

露天煤矿排土场不同植被土壤水分特征及其时间稳定性

张燕乐^{1,2,3}, 甄庆^{1,2}, 张兴昌^{1,2,3}, 马炳召^{1,2}

(1.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 选择晋陕蒙接壤区永利煤矿排土场沙打旺草地、紫花苜蓿草地、沙棘林地和原地貌草地土壤水分作为对象, 研究其蒸散、剖面分布、时间变化等特征, 以期揭示土体重构及不同复垦植被模式对土壤水分及其时间稳定性影响。结果表明: 排土场3种人工植被条件下土壤平均含水量同原地貌草地相比提高了50.7%~62.3%, 另外, 沙打旺复垦草地土壤含水量显著低于苜蓿复垦草地和沙棘复垦灌木林地(均降低了7.2%)。沙打旺和苜蓿会导致深层(120—260, 120—220 cm)土壤水分亏缺, 但有利于20—80 cm的土壤水分的保持; 而沙棘易导致浅层(20—80 cm)土壤水分亏缺, 但对深层(100—280 cm)土壤水分影响较小。上述结果说明, 矿区排土场土体重构过程能够改善排土场土壤的水分条件, 并且在进行植被重建的过程中, 不同复垦植被对土壤水分的保持与利用形式有所不同, 在本研究中, 苜蓿和沙棘更有利于缓解土壤水分亏缺。

关键词: 土壤水分; 土体重构; 垂直分布特征; 时间稳定性

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0212-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.03.032

Soil Water Characteristics and Temporal Stability Under Different Vegetation Patterns in Opencast Coal Mine Dump

ZHANG Yanle^{1,2,3}, ZHEN Qing^{1,2}, ZHANG Xingchang^{1,2,3}, MA Bingzhao^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: The objective of this study was to reveal the effect of different vegetation patterns on the soil water characteristic and its temporal stability in opencast coal mine dump. Three vegetation patterns including *Astragalus adsurgens* grassland, alfalfa grassland and seabuckthorn shrubland were selected, and grassland in original landform was used as control. The results showed that the average soil water content under three kinds of artificial vegetation increased by 50.7%~62.3%, compared with the grassland in original landform. The soil water deficit in the deep layer (120—260 and 120—220 cm) was observed in *astragalus adsurgens* grassland and alfalfa, while higher soil water content was observed in 20—80 cm. In seabuckthorn shrubland, soil water deficit was observed in the shallow layer (20—80 cm), while higher water content was detected in the deep layer (100—280 cm). These results showed that the soil reconfiguration can improve the soil moisture condition in the reclamation of the waste site, and the selection of alfalfa and sea-buckthorn is more conducive to the alleviation of soil moisture deficiency in vegetation reconstruction.

Keywords: soil water; soil reconstruction; vertical distribution characteristics; temporal stability

晋陕蒙接壤区处于北方农牧交错带, 生态环境脆弱, 同时也是我国重要的能源基地。该地区煤炭资源埋深较浅, 大部分以露天开采为主, 在煤炭资源的开采过程中形成了大量的排土场^[1-2]。这些排土场如果经过治理, 则会受到风蚀和水蚀的影响, 导致沙尘暴和水土流失等严重环境问题, 对当地的社会经济发

展造成不利影响^[3]。植被恢复能够增加地表覆盖, 降低土壤的风蚀和水蚀程度, 进而改善当地的生态环境^[4-5]。然而, 由于该地区降雨较少, 土壤水分成为影响矿区植被恢复的主要限制因子^[6]。

较低的土壤水分会抑制种子萌发、根系吸水和植物生长^[7], 减缓植被恢复进程。不同的植被对土壤水

收稿日期: 2020-03-09

资助项目: 中国科学院西部行动计划项目“晋陕蒙能源基地受损生态系统恢复重建关键技术与示范”(KZCX2-XB3-13)

第一作者: 张燕乐(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事土壤生态研究。E-mail: zhang.yanle@163.com

通信作者: 张兴昌(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事土壤生态和水土生态工程研究。E-mail: zhangxc@ms.iswc.ac.cn

分的需求不同,导致土壤水分垂直分布特征的不同,这些土壤水分特征反过来又会影响根系分布和吸水特征,进而影响植物生长和植被恢复。例如,在黄土高原,高耗水植物对土壤水分的过度消耗导致土壤水分短缺,造成了植被的生长缓慢(如‘小老树’)或大面积的凋萎死亡,引起植被退化,阻碍了当地的植被重建和生态恢复^[8]。因此,研究不同植被条件下的土壤水分分布特征对选择适宜的植被类型、促进当地的植被恢复进程具有重要的现实意义。

土壤水分的空间分布在时间上具有一定的稳定性特征,被称为土壤水分的时间稳定性^[9-10]。时间稳定性常被用来确定代表性样点的位置以监测研究区的平均水分状况^[11]。然而,当前的相关研究主要集中在自然土壤^[12-14],对于矿区排土场等强扰动土体的土壤水分时间稳定性研究较少。同时大多数的研究^[12]主要关注相同深度土层在区域上的时间稳定性,对土壤水分在垂直剖面上的时间稳定性研究相对较少。

