

宁夏压砂地不同植被类型土壤干燥化特征

王幼奇^{1,2}, 张兴^{1,2}, 陆学娥^{1,2}, 赵云鹏^{1,2}, 包维斌^{1,2}, 白一茹^{1,2*}

(1 宁夏大学 资源环境学院, 银川 750021; 2 旱区特色资源与环境治理教育部国际合作联合实验室, 银川 750021)

摘要: 该研究在观测压砂地沙枣、柠条、西瓜、枸杞及草地土壤含水量的基础上, 分析比较不同植被类型的土壤含水量、水分过耗量、干燥化指数、干层厚度等土壤干燥化特征, 以揭示压砂地不同植被类型的土壤干燥化效应, 为宁夏中部旱区压砂地可持续发展提供理论依据。结果表明: (1) 不同植被类型下 0~600 cm 土壤含水量、贮水量和有效贮水量均值分别为 7.163%、591.978 mm 和 187.088 mm, 土壤水分过耗量均值为 274.942 mm。(2) 不同植被类型的土壤剖面含水量随深度增加呈先减小后增大的趋势; 除西瓜地外, 其余植被类型的土壤剖面含水量明显低于当地土壤稳定湿度。(3) 不同植被类型的土壤平均干燥化系数介于 2.152%~85.026%, 干燥化系数均值为 37.674%, 属严重干燥化强度, 其中柠条地和沙枣地均达到强烈干燥化强度; 土壤平均干层厚度达到或超过 500 cm, 干燥化程度由强到弱依次为柠条地>沙枣地>枸杞地>草地>西瓜地。(4) 典型相关分析发现, 经纬度、高程、植被类型、粉粒及砂粒含量等环境因子是影响土壤干燥化指数、干层内平均含水量等干燥化指标的重要因素。

关键词: 宁夏中部旱区; 植被类型; 土壤含水量; 土壤干燥化; 典型相关分析

中图分类号: Q948.112⁺.3; S152.7 **文献标志码:** A

Characteristics of Deep Soil Desiccation of Gravel-sand Mulched Field in Different Vegetation Zones of Ningxia

WANG Youqi^{1,2}, ZHANG Xing^{1,2}, LU Xuee^{1,2}, ZHAO Yunpeng^{1,2},
BAO Weibin^{1,2}, BAI Yiru^{1,2*}

(1 College of Resources and Environmental Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2 Arid Area Characteristic Resources and Environmental Governance Department of Education International Cooperation Joint Laboratory, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Based on observation of soil moisture in deep soil layers in *Elaeagnus angustifolia*, *Caragana korshinskii*, *Citrullus lanatus*, *Lycium chinense* and grassland on the gravel-sand mulched field in the arid zone of central Ningxia, we calculated, analyzed and compared soil moisture content, soil water overuse rate, soil desiccation indexes and thickness of desiccated soil layer in different vegetation zones, to provide the theory basis for improving the utilization on the gravel-sand mulched field in the arid zone of central Ningxia. Results show as follows: (1) mean soil moisture content, water storage and available soil water storage were 7.163%, 591.978 mm and 187.088 mm of different vegetation zones on the gravel-sand mulched field. The average soil water overuse rate was 274.942 mm. (2) The soil moisture of different vegetation types show the overall trend was reduced, then increased from the depth of the surface to 600 cm. In addition to watermelon, the water moisture content of other vegetation was significantly lower than

收稿日期: 2018-06-21; 修改稿收到日期: 2018-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(41867003, 41461104, 41761049); 宁夏高等学校科研项目(NGY2017015)

作者简介: 王幼奇(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要从事水土资源与环境研究。E-mail: wyq0563@163.com

* 通信作者: 白一茹, 博士, 副教授, 主要从事旱区水土资源调控研究。E-mail: yr0823@163.com

soil stable moisture. (3) The soil desiccation index of different vegetation zones was in the range of 2.152%~85.026%, and mean soil desiccation index was 37.674%, falling into the category of severely desiccated. The *C. korshinskii* and *E. angustifolia* land were extreme desiccated. The average thickness of the desiccated soil layer in different vegetation zones was 500 cm. The order of soil moisture content is: *C. korshinskii* land > *E. angustifolia* land > *L. chinense* land > grassland > *C. lanatus* land. (4) The canonical correlation analysis showed that environmental factors such as latitude, longitude, elevation, vegetation type, silt content and sand content were significantly factors affecting soil desiccated index and soil water content in the inner of dried soil layer.

Key words: the arid zone of central Ningxia; vegetation type; soil moisture content; soil desiccation; canonical correlation analysis

宁夏中部旱区位于黄土高原西部边缘,属荒漠草原气候带,降水少且蒸发旺盛,生态环境十分脆弱^[1]。压砂地是当地农民为对抗恶劣自然环境,利用砾石和粗细砂的混合体作为覆盖材料,依赖天然降水创造出的一种西北独特的旱作保护性耕作方式^[2-3],在改善土壤环境、抑制水分蒸发和增加入渗等方面有显著作用^[4-5]。但随着气候干旱化趋势的日益显现,以及农作物和林草等土壤耗水量的持续提高,压砂地土壤干燥化和生产力退化问题日益引起重视。

