

黄土高原植被恢复过程中土壤水分有效性评价

张永旺¹, 王俊¹, 屈亚潭¹, 刘世鹏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 杨凌, 712100)

摘要:【目的】探究土壤持水性与土壤水分有效性对不同植被(草地、灌木林地和乔木林地)的响应。【方法】在位于黄土高原腹地的子午岭林区, 利用土壤水分特征曲线测定了植被恢复过程中3种不同恢复年限的植被下的土壤持水性和土壤水分有效性。【结果】植被恢复过程中的土壤持水性和土壤水分有效性从草地到灌木林地再到乔木林地呈上升趋势。【结论】影响土壤水分特征的关键因子是土壤颗粒组成、土壤体积质量和土壤孔隙度。该结果可为植被恢复过程中土地利用类型的规划提供理论参考。

关键词: 植被类型; 土壤水分特征曲线; 黄土高原; 土壤持水性; 土壤水分有效性

中图分类号: S15

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2019418

张永旺, 王俊, 屈亚潭, 等. 黄土高原植被恢复过程中土壤水分有效性评价[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(6): 79-85, 114.
ZHANG Yongwang, WANG Jun, QU Yatan, et al. Evaluating Bioavailable Soil Water during Vegetation Restoration in the Loess Plateau [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(6): 79-85, 114.

0 引言

土壤是维持地球表面生态系统的重要物质基础, 能为人类提供生活和生产原材料^[1]。但是, 全球范围内的土壤侵蚀, 尤其是在中国黄土高原, 已经成为重要的生态环境问题, 制约着人类的生存和发展, 严重制约全球经济和社会的发展^[2]。控制土壤侵蚀能够改善生态环境, 保护生态安全, 实现可持续发展和人与自然平衡和谐^[3]。植被恢复是控制土壤侵蚀的一个较好措施。近年来, 随着国家退耕还林还草政策的实施, 黄土高原水土流失已显著减少^[4]。【研究进展】土壤水分是制约植物生长发育的物质基础^[5], 其作为调控植被群落演替的主要因子, 在长期的植被恢复和重建的过程中影响着植被群落的结构和丰富度。随着植被恢复, 土地利用类型的变化能够改变根系固氮, 从而影响土壤表层物种的丰富度和组分, 改善土壤物理性质, 最终改变表层特征。植被恢复同时也引起了土壤水分特征的变化。土壤水分特征曲线能够表征土壤的

基本特性, 是进行土壤水分运动及溶质运移定量分析时必不可少的重要参数^[6], 土壤水分特征曲线能够表示质量含水率与土壤吸力之间的关系^[7]。与传统方法相比, 利用土壤水分特征曲线测量土壤水分状况省时省工且真实可靠^[8]。代表土壤水分特征的2个重要参数土壤水分有效性和持水性可以用土壤水分特征曲线来进行测定。土壤水文条件与植被的光合速率、土壤碳分配、营养循环等密切相关^[9]。土壤持水性(SWHC)可表示土壤对植物生长发育的供水能力, 可以通过土壤水分特征曲线的测定来确定田间持水量与凋萎系数间的含水率的差值来计算^[10], 不仅可以估测土壤有效水, 还可以判断围绕在胶体微粒表面附近的低于永久萎蔫点的吸湿水^[11]。【拟解决的关键问题】目前, 黄土高原随着植被恢复土壤持水性的变化及影响因子的研究尚缺乏研究。除土壤持水性, 土壤水分有效性(SWA)是另一个非常重要的土壤水分特征, 它是指土壤水分被有效利用的程度, 在各因子综合作用下的动态特性, 能够影响植物生长发育和微生物呼吸等功能^[12]。土壤水分有效性与土壤温度、植物生长发育、根和土壤微生物呼吸、碳分配、叶片气孔导度和蒸腾作用的关系密切。但是, 长期的自然植被恢复过程中的不同恢复阶段的土壤水分有效性及其影响因子的研究存在不足。【切入点】子午岭林区面积约23 000 km², 其是黄土高原独有的具备完整自然植被恢复序列的次生林区, 本研究选择子午岭林区作

收稿日期: 2019-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807520); 陕西省自然科学基金研究计划项目(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项目(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)

作者简介: 张永旺(1988-), 男, 河南林州人。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。研究员, 硕士, 主要从事生态学方面研究。E-mail: shangguan@ms.iswc.ac.cn

为研究区来评价植被恢复过程中的土壤水分特征。假设土壤持水性和水分有效性在不同的恢复植被下的差异显著,旨在明确不同植被恢复阶段的土壤水分特征的变化并揭示其主要影响因子。【研究意义】该研究可为黄土高原植被恢复过程中的水资源合理有效地管理和植被恢复的可持续发展提供科学依据和理论参考。

1 材料与方方法

1.1 研究区概况

连家砭林场(35°03′—36°37′N, 108°10′—109°18′E)位于子午岭林区的中心位置的甘肃省东部,海拔

表 1 研究区不同植被恢复样地信息

Table 1 Information about plots of different vegetation types in study area

演替阶段 Succession stages	海拔/m Altitude	盖度/% Coverage	坡向 Aspect	坡度/° Slope	纬度 Latitude	经度 Longitude	主要植物种 Main plant species
草地 G	1 344	80	E	13	36°05′	108°33′	白羊草
灌木林地 S	1 338	85	E	14	36°03′	108°32′	沙棘
乔木林地 F	1 349	90	E	14	36°04′	108°34′	辽东栎