此外,土壤水分还与土壤质地有关。采用适宜的土壤材料进行土体重构能够改善排土场的水分条件,促进植被恢复。因此,本研究对排土场土壤水分的时空变化特征进行了分析,以研究土体重构对排土场土壤水分的改善作用,以及排土场不同植被的水分分布和利用特征,并采用时间稳定性确定各植被类型下的土壤水分代表性土层深度,以期为矿区土体重构和人工植被的选择提供数据和理论基础。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于晋陕蒙接壤区北部的准格尔旗永利煤矿(39°41'N,110°17'E),海拔 1 390 m,该区属暖温带半干旱大陆性季风气候,冬季漫长寒冷,夏季短暂炎热。年均气温 8.1℃,无霜期 155 d,年均降水量 404 mm,其中,超过 70%的降雨发生在 7—9 月^[8]。年均潜在蒸发量 2 090 mm,年均参考作物蒸散 1 128 mm^[15],平均风速 2.5 m/s,以西北风为主。该区的主要土壤类型有黄绵土、风沙土和栗钙土,地带性植被属暖温带草原带^[16]。研究区内的自然植被物种主要有本氏针茅(*Stipa capillata* Linn.)、百里香(*Thymus mongolicus* Ronn.)等草本植物,以及达乌里胡枝子(*Lespedeza daurica* (Laxm.) Schindl.)、草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides* Pall.)等灌木。排土场表层覆盖 20~30 cm 厚的砂黄土或黄绵土,30~300 cm 左右为煤炭开采过程中集中起来的易风化粉岩,土壤颗粒组成及质地见表 1。排土场的人工植被主要有紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)、沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall.)等草本植物,沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.),柠条(*Caragana*

korshinskii Kom.)等灌木,以及少量的新疆杨(*Populus alba* var. *pyramidalis* Bge.)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)等乔木,其中最常见的为紫花苜蓿、沙打旺和沙棘等植被。

表 1 排土场和原地貌的土壤颗粒组成及质地(美国农业部)

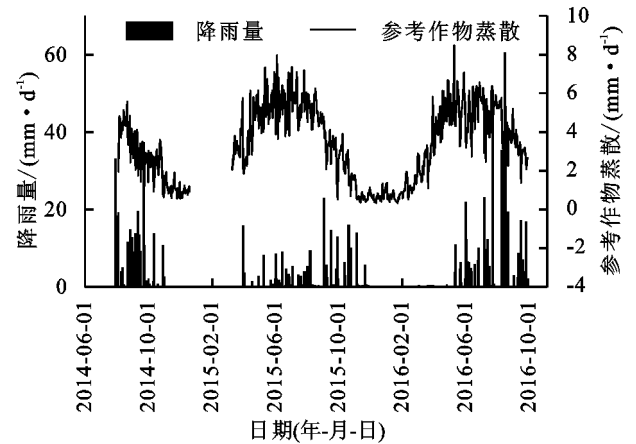
位置	土壤类型	黏粒	粉粒	砂粒	土壤质地
排土场	重构土	9.6a	61.9a	28.5b	粉壤
原地貌	黄绵土	5.2b	48.3b	46.5a	壤土

注:同一列不同小写字母表示不同土地利用间的差异显著性($P < 0.05$)。下同。

1.2 研究方法

观测点选择在永利煤矿一期绿化平台,该平台于 2010 年进行绿化,主要有沙打旺、紫花苜蓿和沙棘 3 种人工植被类型。因此,本研究选择以这 3 种植被类型为代表的 3 个地块作为研究对象,每个地块面积 4 000 m² (100 m×40 m)。同时,在排土场附近(2 km)选择了 1 个原始缓坡草地作为对照,土壤类型为黄绵土,面积约 4 500 m² (90 m×50 m),以本氏针茅为主要建群种。

在 4 个地块中央分别安装 3 根中子管,3 根中子管呈“品”字形分布,每 2 根中子管相距 15 m。土壤水分监测使用中子仪(CNC503DR),0—100 cm 每 10 cm 测定 1 次,100 cm 以下每 20 cm 测定 1 次。排土场 3 种植被的观测深度为 300 cm;原地貌草地由于 200 cm 以下的土壤水分变化较小^[17],观测深度为 200 cm。测定时间为 2014 年 6—10 月,2015 年 5—10 月,2016 年 5—10 月,每 10 天测定 1 次。由于越冬期土壤水分的相对变化较少,越冬期的土壤水分不进行测定^[18]。测定前,中子仪在排土场和原地貌分别进行标定。气象数据(降雨量、温度、湿度、太阳辐射、风速等)的获取采用小型自动气象站(HOBO U30, Onset, 美国),降雨量和参考作物蒸散见图 1。



注:2014 年 12 月到 2015 年 2 月间由于气象站故障导致数据缺失。

图 1 试验期间降雨量和参考作物蒸散
土壤剖面的平均土壤含水量 $\bar{\theta}_j$ (cm³/cm³, 本文用百分比表示)计算公式为:

$$\bar{\theta}_j = \frac{1}{H} \sum_1^n (\theta_{ij} \times h_i)$$
 (1)