土壤干燥化现象是由于农作物和林草植被过度耗水导致土壤深层水分亏缺,土层剖面在一定深度内形成长期存在的干燥化土层^[6-10]。其产生会导致农作物产量波动加剧和林草生长衰败等现象^[11-12],同时也会阻隔土壤水分垂直入渗,影响陆地水分循环过程^[13-14]。由于植被的耗水能力(根系耗水、蒸散能力和冠层效应)是影响土壤干燥化现象的重要因素^[11, 13],因此,众多专家学者对黄土高原地区不同植被类型区土壤干燥化现象进行了研究。其中,黄土塬区农田、草地和林地等土地利用方式下深层土壤均产生了不同程度的干燥化^[15],黄土丘陵区林地和苜蓿地也均存在不同程度的干燥化现象,且人工植被密度过大是造成其干化的重要原因^[16]。纵观整个黄土高原地区,北部及中部干旱半干旱地区林草地的土壤干燥化现象较南部半湿润区严重^[17-19]。近50年来的气候暖干化趋势可能是导致该区土壤干层形成的直接原因,而植被类型选择不当、群落密度过大以及生产力过高是加剧深层土壤干燥化进程的重要因素^[20]。可见,目前在黄土高原地区关于不同植被类型下土壤干燥化问题研究都为系统深入^[15-20],但针对宁夏中部旱区压砂地土壤干燥化问题研究较少,且缺乏对不同植被类型下压砂地土壤干燥化强度的定量评价。

宁夏中部旱区是压砂地集中分布区域之一。土

壤水分不足一直是制约压砂地农业发展的重要因素,土壤干燥化作为一种特殊的土壤水分现象,是对土壤水文过程演变的一种综合响应^[21-22],对探索该区域土壤水分状况以及压砂地可持续利用具有重要的意义。因此,本研究以宁夏中部旱区压砂地为对象,通过对不同植被类型区土壤含水量剖面分布特征进行实地观测,分析比较不同植被类型下土壤含水量、水分过耗量、干燥化指数、干层厚度等土壤干燥化指标,揭示宁夏中部旱区压砂地不同植被类型区土壤干燥化特征,为宁夏中部旱区压砂地植被恢复、农业结构调整及可持续利用提供数据支持。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏环香山地区(104°57'22"~105°14'38"E, 36°58'48"~37°06'43"N),海拔1 620.8~1 872.4 m,属荒漠草原气候带,夏季酷热,冬季寒冷,气候干燥,年均太阳辐射量5 642 J/m²,年日照时数2 710 h,年均气温13.5℃,≥10℃积温2 398℃,无霜期149~171 d。年均降水量247 mm,年均蒸发量2 250 mm。土壤为黄绵土,土质疏松,质地均匀,容重为1.38 g/cm³,土壤田间持水量为17.45%,土壤稳定湿度为10.47%,凋萎湿度为4.89%。

1.2 试验设计

根据植被调查状况,于2017年3月在研究区内,分别选取沙枣(*Elaeagnus angustifolia* L.)、柠条(*Caragana korshinskii*)、西瓜(*Citrullus lanatus*)、枸杞(*Lycium chinense*)和草地5种具有代表性的压砂地植被类型进行深层土壤水分测定,样点的土壤基本物理性质见表1。采用直径为5 cm土钻采集土壤样品,在0~100 cm之间每10 cm土层取样1次,在100 cm以下每20 cm土层取样1次,采样最大观测深度为600 cm。田间持水量(FC)和凋萎湿度(WM)均采用Van Genuchten模型拟合,

表 1 不同植被类型下压砂地土壤的基本物理性质比较

Table 1 Comparison of soil physical properties on different vegetation types of the gravel mulched field

植被类型 Vegetation type	样点号 Sample	种植年限 Planting years	容重 Soil bulk density /(g·cm ⁻³)	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity /(mm·min ⁻¹)	饱和含水量 Saturated water content/%	田间持水量 Field moisture capacity/%	黏粒比例 Clay ratio/%	粉粒比例 Silt ratio/%	砂粒比例 Sand ratio/%
西瓜 <i>Citrullus lanatus</i>	1	13	1.448	0.151	23.489	15.689	11.678	56.251	32.051
	2	15	1.242	0.119	37.672	20.610	9.456	60.173	30.371
	3	18	1.280	0.186	44.921	20.633	9.645	71.14	19.15
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	4	27	1.344	0.206	35.008	17.004	11.223	64.09	24.75
	5	23	1.434	0.137	19.012	13.572	9.889	65.771	24.340
	6	26	1.398	0.088	32.642	16.609	13.622	66.693	19.685
枸杞 <i>Lycium chinense</i>	7	18	1.497	0.021	36.896	21.678	8.173	54.243	37.584
	8	21	1.373	0.130	36.173	18.842	8.445	58.843	32.712
	9	17	1.450	0.076	30.091	19.523	10.989	70.301	18.740
沙枣 <i>Elaeagnus angusti folia</i>	10	24	1.345	0.083	37.387	17.261	8.434	66.182	25.384
	11	23	1.381	0.123	34.824	16.862	13.624	66.686	19.690
	12	26	1.284	0.098	36.890	18.767	10.712	62.434	26.864
草地 Grassland	13	22	1.264	0.057	41.302	20.989	9.935	74.150	15.925
	14	23	1.493	0.074	30.690	20.552	10.489	69.081	20.440
	15	18	1.454	0.204	25.278	17.71	10.494	65.406	24.100