1.2 土壤采样与分析

本研究选择了 3 种样地(草地、灌木林地和乔木林地)作为研究对象。草地样方为 2 m×2 m,灌木林地样方为 5 m×5 m,乔木林地样方为 20 m×20 m。土壤样品从每个样地的表层分 5 个土层(10、20、30、40 和 50 cm)进行采样。原状土样需要先浸水 24 h,使土样充分饱和并称质量,再使用 HITACHI CR21G 离心机在 20 °C 温度下,在吸力为 0、0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.5、2.0、4.0、6.0、10.0×10⁵ Pa 的条件下测定土壤水分特征曲线^[16],由土壤水分特征曲线获得的土壤饱和含水率、田间持水率和萎蔫含水率可计算总孔隙度、无效孔隙、通气孔隙和毛管孔隙,土壤体积质量采用烘干法测定。

1.3 土壤水分特征参数测定

本研究的土壤持水性和水分有效性通过土壤水分特征曲线计算,由拟合曲线得出的 A 值可表示土壤持水性,获得的土壤孔隙可计算出水分有效性^[17]。土壤水分特征参数 A 值由以下公式获得:

$$W=AN^{-M}, \quad (1)$$

式中:W 为质量含水率(%);A 和 M 为幂函数当中的参数,A 值决定了曲线的高低,表示土壤持水性,即持水能力大小;M 为常数,决定了土壤含水率随土壤水势降低而递减的快慢;N 为土壤吸力(Pa)。

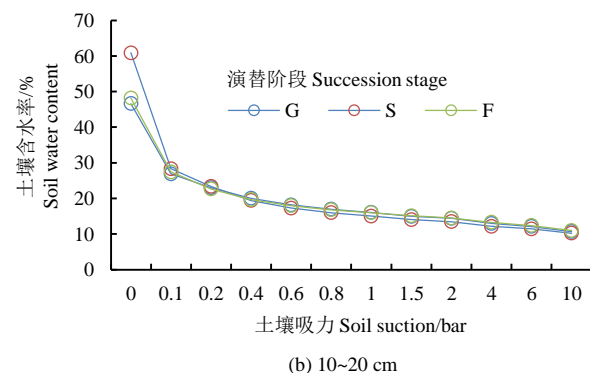
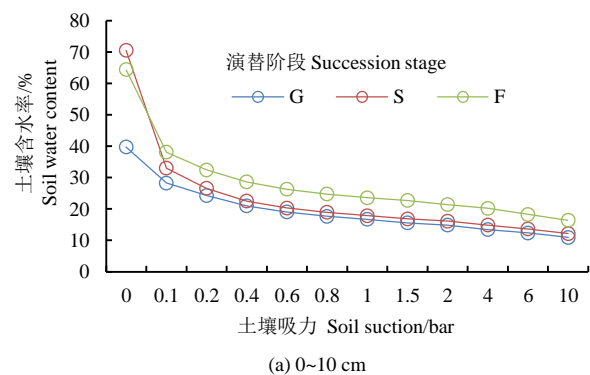
田间持水率为吸力在 -0.3×10^5 Pa 时的土壤含水率(SWC),萎蔫含水率在吸力为 -15×10^5 Pa 时的 SWC,速效水(RAW)和缓效水(SAW)的临界点为 -10×10^5 Pa 时的 SWC。RAW 为 $-0.3 \times 10^5 \sim -10 \times 10^5$ Pa

1 211~1 453 m,土壤为 50~100 m 厚的次生黄土^[13-14]。年均降雨量 587 mm,且季节性变化大。本研究区的天然次生林是从 18 世纪中期从弃耕地上发展起来的,先锋树种是山杨和白桦,辽东栎是顶级群落树种,沙棘是主要的灌木树种,白羊草、苔草和长芒草是主要的草本植物,主要土地利用类型是草地、灌木林地和乔木林地。草地、灌木林地和乔木林地的自然恢复年限分别为 15、60 和 150 a。自然植被恢复也是从草地到灌木林地再到乔木林地,恢复年限是通过年轮计数和查阅文献材料获得^[15]。不同植被恢复阶段的主要树种见表 1。

时 SWC,SAW 为 $-10 \times 10^5 \sim 15 \times 10^5$ Pa 的 SWC,总有效水(TAW)为 RAW 和 SAW 的总和,无效水(UAW)为低于 -15×10^5 Pa 时的 SWC^[18]。

1.4 数据分析

采用单因素方差分析来测定不同植被恢复阶段的土壤水分特征的差异性,使用 SPSS 16.0 进行统计分析,使用 Sigmaplot11.0 来制作回归曲线,使用 Excel 2003 进行数据处理。