式中： θ_{ij} 为第 i 层土壤在 j 时刻的土壤含水量 (cm^3/cm^3)； H 为整个土壤剖面的土层厚度 (cm)； n 为整个土壤剖面的测点总个数； h_i 为第 i 层土壤的厚度 (cm)。不同深度土层土壤水分的时间稳定性分析采用相对差分法^[10]。相对差分 (δ_{ij}) 描述了不同深度土壤水分的观测值相对于土壤剖面的平均含水量的偏离程度 (无量纲)，其计算公式为：

$$\delta_{ij} = \frac{\theta_{ij} - \bar{\theta}_j}{\bar{\theta}_j}$$
 (2)

式中： $\bar{\theta}_j$ 为土壤剖面在 j 时刻的平均土壤含水量。平均相对差分 ($\bar{\delta}_i$, MRD) 和相对差分标准差 ($\sigma(\delta_i)$, SDRD) 分别为：

$$\bar{\delta}_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \delta_{ij}$$
 (3)

$$\sigma(\delta_i) = \left(\frac{1}{M-1} \sum_{j=1}^M (\delta_{ij} - \bar{\delta}_i)^2 \right)^{1/2}$$
 (4)

式中： M 为总测定次数。每个土层时间稳定性指数 (ITS) 计算公式为：

$$\text{ITS}_i = (\bar{\delta}_i^2 + \sigma(\delta_i)^2)^{1/2}$$
 (5)

ITS 值越高，表明土壤水分的稳定性越低；土壤剖面上具有最小 ITS 值的土层则视为最稳定土层深度 (MSTD)。

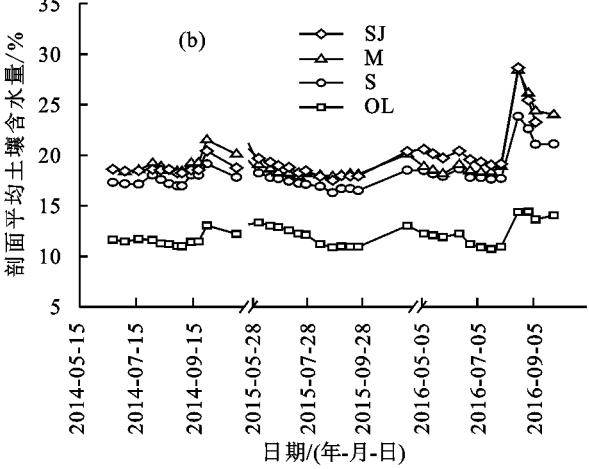
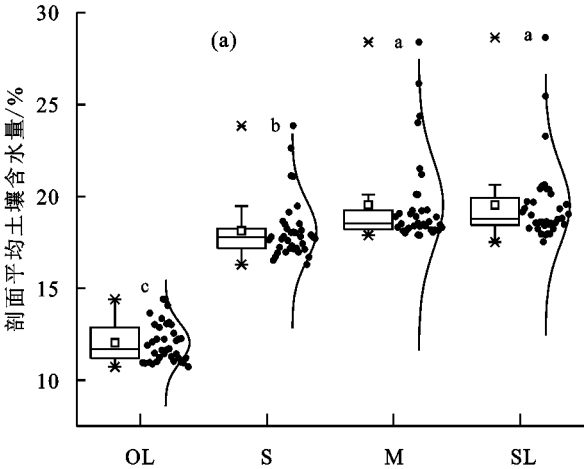
1.3 数据处理

土壤含水量和气象数据的处理使用 Excel 2016 和 SPSS 19.0 软件；图表绘制 (箱线图、热图、和点线图等) 使用 Origin Pro 2016。

2 结果与分析

2.1 排土场和原地貌土壤剖面的水分概况

2014 年 6 月至 2016 年 10 月间，原地貌草地的剖面平均土壤含水量为 $(12.0 \pm 1.1)\%$ ，变异系数为 8.8% (图 2)。同原地貌相比，排土场 3 种不同复垦植被条件下的土壤平均含水量均显著增加，增加幅度为 $50.7\% \sim 62.3\%$ ($P < 0.05$)。排土场沙打旺草地、苜蓿草地和沙棘灌木林地 0—300 cm 的土壤平均含水量分别为 $(18.1 \pm 1.6)\%$ ， $(19.5 \pm 2.4)\%$ 和 $(19.5 \pm 2.2)\%$ (图 2a)，变异系数分别为 9.0% ， 12.5% ， 11.2% 。3 种复垦植被中，苜蓿和沙棘植被条件下的平均土壤含水量显著高于沙打旺植被 ($P < 0.05$)。苜蓿和沙棘植被条件下的平均土壤含水量没有显著差异 ($P > 0.05$)。



注：(a)不同植被条件下的剖面平均土壤含水量概况，左侧为箱线图，右侧为正态分布，不同小写字母表示不同植被条件间的差异显著性 ($P < 0.05$)；(b)不同植被条件下的剖面平均土壤含水量随时间的变化；OL 为原地貌，S 为沙打旺，M 为紫花苜蓿，SJ 为沙棘。