获取拟合参数后,分别计算 30 kPa 和 1 500 kPa 时对应的土壤含水量。土壤砂粒、粉粒、粘粒含量采用 MS3000 激光粒度仪测定,土壤容重、饱和含水率和饱和导水率由环刀法测定。

由于土壤水分(特别是表层土壤水分)与灌溉(西瓜和枸杞每年春夏两季都会定期进行灌溉)、降雨的关系密切,虽然采样时间在 3 月,减少了灌溉和雨季对土壤水分的影响,但由于不同植被(特别是有无灌溉措施)所得到的结果可能会存在一定差异。为了减小灌溉和降水对本研究结果的影响,在充分考虑当年灌溉措施、降水量和黄土高原土壤水分入渗补给相关研究成果的基础上,我们在分析土壤干层状况时不考虑表层 0~60 cm 的水分数据。

1.3 土壤含水量及相关参数计算

土壤含水量采用烘干法测定。通过以下公式计算相关参数:

$$SW = SM \times BD \times D \quad (1)$$

$$SW_e = SW - WM \quad (2)$$

$$SW_r = SSM - SW \quad (3)$$

式中, SW 为土壤贮水量; SM 为土壤含水量; BD 为土壤容重; D 为土层深度(cm); SW_e 为土壤有效贮水量; WM 为凋萎湿度,是指当植物因根系无法吸水而发生永久萎蔫时的土壤含水量,它是植

物利用土壤水分的下限; SW_r 为土壤水分过耗量; SSM 为土壤稳定湿度,是在气候、土壤质地、自然植被等因素的综合作用下土壤能长期维持的湿度,通常作为判断土壤干燥化的上限指标,其值约为土壤田间持水量的 50%~70%,本研究中统一取值为 60%。

1.4 土壤干燥化强度评价方法

为更好地描述压砂地不同植被类型下的土壤干燥化强度及其剖面分布特征,借鉴文献^[21-24]提出的土壤干层厚度(DSL)、干层内的平均剖面土壤含水量($DSL-SWC$)、土壤干层在剖面上的起始形成深度($DSLFD$)和土壤干燥化指数(SDI)来定量评价土壤的干燥化强度。其中, DSL 即土壤剖面上含水量小于土壤稳定湿度的土层厚度; $DSL-SWC$ 即当 DSL 确定后,位于该层次内的平均含水量; $DSLFD$ 即位于降雨和灌溉渗深以下的剖面水分含量小于土壤稳定湿度的第一个测定点; SDI 为某一土层有效含水量占该层土壤稳定有效含水量的比重,即该土层可供植物吸收利用的含水量占该层土壤有效含水量的百分比,表示为: $SDI = (SM - WM) / (SSM - WM) \times 100\%$ 。

依据 SDI 的大小,通常将土壤干燥化强度划分为 6 级:(1)若 $SDI > 100\%$,为无干燥化;(2)若 $75\% \leq SDI \leq 100\%$,为轻度干燥化;(3)若 50%

$\leq SDI \leq 75\%$, 为中度干燥化; (4) 若 $25\% \leq SDI \leq 50\%$, 为严重干燥化; (5) 若 $0 \leq SDI \leq 25\%$ 为强烈干燥化; (6) 若 $SDI < 0$, 为极度干燥化。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型下压砂地土壤含水量比较

表 2 显示, 宁夏中部旱区 5 种压砂地植被类型中, 西瓜地 0~600 cm 土层的土壤含水量和贮水量均最大, 其次为荒草地、枸杞地、沙枣地, 柠条地最低, 且 5 种压砂地植被类型间存在显著差异 ($P < 0.05$), 各植被类型土壤水分过耗量表现与之相反。其中, 5 种植被类型下土壤含水量均值都低于当地土壤稳定湿度值 (10.47%); 西瓜地、草地均与其他植被类型的土壤含水量均存在显著差异, 枸杞地与柠条地、沙枣地也存在显著差异, 柠条地和沙枣地土壤含水量差异不显著。同时, 各植被类型土壤贮水量和有效贮水量均值及其植被平均值均明显低于当地土壤稳定湿度时的贮水量和有效贮水量。西瓜地与草地的土壤贮水量差异不显著, 而与枸杞地、柠条地和沙枣地存在显著差异; 草地土壤贮水量与枸杞地差异不显著, 而与柠条地和沙枣地存在显著差异。这与不同植被类型下土壤含水量表现存在一定差异, 可能与样点土壤容重不同有关。另外, 各植被类型下土壤水分过耗量均值为 274.942 mm, 且超过了研究区年均降水量。以上结果说明宁夏中部旱区不同植被类型下压砂地土壤均发生了不同程度的水分过耗现象, 且植被类型间存在显著差异, 并以西瓜地较轻, 柠条地较重。