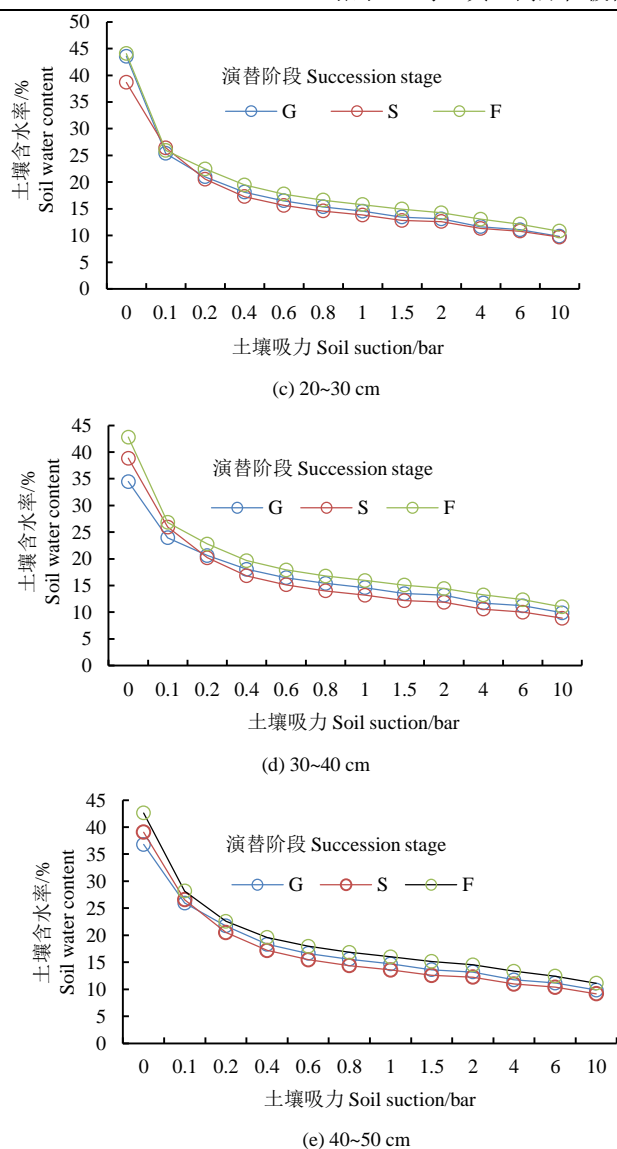


图1 不同恢复植被下的土壤水分特征拟合曲线

Fig.1 Soil water characteristic curves in different vegetation types

2 结果与分析

2.1 土壤水分有效性与持水性

不同植被恢复下不同土层的土壤水分特征曲线明显不同(图1)。从图1可以看出,SWC随着压力

的升高而降低, 2×10^5 Pa 作为一个临界点, 临界点过后, SWC 的降低趋势在所有的植被恢复阶段中都趋于平稳。在 20~50 cm 土层中, 土壤水分特征曲线在乔木林地最高, 在灌木林地最低, 在草地阶段居中, 而在 0~20 cm 土层中, 在草地恢复阶段低。不同植被恢复阶段下不同土层的土壤水分特征参数 A 同样呈差异显著(图2)。参数 A 值能够表示 SWHC 的强弱。由图中可以看出, 在乔木林地阶段, SWHC 最高且与灌木林地和草地恢复阶段相比, 差异显著($P < 0.05$), 而 SWHC 的差异在草地和灌木林地阶段无显著性。

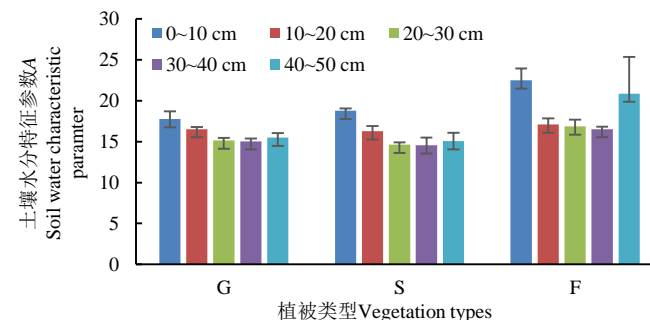


图2 不同恢复阶段的土壤持水性

Fig.2 Soil water holding capacity in different vegetation types

不同植被恢复下, 不同土层的总有效水(TAW)、速效水(RAW)、缓效水(SAW)和无效水(UAW)量差异显著(图3)。0~10 cm 土层, 草地中的 TAW 显著低于灌木林地和乔木林地 ($P < 0.05$), 灌木林地和乔木林地之间差异不显著; 10~20 cm 土层, 灌木林地的 TAW 显著高于草地和乔木林地 ($P < 0.05$), 草地和乔木林地之间差异不显著; 20~30 cm 土层, 3 种覆被条件无显著差异; 30~40 cm 土层, TAW 从草地到灌木林地再到乔木林地呈显著增加趋势; 40~50 cm 土层, TAW 在草地和灌木林地中显著低于乔木林地。RAW 和 SAW 在 0~50 cm 土层中的变化与 TAW 相似。UAW 在 3 种覆被条件下的 0~50 cm 土层与 TAW、RAW 和 SAW 相比是最高的, 并且在乔木林地中最高, 灌木林地和草地之间无显著差异。