图 2 不同植被条件下的剖面平均土壤含水量

2.2 土壤水分的垂直分布特征

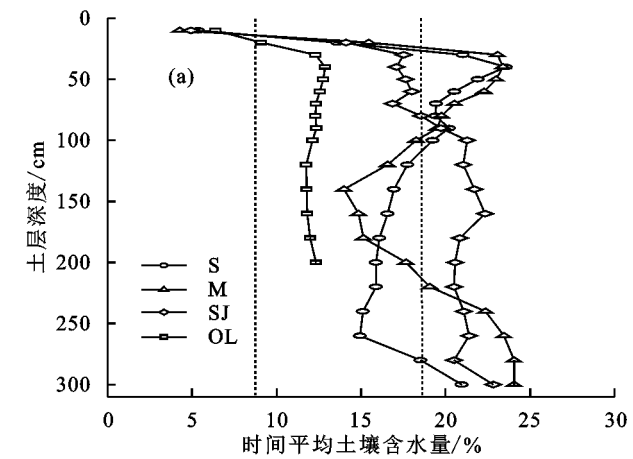
由图 3a 可知，原地貌和排土场表层 0—30 cm 的土壤含水量 (12.3%) 明显低于 30 cm 以下土层的土壤含水量 (18.1%)。原地貌 30—200 cm 土层的时间平均土壤含水量随深度变化不明显。以中等变异强度 (变异系数 $> 10\%$) 为主要依据，原地貌土壤水分的主要变化层为 0—120 cm (图 3b 和表 2)。排土场 3 种植被中，沙打旺草地在 30—100 cm 土层的时间平均土壤含水量 (20.6%) 高于 100—280 cm 土层 (16.9%)；苜蓿草地在 30—90 cm 土层的时间平均土壤含水量

(21.4%) 高于 90—220 cm 土层 (16.5%)；而沙棘灌木林地在 30—80 cm 土层的时间平均土壤含水量 (17.6%) 低于 90—300 cm 土层 (21.2%)。排土场 3 种植被中，沙打旺草地、苜蓿草地和沙棘灌木林地的主要土壤水分变化层分别为 0—160，0—220，0—160 cm，土层厚度均高于原地貌草地。

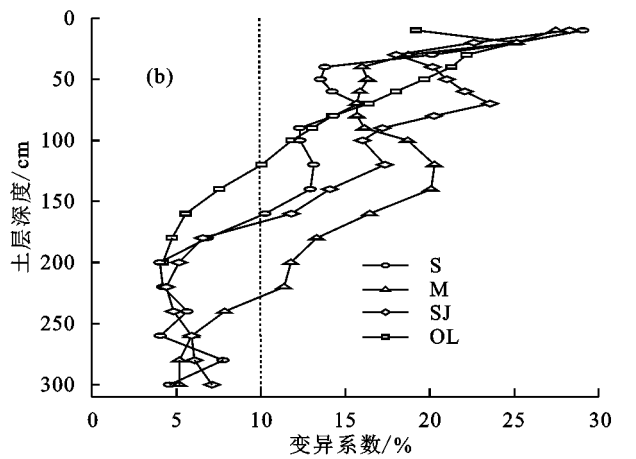
2.3 土壤水分剖面的季节和年际变化

由图 2b 可知，排土场和原地貌从 5—8 月土壤含水量逐渐降低，8—9 月土壤含水量逐渐增加。以降雨后土壤含水量增加 30% 以上为主要依据，排土场沙打旺草

地、苜蓿草地和沙棘灌木林地 在 2014 年 8 月以后的降雨补给深度分别为 60,90,60 cm;在 2015 年 8 月以后均为 60 cm;在 2016 年 8 月以后分别为 160,280,160 cm(图 4)。原地貌土壤水分在 2014 年、2015 年和 2016 年 8 月以后的降雨补给深度分别为 80,60,160 cm(图 4)。



2014—2015 年,排土场沙打旺草地、苜蓿草地和沙棘灌木林地分别在 120—260,100—220,0—80 cm 土层的土壤含水量明显低于其他土层,且随时间的变化较小,2016 年 8 月以后,这些土层的土壤含水量均得到明显的恢复(图 4)。



注:(a)左侧虚线为原地貌土壤田间持水量的 60%,右侧虚线为排土场土壤田间持水量的 60%;(b)虚线为中等变异强度的下限(10%)。

图 3 时间平均土壤含水量及其变异系数随土层深度的变化

表 2 不同植被条件下的土壤水分剖面概况

不同植被模式	水分亏缺层/cm	土壤水分变化层/cm	60%田间持水量/%	田间持水量/%
S	120—260	0—160	18.5a	30.8a
M	120—200	0—220	18.5a	30.8a
SJ	20—80	0—160	18.5a	30.8a
OL	无水分亏缺	0—120	8.8b	14.6b

注:同列不同小写字母表示不同植被间的差异显著性($P < 0.05$);S 为沙打旺;M 为苜蓿;SJ 为沙棘;OL 为原地貌,水分亏缺层的确定以该土层的土壤含水量低于田间持水量的 60%为主要依据。