2.2 不同植被类型下压砂地土壤含水量剖面分布特征

宁夏中部旱区土层厚、地下水位深, 因此土壤水

分没有地下水的补给, 土壤含水量主要受灌溉、降雨入渗、地表蒸发以及植物蒸腾等因素的影响。不同植被类型下压砂地 0~600 cm 土层土壤含水量剖面分布特征如图 1 所示, 并以土壤稳定湿度和凋萎湿度作为对照。不同植被类型下压砂地土壤剖面含水量随土层深度的增加呈先减小后增大的趋势。其中, 在 0~60 cm 土层中, 西瓜地和枸杞地的土壤含水量随深度的增加而迅速降低, 柠条地、沙枣地和草地的含水量呈现为先增加后减小的趋势; 在 60~600 cm 深度内, 土壤水分含量随深度的增加呈波浪式缓慢增加。土壤含水量的最大值出现在 0~30 cm 土层内, 这主要是由于在 25 cm 处存在坚硬的犁底层, 阻碍土壤水分交换, 其下土层受灌溉和降雨等因素影响较小, 且植被根系对土壤水分的强烈吸收也会形成土壤水分含量上高下低的情况^[25]。同时, 通过对比不同植被类型的土壤含水量剖面, 发现其土壤剖面含水量由高到低依次为西瓜地、草地、枸杞地、沙枣地、柠条地。西瓜地仅在 80~320 cm 和 400~500 cm 之间土层含水量低于当地土壤稳定湿度, 最大耗水深度为 500 cm; 草地和枸杞地除浅层土壤外, 土壤剖面含水量均低于当地土壤稳定湿度; 沙枣地和柠条地的土壤剖面含水量明显低于土壤稳定湿度值。整体上, 在宁夏中部旱区, 除西瓜地外, 其余植被类型下压砂地土壤最大耗水深度均超过 600 cm, 土壤水分消耗严重。

由于采样期间研究区经历了一次弱降雨过程, 表层土壤水分受到一定影响, 为更好地反映不同植被类型下土壤剖面含水量变化情况, 分别对各植被类型 0~60 cm 及 60~600 cm 的土壤水分含量进行描述性统计 (表 3)。在 0~60 cm 土层中, 西瓜地、枸杞地和草地土壤含水量显著高于柠条地和沙枣地

表 2 不同植被类型下压砂地 0~600 cm 土层土壤含水量比较

Table 2 Comparison of soil water amount in 0~600 cm soil layers on different vegetation types of the gravel mulched field

植被类型 Vegetation type	土壤含水量 Soil moisture content/%	土壤贮水量 Soil moisture storage/mm	土壤有效贮水量 Available soil moisture storage/mm	土壤水分过耗量 Soil moisture over consumption/mm
西瓜地 <i>Citrullus lanatus</i>	9.747±0.778a	772.767±69.078a	367.877	94.153
柠条地 <i>Caragana korshinskii</i>	5.201±0.362d	434.852±31.731c	29.962	432.068
枸杞地 <i>Lycium chinense</i>	7.225±0.234c	624.126±28.322b	212.236	242.794
沙枣地 <i>Elaeagnus angustifolia</i>	5.492±0.162d	440.673±26.079c	35.783	426.247
草地 Grassland	8.151±0.643b	687.471±95.582ab	282.581	179.449
植被均值 Mean	7.163	591.978	185.088	274.942
田间持水量 Field capacity	17.45	1 444.86	1 039.97	—
凋萎湿度 Wilting moisture	4.89	404.89	—	—

注: 同列数据后标不同小写字母者表示在 0.05 水平差异显著; 表 3 同

Note: Different normal letters within the same column indicate significant differences at 0.05 level; The same as Table 3

($P < 0.05$),表明在同等降雨条件下,西瓜地、枸杞地和草地的土壤水分能得到较好的补充。从变异系数看,除西瓜地外,各植被类型 0~60 cm 土壤的土壤含水量变异系数明显低于深层土壤;而在 60~600 cm 土层,不同植被类型土壤含水量的变异系数均低于浅层,且除柠条和沙枣地外,其他植被土壤间均呈现显著差异($P < 0.05$)。各植被类型深层土壤含水量变异系数的变化特征同浅层相反,主要原因是土壤表层水分受到外界自然条件影响比较大,表层土壤比深层土壤可以接受更多水分补给,也更易受到植被蒸散和土壤蒸发的影响。

2.3 不同植被类型下压砂地土壤干燥化强度评价

不同植被类型下压砂地 60~600 cm 土壤干燥化强度及其干层厚度调查结果如表 4 所示。其中,西瓜地属于轻度干燥化强度,干层起始厚度为 80 cm,干层厚度为 366.67 cm,干层内平均含水量为 8.668 mm,主要耗水土层位于 80~280 cm 之间。

草地属于中度干燥化强度,干层起始厚度为 60 cm,干层厚度超过 513.33 cm,干层内平均含水量为 7.82 mm,其中强烈耗水层位于 160~360 cm 之间,严重耗水层位于 80~400 cm 之间。柠条地和沙枣地均属于强烈干燥化强度,60~600 cm 之间均为土壤干层。柠条地干层厚度超过 540 cm,干层内平均含水量为 5.241 mm,其中极度干燥层位于 60~220 cm 和 300~400 cm 之间;沙枣地干层内平均含水量为 5.62 mm,其中极度耗水层位于 70~140 cm 和 300~400 cm 之间,强烈耗水层主要位于 70~520 cm 之间。枸杞地属于严重干燥化强度,干层起始厚度为 60 cm,干层厚度超过 540 cm,干层内平均含水量为 7.25 mm,其中强烈耗水层位于 60~80 cm 和 280~380 cm 之间,严重耗水层位于 120~520 cm 之间。总体上,宁夏中部旱区土壤属于严重干燥化程度,干层厚度均达到或超过 366.67 cm,其中枸杞、柠条和沙枣地的干层厚度均超过 540 cm,不同