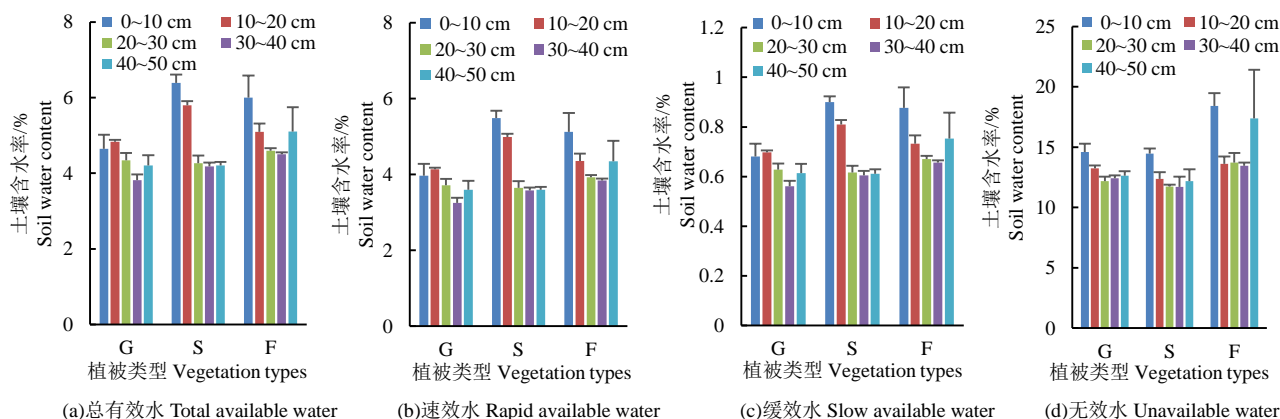


图3 不同恢复植被下的土壤水分有效性

Fig.3 Soil water availability in different vegetation types

2.2 土壤体积质量、颗粒组成和孔隙度

不同植被恢复阶段的土壤体积质量 (BD) 在不同土层中存在显著差异 (图 4)。0~20 cm 土层, 草地阶段的 BD 最高且差异显著, 20~50 cm 土层, 草地、灌木林地和乔木林地间的 BD 无显著差异。图 5 描述了不同恢复植被下的土壤颗粒组成差异。砂粒量 (0.02~2 mm) 随着植被恢复, 在 0~10 cm 土层显著增加, 而黏粒 (<0.002 mm) 和粉粒 (0.002~0.02 mm) 量却相反; 10~40 cm 土层中的黏粒量灌木林地<乔木林地<草地; 不同植被恢复阶段下的砂粒、粉粒和黏粒在 40~50 cm 土层中的差异不显著。

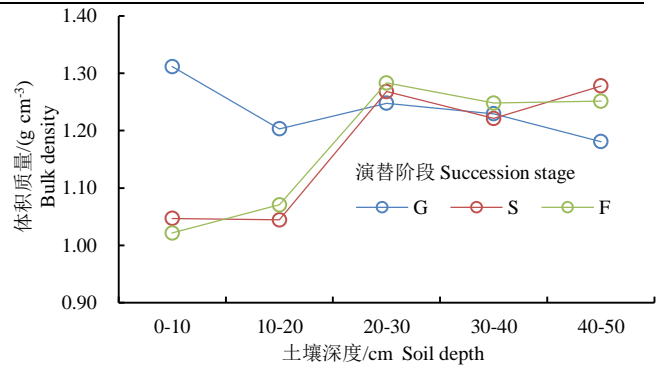


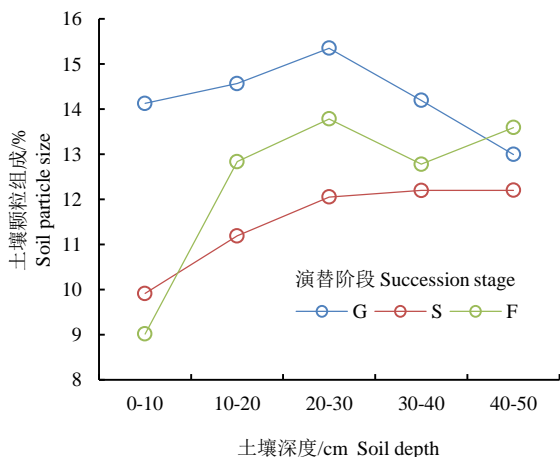
图 4 不同恢复植被下的土壤体积质量

Fig.4 Soil bulk densities in different vegetation types

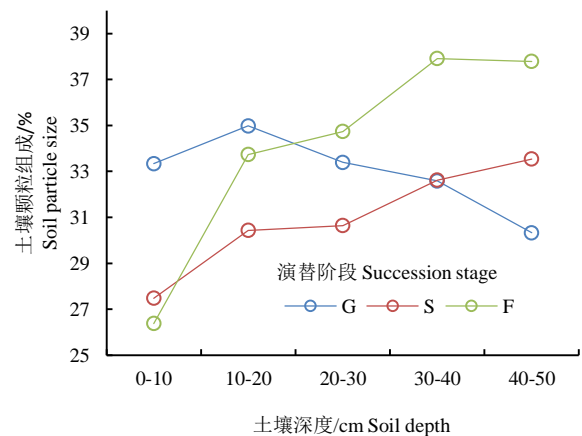
表 2 土壤持水性和有效性与其他因子间的相关性

Table 2 Correlation among soil water holding capacity, water availability and other factors