2.4 土壤剖面的时间稳定性

由图 5 可知,排土场沙打旺草地、苜蓿草地和沙棘灌木林地各土层土壤含水量的平均相对差分(MRD)的变化范围分别为-69.1%~38.9%,-73.4%~29.7%,-75.6%~22.3%;平均相对差分标准差(SDRD)的均值分别为 8.4%,8.3%,6.8%;时间稳定性指数的均值分别为 17.8%,22.7%,16.5%。排土场 3 种植被沙打旺草地、苜蓿草地和沙棘灌木林地在 0—300 cm 剖面土壤水分最稳定土层深度分别为 120,90,100 cm,对应的时间平均土壤含水量分别为 17.8%,19.5%,21.3%,与各自剖面平均土壤含水量分别相差 0.1%,0.5%,2.4%。原地貌草地 0—200 cm 剖面,MRD 的变化范围为-41.0%~5.9%,SDRD 的均值为 9.4%,时间稳定性指数的均值为 12.6%,最稳定土层深度为 90 cm,对应的时间平均土壤含水量为 12.3%,与其剖面平均土壤含水量相差 0.6%,相对于排土场 3 种植被条件具有更强的时间稳定性。

3 讨论

3.1 土体重构能够提高排土场的土壤水分含量

在干旱半干旱区,土壤水分是进行植被恢复的主要限制性因素。本研究中,同原地貌相比,排土场的剖面平均土壤水分含量要高出 50.7%~62.3%,这一结果说明,排土场的土体重构提高了土壤水分含量。本试验中的原地貌土壤为黄绵土,属于壤土(表 1)。排土场进行土体重构选择的替代土壤是位于煤层(侏罗系中下统延安组)上方埋深较浅、松散易风化的第三系上新统地层和第四系上更新统马兰组地层。这些土壤替代材料主要包括红色或桔黄色黏土^[19]、半胶结的砂质泥岩和风积浅黄色含砂黄土^[20],其风化后的产物属于粉壤或粉黏壤。这些土壤的质地与原地貌的黄绵土相比较细,导致重构土壤的持水能力比原地貌强,同时,重构土壤的蒸发量同黄绵土相比显著降低^[21],从而提高了排土场 0—300 cm 土壤剖面的水分含量。因此,在露天煤炭开采区采用适宜的土壤替代材料进行土体重构能够改善土壤的水分状况。

3.2 土体重构与植被恢复增加土壤水分的变异性并降低其时间稳定性

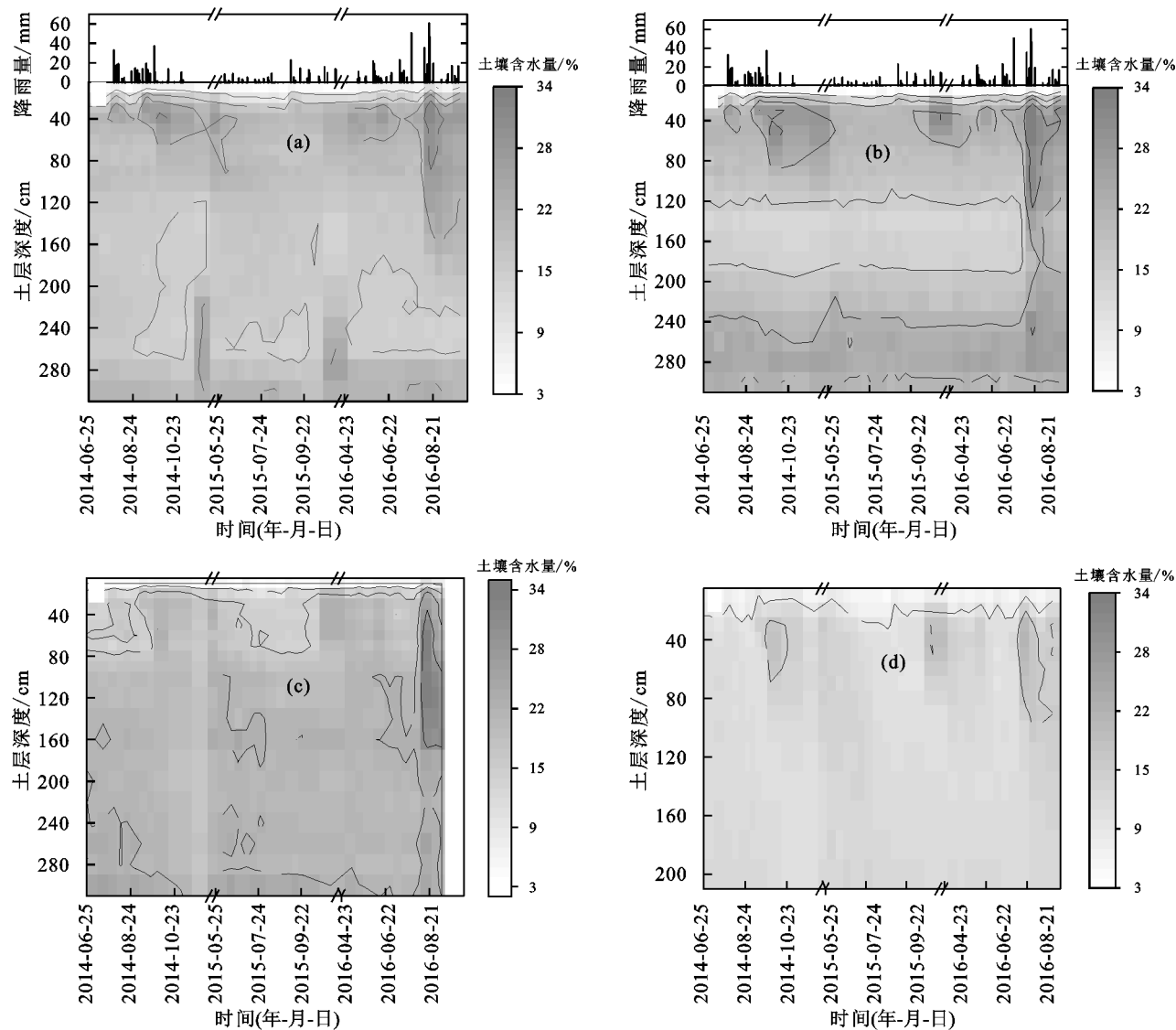
相对于原地貌,排土场 3 种植被不同土层的土壤水分具有更高的变异系数和时间稳定指数。这说明土体重构和植被恢复提高了土壤水分的变异性,并降低土壤水分的时间稳定性。造成这一结果的主要原因是一方面由于土体重构增加了排土场土壤的持水能力,导致降雨后排土场土壤能够储蓄较多的水分而使土壤含水量升高;另一方面排,土场 3 种植被又均是高耗水植物,其根系能够从重构土壤中吸收大量的