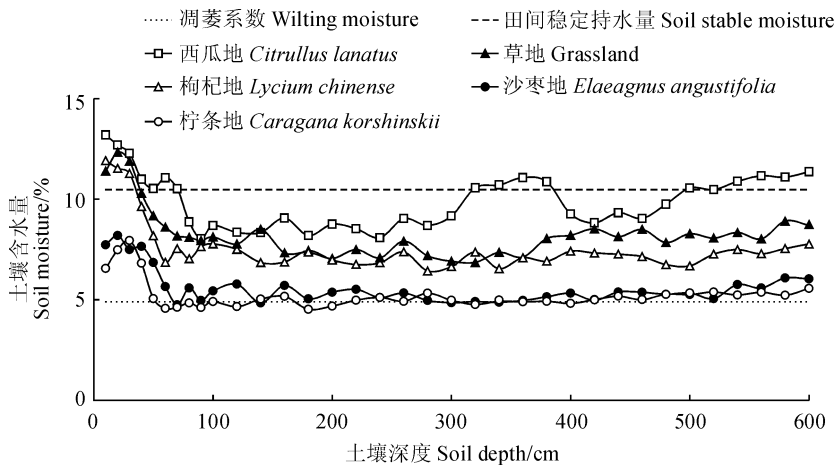


图 1 不同植被类型下压砂地土壤含水量剖面分布特征比较

Fig. 1 Comparison of soil moisture distribution on different vegetation types of the gravel mulched field

表 3 不同植被类型下压砂地 0~60 和 60~600 cm 土层土壤含水量比较

Table 3 Comparison of soil water content in 0~60 and 60~600 cm soil layers on different vegetation types of the gravel mulched field

植被类型 Vegetation type	0~60 cm				60~600 cm			
	最小值 Min/%	最大值 Max/%	平均值 Mean/%	变异系数 CV/%	最小值 Min/%	最大值 Max/%	平均值 Mean/%	变异系数 CV/%
西瓜地 <i>Citrullus lanatus</i>	10.52	13.39	11.782±1.128a	9.524	8.03	11.36	9.645±1.032a	10.667
柠条地 <i>Caragana korshinskii</i>	4.56	7.94	6.394±1.327c	20.808	4.52	5.56	5.003±0.256d	5.203
枸杞地 <i>Lycium chinense</i>	6.86	11.91	9.889±2.038b	20.621	6.43	7.77	7.145±0.367c	5.172
沙枣地 <i>Elaeagnus angustifolia</i>	5.65	8.19	7.248±0.887c	12.278	4.75	6.08	5.278±0.371d	7.013
草地 Grassland	8.61	12.33	10.612±1.502ab	14.13	6.85	8.91	7.853±0.571b	7.216

表 4 不同植被类型下压砂地土壤干燥化强度及其土壤干层厚度

Table 4 Soil desiccation intensity and thicknesses of desiccated soil layers on different vegetation types of the gravel mulched field

土壤干燥参数 Soil desiccation parameter	植被类型 Vegetation type					
	西瓜地 <i>Citrullus lanatus</i>	柠条地 <i>Caragana korshinskii</i>	枸杞地 <i>Lycium chinense</i>	沙枣地 <i>Elaeagnus angustifolia</i>	草地 Grassland	植被均值 Mean
干燥化指数 Soil desiccation index/%	85.026	2.152	40.478	6.638	54.078	37.674
干燥化强度 Soil desiccation intensity	A	D	C	D	B	C
极度干燥层 Extreme desiccated soil layer	0	186.667	0	106.667	0	58.667
强烈以上干燥层 Strong desiccated soil layer	0	540	66.667	513.333	13.333	226.667
严重以上干燥层 Serious desiccated soil layer	0	540	346.667	540	233.333	332
中度以上干燥层 Medium desiccated soil layer	166.667	540	540	540	453.333	448
土壤干层厚度 Thicknesses of desiccated soil layer	366.667	540	540	540	513.333	500
干层起始厚度 Forming depth of desiccated soil layer	80	60	60	60	60	64
干层内平均含水量 Soil water content in the inner of desiccated soil layer/%	8.668	5.241	7.252	5.621	7.822	6.921

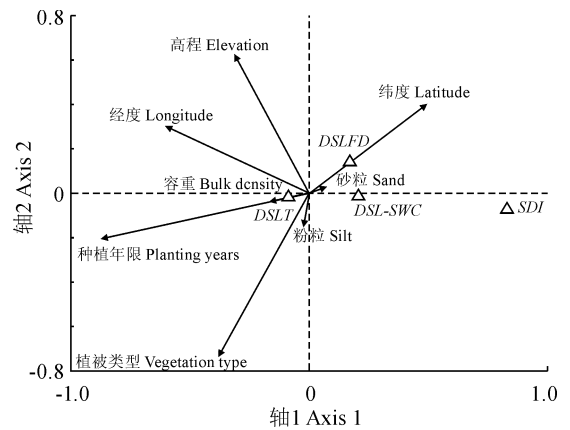
注: A. 轻度干燥化; B. 中度干燥化 C. 严重干燥化; D. 强烈干燥化