因子 Factors	因子 Factors	相关系数 Correlation index	因子 Factors	因子 Factors	行列相关性 Correlation index
总有效水	通气孔隙	0.70**	缓效水	粉粒	-0.68**
速效水	通气孔隙	0.68**	缓效水	砂粒	0.58*
无效水	无效孔隙	0.68*	缓效水	总孔隙度	0.70**
粉粒	体积质量	0.71**	缓效水	通气孔隙	0.64**
黏粒	体积质量	0.65**	缓效水	毛管孔隙	0.66**
砂粒	体积质量	-0.72**	缓效水	体积质量	-0.78**
持水性	总有效水	0.72**	总有效水	粉粒	-0.69**
持水性	速效水	0.71**	总有效水	砂粒	0.60*
持水性	缓效水	0.79**	速效水	总孔隙度	0.72**
持水性	无效水	0.99**	总有效水	毛管孔隙	0.68**
持水性	无效孔隙	0.58*	速效水	体积质量	-0.80**
持水性	总有效水	0.72**	总有效水	粉粒	-0.69**
持水性	速效水	0.71**	速效水	砂粒	0.60*



(a) 黏粒量 Clay content



(b) 粉粒量 Silt content

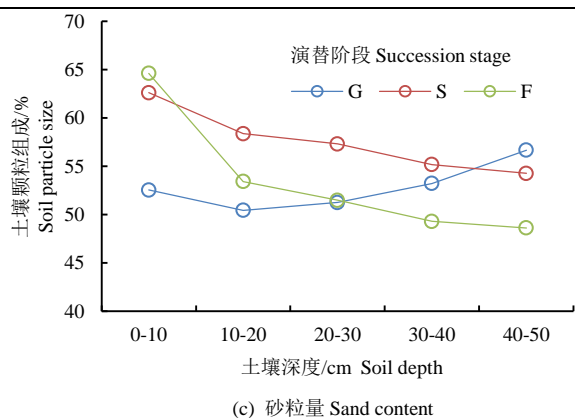


图5 不同恢复植被下的土壤黏粒、粉粒和砂粒量

Fig.5 Soil clay, silt and sand content in different vegetation types

2.3 土壤水分有效性、持水性与土壤特性间的关系

土壤水分特征曲线参数 A 值所代表的土壤持水性与土壤水分有效性、土壤孔隙度、土壤颗粒组成和土壤体积质量间呈显著相关性 (表 2)。从表 2 可以看出, 0~50 cm 土层, 不同植被恢复阶段中的 $SWHC$ 与 SWA 呈极显著正相关关系 ($P<0.01$)。代表土壤水分有效性的各个参数间显著正相关 ($P<0.05$)。无效孔隙与无效水显著正相关, 体积质量与黏粒和粉粒呈

极显著正相关 ($P<0.01$), 而与砂粒呈极显著负相关 ($P<0.01$), 黏粒量和 BD 与速效水和总有效水呈极显著负相关 ($P<0.01$), 而速效水和总有效水和通气孔隙与毛管孔隙极显著正相关 ($P<0.01$), $SWHC$ 与 IP 显著正相关 ($P<0.05$), 黏粒和体积质量与速效水显著负相关, 砂粒、总孔隙度、通气孔隙和毛管孔隙却与速效水显著正相关。

不同恢复植被下的土壤孔隙度见图 6。不同土层土壤孔隙度 (总孔隙度 (TP)、通气孔隙 (AP)、毛管孔隙 (CP) 和无效孔隙 (IP)) 在不同植被恢复阶段下差异显著。草地阶段, 0~30 cm 土层中的 TP 、 IP 和 CP 处于中等, 在 30~40 cm 土层中, TP 、 IP 、 AP 和 CP 最低; 灌木林地阶段, TP 、 AP 和 CP 在 0~10 cm 土层中最高, 而 IP 在 0~20 cm 土层中最低, 在 30~40 cm 土层中, TP 、 IP 、 AP 和 CP 居中, 而在 40~50 cm 土层中, TP 和 CP 最高; 乔木林地阶段, 在 10~20 cm 土层中, TP 和 CP 最低, 而在在 20~40 cm 土层中, TP 、 IP 和 CP 最高, 在 40~50 cm 土层中, IP 最高, AP 最低。