水分,降低排土场土壤的水分含量^[16]。因此,在降雨补给和根系吸水消耗的共同作用下,排土场的土壤水分具有更高的变异系数和更低的时间稳定性。

3.3 苜蓿和沙棘有利于缓解重构土体的土壤水分亏缺

在排土场3种植被中,沙打旺草地的土壤含水量显著低于苜蓿草地和沙棘灌木林地($P < 0.05$,图2a),这主要是由于沙打旺具有较强的适应性和抗旱性^[22-23],在干旱条件下依然能够吸收土壤中仅存的水

分,维持正常生长,并具有较高的产量和水分利用效率。然而沙打旺对土壤水分的持续性消耗会导致严重的土壤水分亏缺和土壤干层等生态问题,虽然在植被演替过程中,水分亏缺和土壤干层的状况能够在一定程度上得到缓解,但是严重的土壤水分亏缺会限制植被的正向演替,同时也需要更长的恢复时间。因此,应降低沙打旺的种植面积和密度,以减少土壤水分的过度消耗。



注:a为排土场沙打旺草地;b为排土场苜蓿草地;c为排土场沙棘灌木林地;d为原地貌草地。

图4 排土场和原地貌土壤含水量随时间和土层深度的变化

除表层0—20 cm土层外,排土场3种植被沙打旺草地、苜蓿草地和沙棘灌木林地的水分亏缺层分别为120—260,120—220,20—80 cm(以该土层的土壤含水量低于田间持水量的60%为依据),这说明这些土层的土壤水分处于严重亏缺状态,难以满足植物的正常生长。此外,沙打旺草地和苜蓿草地在浅层(0—80 cm)的土壤含水量相对深层要高,这一方面是由于浅层土壤更容易接受降雨补给;另一方面可能与根系分布与吸水特性有关,沙打旺和苜蓿的根系较