Notes: A. Slight desiccated; B. Medium desiccated; C. Serious desiccated; D. Strong desiccated

植被类型下压砂地均发生了不同程度的干燥化现象,其干燥化强度由强到弱依次为柠条地、沙枣地、枸杞地、草地、西瓜地。

2.4 压砂地土壤干燥化指标与环境因子的典型相关性分析

设环境因子为变量 x , 其中经度为 x_1 、纬度为 x_2 、高程为 x_3 、植被类型为 x_4 、种植年限为 x_5 、土壤容重为 x_6 、粉粒含量为 x_7 、砂粒含量为 x_8 ; 土壤干燥化指标为变量 y , 其中干燥化指数(SDI)为 y_1 , 干层起始形成深度(DSLFD)为 y_2 , 干层厚度(DSLT)为 y_3 , 干层内土壤平均含水量(DSL-SWC)为 y_4 。通过典型相关分析(图 2), 得到 4 组典型变量, 其中 U 表示环境因子综合指数, V 表示土壤干燥化指标, 其相关系数分别为 $\lambda_1 = 0.965^*$ 、 $\lambda_2 = 0.955$ 、 $\lambda_3 = 0.859$ 、 $\lambda_4 = 0.577$, 其中只有第一相关系数达到显著水平, 提取其典型变量数据进行分析。通过对土壤干燥化指标与环境因子进行典型相关分析, 得到其典型变量的线性组合为: $U_1 = -2.625x_1 - 2.747x_2 + 1.847x_3 - 0.852x_4 + 0.558x_5 + 0.197x_6 - 2.176x_7 - 1.77x_8$; $V_1 = -10.374y_1 - 0.202y_2 - 2.519y_3 + 8.084y_4$ 。在 U_1 各系数中经纬度、高程、植被类型、粉粒及砂粒含量等环境因子起决定性作用, 在 V_1 各系数中起决定性作用的为干燥化指数



DSLFD. 干层起始形成深度; DSLT. 干层厚度; DSL-SWC. 干层内土壤平均含水量; SDI. 土壤干燥化指数

图 2 土壤干燥化指标与环境因子的典型相关关系
DSLFD. Forming depth of desiccated soil layer;
DSLT. Thicknesses of desiccated soil layer;
DSL-SWC. Soil water content in the inner of desiccated soil layer; SDI. Soil desiccation index

Fig. 2 Canonical correlations of soil desiccation and environmental factors

(SDI)和干层内土壤平均含水量(DSL-SWC),说明宁夏中部旱区植被类型、种植年限、粉粒及砂粒含量等环境因子与土壤的干燥化指数(SDI)和干层内土壤平均含水量(DSL-SWC)关系更密切。

3 讨 论

环香山地区是宁夏中部旱区的核心区域,通过对该区不同植被类型下压砂地土壤含水量进行研究,发现该区农田(西瓜)、草地和人工林地(枸杞、柠条和沙枣)的土壤含水量的均值较低($<10\%$),与李军等对黄土高原北部半干旱偏旱区(海原)土壤含水量以及贮水量的研究结果相近,是由该区干旱少雨的自然环境所导致的。根据不同植被类型下压砂地土壤剖面含水量分布状况可知,在浅层土壤中西瓜地和枸杞地土壤含水量随深度增加而迅速降低,柠条地、沙枣地和草地含水量呈现为先增加后减小的趋势。其主要原因是由于西瓜地和枸杞地的种植年限较短,且农田管理措施较完善,土壤表层砂石覆盖较好,能较好地截留雨水,增加水分下渗量^[26],同时也会减弱风吹日晒的影响,抑制土壤水分蒸发^[27]。而柠条地、沙枣地和草地的压砂地种植年限长,人为因素影响小,砂石层的含土量增加,渗水能力减弱,土壤水分蒸发较明显,导致含水量呈现为先增加后减小的趋势。深层土壤中,土壤水分含量随深度增加呈波浪式缓慢增加,其主要原因是由于土壤深层水分主要受到植被根系和剖面土壤质地的共同影响,随土壤深度的增加土壤根系逐渐减少,对土壤水分影响逐渐减弱,土壤含水量有所恢复^[28]。

通过对宁夏中部旱区不同植被类型下压砂地土壤干燥化现象研究发现,植被类型是影响其干燥化现象的重要因素。分析原因可能是不同植物的根系分布深度、密度及地上生物量具有很大差异,导致植物耗水的异质性,同时改变土壤入渗和持水能力,影响土壤水分循环^[1,29]。众多学者对不同植被类型下土壤干燥化现象进行研究,发现土壤干燥化强度和干层厚度通常表现为林地 $>$ 草地 $>$ 农地,干层起始深度为林地 $<$ 草地 $<$ 农地,本研究中宁夏中部旱区压砂地土壤干燥化现象的表现与之相一致^[15, 30-33]。其主要原因是在相同的气候和土壤环境下,柠条、沙枣和枸杞等灌木林的生长期长,地上生物量大且根系分布深,长期根系吸水导致土壤深层水分亏缺严重,形成与根系延伸一致的土壤干层,其土壤干层分布厚度大,干燥化程度严重;草地虽然植物生长期长,密度较大,但其地上生物量较小且根系分布浅,植株耗水量较灌木林地少,土壤深层水分亏缺相对较轻;西瓜等一年生作物农田干燥化的成因是由于耕作层和下层土壤水势梯度差所引起的水分向根系层逐年上移导致的^[13, 34],干层分布较浅,干燥化程