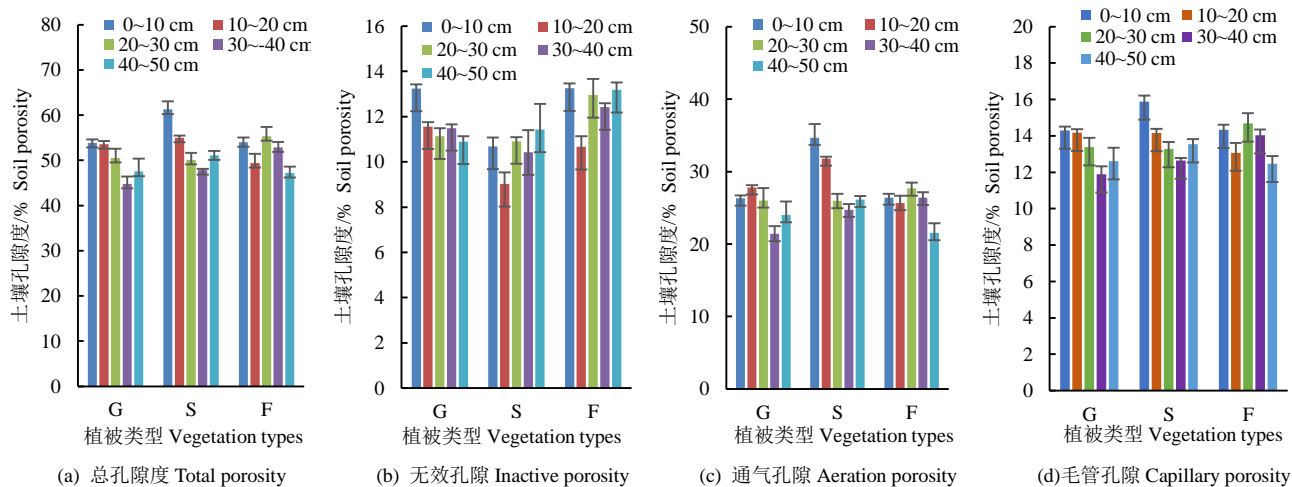


图6 不同恢复植被下的土壤孔隙度

Fig. 6 Soil porosity in different vegetation types

3 讨论

土壤水的基质势 (或土壤水吸力) 随土壤含水率而变化, 其关系曲线称为土壤水分特征曲线。该曲线反映了土壤水分能量和数量之间的关系, 是研究土壤水动力学性质必不可少的重要参数, 它可反映不同恢复植被下土壤的持水性和土壤水分有效性, 在生产实践中具有重要意义。本研究中, 灌木林地和乔木林地的土壤水分特征曲线低于草地, 这可能与不同植被恢复阶段的土壤颗粒组成有关, 与草地阶段相比, 灌木林地和乔木林地阶段的黏粒量较低, 那么所能固持的

土壤含水率较低, 即便是二者具备较高的砂粒量, 由于砂粒量比黏粒吸收的水分较少水分。从而导致土壤含水率在草地阶段较高, 这与 Yang 等^[19]的研究结果一致。

土壤持水性能是指土壤吸收水和滞留水的能力, 饱和含水率包括了吸收水和滞留水^[20]。土壤持水性受土壤颗粒组成的影响较大, 而土壤体积质量和孔隙度是土壤颗粒组成的重要表征^[21], 三者能够改变土壤水分状况, 尤其是土壤持水性^[22]。本研究中, 不同植被恢复阶段的土壤持水性由土壤水分特征曲线参数 A 值来表示, A 值在植被恢复过程中的乔木林地阶段中

最高,表明在此阶段的土壤持水性最强,这可能是由于乔木林地阶段的无效孔隙较高,土壤体积质量较小,从而增加无效孔隙贮存的水分。此外,也与乔木林地阶段具有能够吸收较多水分的强大根系^[15]有关。土壤水分入渗过程和渗透能力决定了降雨过程中的水分再分配,从而影响了土壤水分状况、地表径流和流域产流^[23],在植被恢复的草地阶段的土壤持水性最弱,可能与草地阶段的植被较少有关,降水后表面径流较多,大大降低了入渗^[20]。因此,孔隙度和体积质量是影响土壤持水性的重要因子。

在土壤含水率较高或较低的情况下,土壤水分有效性会制约根系和微生物活性^[24-25],还会影响地下碳分配和底物有效性。本研究中,土壤水分有效性在植被恢复过程中的乔木林地阶段中最高,草地最低,灌木林地居中,随着植被恢复,土壤水分有效性逐渐提高。这可能是由于随着植被恢复,土壤颗粒中的砂粒量提高了,黏粒量减少了,土壤质地明显得到了改善^[26-27]。另外,可能也与随着植被恢复逐渐增加的土壤孔隙度有关。土壤贮存和保持水分的能力随着孔隙度的升高而增强。进而提高了土壤水分有效性^[28]。本研究中的土壤水分有效性与砂粒量和孔隙度正相关,与黏粒量负相关,这与Udawatta等^[29]的研究结果一致。可见,土壤水分有效性的关键影响因素为土壤孔隙度、颗粒组成和体积质量。

土壤即碳库又是碳源,随着植被恢复,土地利用类型发生变化,进而引起了土壤功能的变化^[30]。在早期的研究中,随着从草地到灌木林地再到乔木林地的植被演替,SOC逐渐提高,土壤储水量与土壤碳储量呈负相关^[31]。Zhao等^[28]指出有机质在土壤团聚体的形成中作用很大,进而促成了不同孔隙的土壤固形物的形成,由于随着植被恢复土壤有机质积累的增加,不可避免地影响到土壤孔隙,这与Deng等^[30]的研究结果一致,Zhao等^[28]也证实土壤孔隙度是影响黄土高原自然植被恢复过程中的土壤水库的最重要的因子之一。在我们早期的研究中,土壤N和P与土壤储水量呈负相关^[32],这可能是由于随着植被恢复,叶片N和P的增加导致土壤中N和P的增加。此外,Luo等^[33]还提出N动态是调节土壤固碳的主要因子,限制作物生产的最常见的因子之一就是N。因此,土壤C、N和P可能是除土壤物理特性外影响植被恢复过程中的土壤水分特征的重要化学因素。