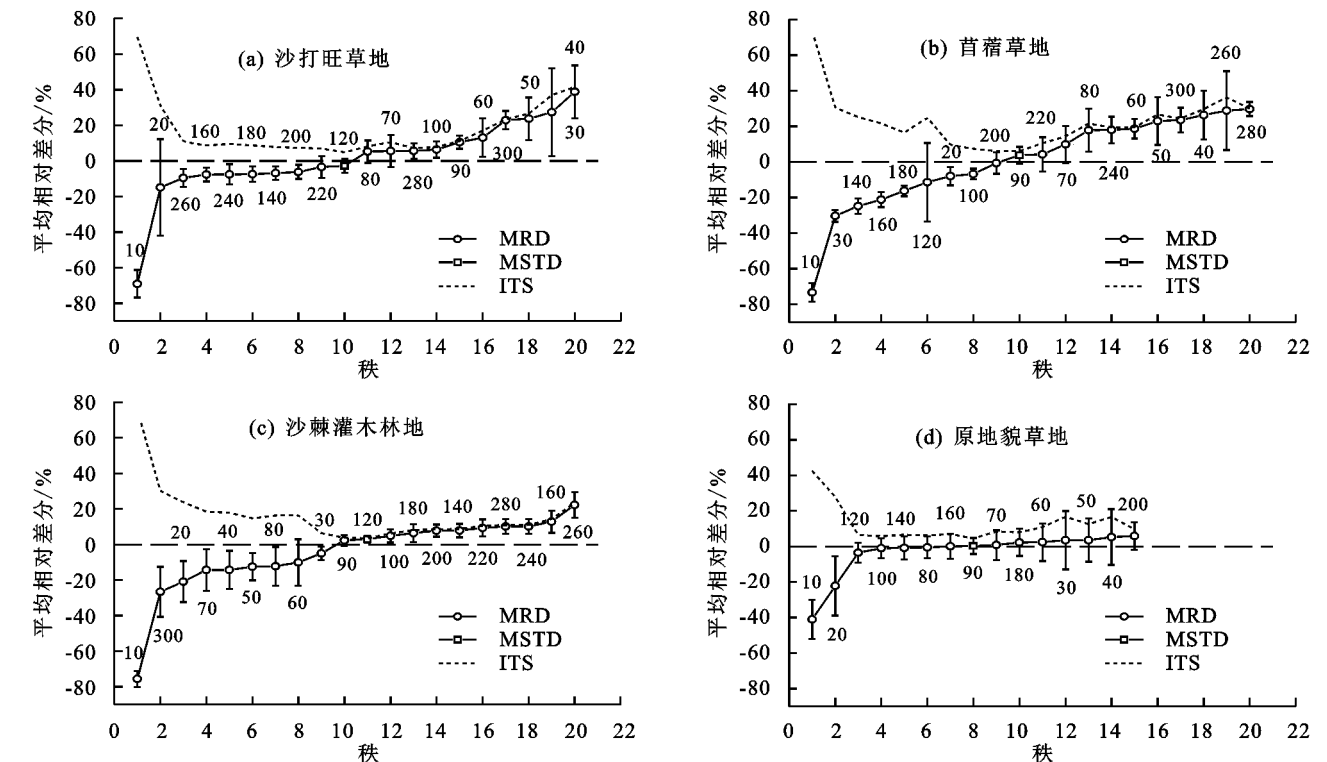
深,且能够通过根系提水作用将深层土壤水分转移到浅层供其吸收利用。

沙棘灌木林地在浅层(0—80 cm)的土壤含水量明显低于深层(80—300 cm),这一方面是由于,相对于苜蓿和沙打旺草地,沙棘灌木林地的地表覆盖较少导致浅层土壤的蒸发量较大;另一方面,尽管沙棘是深根系植物,能够利用深层土壤水分,但大部分的根系主要集中在浅层。张向军等^[24]通过调查发现,沙棘在0—40 cm的根量占全剖面的72.36%;刘洪章

等^[25]研究结果表明,沙棘的根系主要分布于0—60 cm的土层。因此,沙棘对浅层(0—80 cm)土壤水分利用较多,对深层土壤水分的利用较少。

这些分析表明排土场沙打旺草地和苜蓿草地会导致深层(120—260,120—220 cm)土壤水分亏缺,

但有利于20—80 cm的土壤水分恢复;而沙棘灌木林地会导致浅层(20—80 cm)土壤水分亏缺,但有利于深层(100—280 cm)土壤水分的保存。因此,采用苜蓿和沙棘混种的草灌混交的模式,并适当降低种植密度会改善整个土壤剖面的水分状况。



注:MRD为平均相对差分;MSTD为最稳定土层深度;ITS为时间稳定性指数;误差棒为相对差分标准差。

图5 排土场和原地貌土壤含水量的时间稳定性

4 结论

选择第三系和第四系地层的桔黄色黏土、半胶结的砂质泥岩和风积浅黄色含砂黄土混合物进行排土场的土体重构能够提高复垦土壤的水分状况。排土场3种植被中,沙打旺草地的土壤含水量显著低于苜蓿草地和沙棘灌木林地。沙打旺和苜蓿主要利用深层土壤水分,而沙棘灌木林地主要利用浅层土壤水分。因此,在进行排土场植被重建的过程中,出于对减少土壤水分消耗和促进生态恢复的考虑,应优先选择苜蓿或沙棘,同时适当采取苜蓿和沙棘混种的草灌混交的模式会改善整个土壤剖面的水分状况。

参考文献:

[1] 李秋艳,蔡强国,方海燕.风水复合侵蚀与生态恢复研究进展[J].地理科学进展,2010,29(1):65-72.
[2] 张芳芳.黄土高原水蚀风蚀交错区侵蚀环境演变的多要素分析[D].杭州:浙江大学,2012.
[3] 喻权刚.晋陕蒙接壤区水土保持监督管理成效与建议[C]//中国水土保持学会,中国水土保持学会预防监督专业委员会第九次会议暨学术研讨会论文集.北京:中国水土保持学会,2015:220-224.
[4] 杨勤学,赵冰清.中国北方露天煤矿区植被恢复研究进

展[J].生态学杂志,2015,34(4):1152-1157.
[5] 王哲.霍林河露天煤矿植被恢复技术研究[D].北京:北京林业大学,2010.
[6] 姚敏娟.黑岱沟露天矿排土场不同植被配置对土壤养分和土壤水分影响研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2007.
[7] 姚敏娟,张树礼,李青丰,等.黑岱沟露天矿排土场不同植被配置土壤水分研究:土壤水分垂直动态研究[J].环境与发展,2011,23(1):29-32.
[8] Liu B, Shao M A. Modeling soil-water dynamics and soil-water carrying capacity for vegetation on the Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2015,159:176-184.
[9] Souza E R D, Montenegro A A D A, Montenegro S M G, et al. Temporal stability of soil moisture in irrigated carrot crops in Northeast Brazil[J]. Agricultural Water Management, 2011,99(1):1-32.
[10] Vachaud G, Passerat D S, Balabanis A P, et al. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function1[J]. Soil Science Society of America Journal,1985,49(4):822-828.
[11] She D, Zhang W, Hopmans J W, et al. Area representative soil water content estimations from limited

