61.