4 结论

黄土高原植被恢复过程中,不同恢复阶段的土壤水分特征显著不同。随着植被恢复,土壤持水性和土壤水分有效性从草地到灌木林地再到乔木林地呈上

升趋势。土壤特性在恢复过程中也得到了改善,土壤颗粒组成、土壤孔隙度、体积质量和土壤N、P、K是影响土壤持水性和有效性关键因子。

参考文献:

- [1] CERDÀ A, GONZÁLEZ PÓ, PEREIRA P, et al. The wildgeographer avatar shows how to measure soil erosion rates by means of a rainfall simulator[J]. Geophysical Research Abstract, 2015.
- [2] FU B J. Soil erosion and its control in the loess plateau of China[J]. Soil Use and Management, 1989, 5(2): 76-82.
- [3] GOVERS G, VAN OOST K, WANG Z G. Scratching the critical zone: The global footprint of agricultural soil erosion[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2014, 10: 313-318.
- [4] ZHOU P, WEN A B, ZHANG X B, et al. Soil conservation and sustainable eco-environment in the Loess Plateau of China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 68(3): 633-639.
- [5] 强大宏, 艾宁, 刘长海, 等. 煤矿复垦区沙棘人工林土壤水分时空分布特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(9): 82-87.
- [6] 滕云, 张忠学, 司振江, 等. 振动深松耕作对不同类型土壤水分特征曲线影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(5): 52-58.
- [7] TENG Yun, ZHANG Zhongxue, SI Zhenjiang, et al. Impact of vibration-tillage of subsoils on their water retention curves[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(5): 52-58.
- [8] ALDAOOD A, BOUASKER M, AL-MUKHTAR M. Soil-water characteristic curve of lime treated gypseous soil[J]. Applied Clay Science, 2014, 102: 128-138.
- [9] LI X M, LI J H, ZHANG L M. Predicting bimodal soil-water characteristic curves and permeability functions using physically based parameters[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 57: 85-96.
- [10] BREDA N, HUC R, GRANIER A, et al. Temperate forest trees and stands under severe drought: A review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences[J]. Annals of Forest Science, 2006, 63(6): 625-644.
- [11] BRUAND A, PEREZ FERNANDEZ P, DUVAL O. Use of class pedotransfer functions based on texture and bulk density of clods to generate water retention curves[J]. Soil Use and Management, 2003, 19(3): 232-242.
- [12] CASSEL D K, NIELSEN D R. Field capacity and available water capacity[J]. A Klute Methods of Soil Analysis Part, 1986, 901-926.
- [13] WAN S Q, NORBY R J, LEDFORD J, et al. Responses of soil respiration to elevated CO₂, air warming, and changing soil water