- measurements at time-stable locations or depths[J]. Journal of Hydrology, 2015, 530: 580-590.
- [12] 韩晓阳. 黄土塬区农田生态系统水—碳通量特征及产量时程演变趋势[D]. 陕西 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016.
- [13] 刘继龙, 马孝义, 张振华, 等. 果园土壤水分时间稳定性研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(4): 698-704.
- [14] 段良霞. 黄土高原沟壑区坡地水量转换的空间变异性[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [15] 宁婷婷, 刘文兆, 林文, 等. 近 56 年来内蒙古东胜矿区潜在蒸散发的时程变化[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 62-66.
- [16] 杨政, 王冬, 刘玉, 等. 矿区排土场人工草地土壤水分及入渗特征效应[J]. 草业学报, 2015, 24(12): 32-40.
- [17] 郭佳佳, 牛俊杰. 基于不同土地利用类型的土壤水分研究[J]. 太原师范学院学报(自然科学版), 2017, 16(2): 71-75, 97.
- [18] Jia Y H, Shao M A. Temporal stability of soil water storage under four types of revegetation on the northern Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 117(1): 33-42.
- [19] 张云翔, 薛祥煦. 陕西府谷老高川新第三纪“红层”的划分与时代[J]. 地层学杂志, 1995, 19(3): 214-219.
- [20] 王世平. 准格尔旗神山镇永利煤炭有限责任公司黄天棉图地区煤矿火区集中连片治理专项六期至八期项目土地复垦方案[R]. 呼和浩特: 黄天棉图地区煤矿火区集中连片治理. 2014.
- [21] 吴奇凡, 樊军, 王继军. 晋陕蒙接壤区露天矿不同质地土壤水分运动特征与模拟[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 174-182.
- [22] 英陶. 沙打旺在巴音郭勒地区的适应性研究[J]. 草业与畜牧, 2008, 22(9): 13-14.
- [23] 王彦龙, 杨晓霞, 李世雄, 等. 柴达木盆地盐碱地沙打旺引种适应性评价[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2018, 48(6): 33-35.
- [24] 张向军, 张小芬, 王军. 沙棘根系特性调查研究[J]. 现代农业, 2012, 38(10): 74-75.
- [25] 刘洪章, 齐洁, 李玉. 沙棘根系分布及根瘤研究[J]. 吉林农业大学学报, 2005, 27(6): 45-47, 52.
- (上接第 211 页)
- [10] 喻三保, 张红艳, 陈守文, 等. γ -谷氨酸施用对草莓产量和果实品质的影响[J]. 湖北农业科学, 2016, 49(7): 1638-1641.
- [11] 刘端义, 梅金先, 张旅峰, 等. 聚- γ -谷氨酸及其增效肥在水稻上的应用[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(10): 2390-2394, 2400.
- [12] 刘乐, 费良军, 陈琳, 等. γ -聚谷氨酸对土壤结构、养分平衡及菠菜产量的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 279-284, 289.
- [13] 武国慧. 聚- γ -谷氨酸与不同形态氮肥共施对油菜生长的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(15): 54-60.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- [16] 李晶博, 李丁, 邓毛程, 等. γ -PGA 的特性、生产及应用[J]. 化工进展, 2008, 27(11): 1789-1792.
- [17] 王萌, 许孝瑞. γ -PGA 在农业应用中的研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2014(10): 161-163.
- [18] 曾健, 费良军, 陈琳, 等. 添加 γ -PGA 对土壤结构及持水特性的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 217-224.
- [19] Chu Q, Dong C J, Shang Q M. Effects of γ -poly glutamic acid on substrate mineral nutrient supply and growth of tomato plug seedlings[J]. Journal of Plant Nutrition & Fertilizer, 2016, 29(4): 1153-1167.
- [20] 文利军, 史文娟, 庞琳娜. γ -聚谷氨酸对土壤水分入渗和水盐运移的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 76-80, 87.
- [21] 张言芳, 周慧梅, 蔡克桐, 等. 无机盐混合试剂与 γ -PGA 复合处理对早稻苗期耐冷性的引发和分子效应分析[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2323-2330.
- [22] 蔡志坚. γ -聚谷氨酸活化磷矿粉对 Pb 污染土壤铅形态及小白菜生长的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- [23] 彭伟, 邓桂湖. 聚谷氨酸: 新型生物刺激剂在农业上的应用[J]. 磷肥与复肥, 2017, 11(3): 30-31.
- [24] 肖元松, 彭福田, 张亚飞, 等. 增氧栽培对桃幼树根系构型及氮素代谢的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(10): 1995-2002.
- [25] 揣峻峰, 肖艳, 庄钟娟, 等. γ -聚谷氨酸增效尿素的淋溶特性及肥效研究[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(35): 137-139.