- availability in a model old - field grassland[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(11): 2 411-2 424.
- [13] CHENG J M, CHENG J, SHAO H B, et al. Soil seed banks and forest succession direction reflect soil quality in Ziwuling mountain, loess plateau, China[J]. *Clean-soil Air Water*, 2012, 40(2): 140-147.
- [14] JIA G M, CAO J, WANG C Y, et al. Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession in Ziwulin, northwest China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, 217(1): 117-125.
- [15] WANG Y Q, SHAO M G, SHAO H B. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 381(1): 9-17.
- [16] REATTO A, DA SILVA E M, BRUAND A, et al. Validity of the centrifuge method for determining the water retention properties of tropical soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(6): 1 547-1 553.
- [17] 赵世伟, 周印东, 吴金水. 子午岭北部不同植被类型土壤水分特征研究[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(4): 119-122, 94.
ZHAO Shiwei, ZHOU Yindong, WU Jinshui. Soil moisture characteristics of different vegetations in northern of Ziwuling[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2002, 16(4): 119-122, 94.
- [18] 王孟本, 柴宝峰, 李洪建, 等. 黄土区人工林的土壤持水力与有效水状况[J]. *林业科学*, 1999, 35(2): 7-14.
WANG Mengben, CHAI Baofeng, LI Hongjian, et al. Soil water holding capacity and soil available water in plantations in the Loess region[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1999, 35(2): 7-14.
- [19] YANG L, WEI W, CHEN L D, 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.
- [20] 黄金辉, 廖允成, 高茂盛, 等. 耕作和覆盖对黄土高原果园土壤水分和温度的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(11): 2 652-2 658.
HUANG Jinhui, LIAO Yuncheng, GAO Maosheng, et al. Effects of tillage and mulching on orchard soil moisture content and temperature in Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(11): 2 652-2 658.
- [21] 徐雄, 张健. 生草和生物覆盖对果园土壤肥力的影响[J]. *四川大学学报*, 2004, 22(1): 88-91.
XU Xiong, ZHANG Jian. Effect of sown grass and organism mulching on orchard soil fertility[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2004, 22(1): 88-91.
- [22] LIU Y, GAO M S, WU W, et al. The effects of conservation tillage practices on the soil water-holding capacity of a non-irrigated apple orchard in the Loess Plateau, China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2013, 130: 7-12.
- [23] 张志华, 桑玉强, 孔玉华, 等. 太行山低山丘陵区坡位对土壤渗透性影响研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(9): 43-47, 78.
ZHANG Zhihua, SANG Yuqiang, KONG Yuhua, et al. The variation of water infiltration rate over various slopes in Taihang mountain[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(9): 43-47, 78.
- [24] BORKEN W, SAVAGE K, DAVIDSON E A, et al. Effects of experimental drought on soil respiration and radiocarbon efflux from a temperate forest soil[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(2): 177-193.
- [25] SCOTT-DENTON L E, ROSENSTIEL T N, MONSON R K. Differential controls by climate and substrate over the heterotrophic and rhizospheric components of soil respiration[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(2): 205-216.
- [26] ZHANG Y W, SHANGGUAN Z P. The coupling interaction of soil water and organic carbon storage in the long vegetation restoration on the Loess Plateau[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 91(9): 574-581.
- [27] WANG L, MU Y, ZHANG Q F, et al. Effects of vegetation restoration on soil physical properties in the wind-water erosion region of the northern loess plateau of China[J]. *Clean-soil Air Water*, 2012, 40(1): 7-15.
- [28] ZHAO S W, ZHAO Y G, WU J S. Quantitative analysis of soil pores under natural vegetation successions on the Loess Plateau[J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(4): 617-625.
- [29] UDAWATTA R P, ANDERSON S H. CT-measured pore characteristics of surface and subsurface soils influenced by agroforestry and grass buffers[J]. *Geoderma*, 2008, 145(3): 381-389.
- [30] DENG L, WANG K B, CHEN M L, et al. Soil organic carbon storage capacity positively related to forest succession on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2013, 110: 1-7.
- [31] ZHANG Y W, DENG L, YAN W M, et al. Interaction of soil water storage dynamics and long-term natural vegetation succession on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2016, 137(137): 52-60.
- [32] ZHANG Y W, SHANGGUAN Z P. Interaction of soil water storage and stoichiometrical characteristics in the long-term natural vegetation restoration on the Loess Plateau[J]. *Ecological Engineering*, 2018, 116: 7-13.
- [33] LUO Y Q, SU B, CURRIE W S, et al. Progressive nitrogen limitation of ecosystem responses to rising atmospheric carbon dioxide[J]. *Bioscience*, 2004, 54(8): 731-739.

(下转第 114 页)

and its leading factors were analyzed by the mathematical statistics method **【Result】** Intra-annual variation in the groundwater table was greater than inter-annual variation in the studied area. The monthly average groundwater table changed in "W" shape from spring to winter. From May to August and November to January of the following year, the groundwater change curves of all nine boreholes showed a drop, while in other months it rebounded. The variation coefficient of interannual groundwater table change in areas with different groundwater depth was ranked in: deep groundwater level > moderate groundwater level > shallow groundwater level, and this trend remained almost unchanged in the ten years. Compared with areas with moderate and shallow groundwater table, deep groundwater table was unstable. Correlation analysis revealed that water taken from the Yellow River and groundwater extraction were the two factors that affected the shallow and moderate groundwater most in the areas adjacent the Huinong Canal that diverting water from the Yellow River. The increase in cropping land also had a positive impact on groundwater table dropping. **【Conclusion】** Mitigating existing and potential soil salinity in the areas with shallow groundwater table should consider reducing the amount of water taken from the Yellow River for irrigation, using shallow groundwater or farmland drainage irrigation to reduce groundwater table.

Key words: Pingluo County; groundwater depth; variation characteristics; water diversion from Yellow River

责任编辑: 白芳芳

(上接第 85 页)

Evaluating Bioavailable Soil Water during Vegetation Restoration in the Loess Plateau

ZHANG Yongwang¹, WANG Jun¹, QU Yatan¹, LIU Shipeng¹, WANG Yan¹, SHANGGUAN Zhouping^{2*}

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

Abstract: **【Objective】** Vegetation restoration alters soil water dynamics due to the changes in soil structure and evapotranspiration. The relationship between soil structural change and its ability to hold water can be described by the soil water characteristic curve. The objective of this paper is to investigate the variation in soil water characteristic curve and bioavailability of soil water under different land coverages: grassland, shrub land and forestland. **【Method】** Intact soil samples were taken from the field under the three vegetation coverages in Ziwuling forest region at the center of the Loess Plateau. The water characteristic curves of all samples were measured, and the bioavailable water in each soil was calculated from these curves. **【Result】** Both water holding capacity and bioavailable water of the soil increased in the order of grassland < shrub land < forestland during the vegetation restoration process, in which soil particle composition, soil bulk density and porosity play an important role.

【Conclusion】 Results of this study could provide guidance for planning land use change and vegetation restoration. **Key words:** vegetation types; soil water characteristic curve; the loess plateau; soil water holding capacity; soil water availability

责任编辑: 韩洋