度较轻。同时,本研究通过对比枸杞地、柠条地和沙枣地土壤含水量剖面发现,枸杞地的土壤含水量明显高于柠条地和沙枣地,这可能与作物的种植年限、植株密度、冠层效应以及农田管理措施(除草、施肥和灌溉)有关,枸杞作为当地农民的主要经济作物之一,种植密度较小且种植年限较短,同时除草、翻耕等会中断毛管水的连续性,减少水分蒸发,灌溉和施肥会增加土壤的水分含量,而柠条地和沙枣地受人为因素影响少,种植年限较长,根系密度大分布深,同时柠条种植密度大,沙枣的植株高,增强了作物蒸散能力,导致植株的耗水能力的增大。除此之外,地形地貌、集水措施和土壤性质等因素都是影响压砂地土壤水分状况的重要因素,具体情况还需要进一步研究^[28]。

宁夏中部旱区压砂地土壤干燥化现象究其根本原因是由于该区自然降水偏少、蒸发旺盛和植物强烈耗水,导致土壤水分负平衡,亏缺到一定程度的结果。本研究发现,除西瓜地外,该区不同植被类型下土壤深层均呈现出较明显的干燥化现象,特别是柠条、沙枣和枸杞林地。长此以往,干燥化程度加剧和深层永久性土壤干层产生将成为一种必然趋势。永久性土壤干层形成后,土壤水库效应会逐渐减弱,甚至消失,植物生长将完全依赖于自然降水,作物产量随降水波动加剧,并呈逐渐减少趋势,最终会失去生产利用价值^[16]。即使将改变耕作方式和土地利用方式,降水入渗层很少能超过植物耗水量,其深层土壤干层的湿度很难得到恢复,即使可以恢复,也需要相当漫长的时间。因此,一旦深层土壤干燥化达到严重程度,其后果不仅表现为当前土壤退化而失去生产价值,而且意味着今后相当长的时间内不宜再发展生产。

4 结 论

本研究在观测宁夏中部旱区压砂地沙枣、柠条、西瓜、枸杞及草地土壤含水量的基础上,分析比较不同植被类型下土壤含水量、水分过耗量、干燥化指数、干层厚度等土壤干燥化指标。结果表明:1)宁夏中部旱区不同植被类型下压砂地土壤含水量在0~600 cm的均值为7.163%,土壤贮水量和土壤有效贮水量均值分别为591.978 mm和187.088 mm,均明显低于当地土壤稳定湿度的含水量值和贮水量。西瓜地的土壤含水量和贮水量最大,其次为荒草、枸杞、沙枣,柠条地最低。不同植被类型下压砂地土壤均发生了不同程度的水分过耗现象,且植被类型间

存在显著差异。2)依据土壤含水量剖面分布特征,不同植被类型下土壤含水量随深度的增加呈先减小后增大的趋势,除西瓜外,其余植被土壤剖面含水量明显低于当地土壤稳定湿度,最大耗水深度均超过600 cm,但深层土壤含水量呈较明显的恢复趋势。3)不同植被类型下压砂地土壤平均干燥化系数介于2.152%~85.026%之间,平均干燥化系数为37.674%,属于严重干燥化强度,其中柠条地和沙枣

地均达到强烈干燥化强度。土壤平均干层厚度达到或超过500 cm,其干燥化程度由强到弱依次为柠条地、沙枣地、枸杞地、草地、西瓜地。4)通过对压砂地土壤干燥化指标与环境因子进行典型相关性分析发现,经纬度、高程、植被类型、粉粒及砂粒含量等环境因子是影响干燥化指数、干层内土壤含水量等干燥化指标的重要因素。

参考文献:

- [1] 王占军,蒋齐,何建龙,等.宁夏环香山地区压砂地土壤肥力特征分析[J].水土保持学报,2010,24(2):201-204.
WANG Z J, JIANG Q, HE J L, et al. Characteristic analysis of soil fertility of gravel-mulched land around Xiangshan Mountain area in Ningxia[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2): 201-204.
- [2] YANG Q, WANG Y J, XIE Z K. Long-term gravel-sand mulch affects soil physicochemical properties, microbial biomass and enzyme activities in the semi-arid Loess Plateau of North-western China[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 2014, 64(4): 294-303.
- [3] 白一茹,王幼奇,王菲,等.压砂地土壤导水特性空间格局及影响因子[J].干旱地区农业研究,2016,34(4):55-61.
BAI Y R, WANG Y Q, WANG F, et al. Spatial variability of soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors in the gravel mulched field of Ningxia[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(4): 55-61.
- [4] LU H S, YU Z B, HORTON R, et al. Effect of gravel-sand mulch on soil water and temperature in the semiarid loess region of Northwest China[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013, 18(11): 1484-1494.
- [5] 赵文举,马宏,徐裕,等.模拟降雨条件下压砂地土壤水分入渗规律研究[J].水土保持学报,2015,29(4):79-84.
ZHAO W J, MA H, XU Y, et al. Study on water infiltration pattern of soil gravel-sand mulched field under simulated rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(4): 79-84.
- [6] SHEN Y Y, LI L L, CHEN W, et al. Soil water soil nitrogen and productivity of lucerne-wheat sequences on deep silt loams in a summer dominant rainfall environment[J]. *Field Crops Research*, 2009, 11(1): 97-108.
- [7] 罗珠珠,李玲玲,牛伊宁,等.陇中黄土高原半干旱区苜蓿地土壤干燥化特征及适宜种植年限[J].应用生态学报,2015,26(10):3059-3065.
LUO Z Z, LI L L, NIU Y N, et al. Soil dryness characteristics of alfalfa cropland and optimal growth years of alfalfa on the Loess Plateau of central Gansu[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(10): 3059-3065.
- [8] 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.
SHAO M A, JIA X X, WANG Y Q, et al. A review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau[J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(1): 14-22.
- [9] 王志强,刘宝元,张岩.不同植被类型对厚层黄土剖面水分含量的影响[J].地理学报,2008,63(7):703-713.
WANG Z Q, LIU B Y, ZHANG Y. Effects of different vegetation types on soil moisture in deep loess soil profiles[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(7): 703-713.
- [10] ZHAO J B, DU J, CHEN B Q, et al. Dried earth layers of artificial forestland in the Loess Plateau of Shaanxi Province[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2007, 17(1): 114-126.
- [11] 王云强.黄土高原地区土壤干层的空间分布与影响因素[D].北京: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),2010.
- [12] 李剑,赵忠,袁志发,等.黄土高原刺槐林地土壤水分垂直分布特征及其动态模型的建立[J].西北植物学报,2014,34(8):1666-1675.
LI J, ZHAO Z, YUAN Z F, et al. Dynamic model of soil moisture of *Robinia pseudoacacia* plantations in the Loess Plateau[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2014, 34(8): 1666-1675.
- [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.
ZHU W X, NIU J J, LIU G, et al. The influence of vegetation types on the soil moistures during growing season in Loess area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(1): 152-156.
- [14] 杜娟,赵景波.西安高陵人工林土壤干层与含水量季节变化研究[J].地理科学,2007,27(1):98-103.
DU J, ZHAO J B. Seasonal change of soil moisture content in dried soil layer in artificial forest in Gaoling of Xi'an[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(1): 98-103.
- [15] 易小波,贾小旭,邵明安,等.黄土高原区域尺度土壤干燥化的空间和季节分布特征[J].水科学进展,2017,28(3):373-381.
YI X B, JIA X X, SHAO M A, et al. Regional spatial and seasonal characteristics of soil desiccation on the Loess Plateau[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(3): 373-381.
- [16] 程立平,刘文兆,李志.黄土源区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征[J].生态学报,2014,34(8):1975-1983.
CHENG L P, LIU W Z, LI Z. Soil water in deep layers under different land use patterns on the Loess Plateau[J].

- Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(8): 1 975-1 983.
- [17] 李 军,陈 兵,李小芳,等. 黄土高原不同降水类型区林地、草地与农田土壤干燥化效应比较[J]. 土壤学报, 2008, **45**(1): 40-49.
- LI J, CHEN B, LI X F, *et al.* Soil desiccating effects of forestlands, grasslands and croplands in zones different in rainfall pattern on the Loess Plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, **45**(1): 40-49.
- [18] 李 军,陈 兵,李小芳,等. 黄土高原不同植被类型区人工林地深层土壤干燥化效应[J]. 生态学报, 2008, **28**(4): 1 429-1 445
- LI J, CHEN B, LI X F, *et al.* Effects of deep soil desiccation on artificial forestlands in different vegetation zones on the Loess Plateau of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(4): 1 429-1 445.
- [19] WANG Y Q, SHAO M A, ZHU Y J, *et al.* Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2011, **151**(4): 437-448.
- [20] 张晨成,邵明安,王云强. 黄土区坡面尺度不同植被类型下土壤干层的空间分布[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(17): 102-108.
- ZHANG C C, SHAO M A, WANG Y Q. Spatial distribution of dried soil layers under different vegetation types at slope scale in loess region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, **28**(17): 102-108.
- [21] 杨 磊,卫 伟,陈利顶,等. 半干旱黄土丘陵区人工植被深层土壤干化效应[J]. 地理研究, 2012, **31**(1): 71-81.
- YANG L, WEI W, CHEN L D, *et al.* Soil desiccation in deep soil layers under different vegetation types in the semi-arid loess hilly region[J]. *Geographical Research*, 2012, **31**(1): 71-81.
- [22] 郭 彪,王尚义,牛俊杰,等. 晋西北不同植被类型土壤水分时空变化特征[J]. 水土保持通报, 2015, **35**(1): 267-273.
- GUO B, WANG S Y, NIU J J, *et al.* Characteristics of soil moisture variation under different vegetation types in northwestern Shanxi Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, **35**(1): 267-273.
- [23] 徐学选,张北赢,田均良. 黄土丘陵区降水-土壤水-地下水转化实验研究[J]. 水科学进展, 2010, **21**(1): 16-22.
- XU X X, ZHANG B Y, TIAN J L. Experimental study on the precipitation soil-water-groundwater transformation in loess hilly region[J]. *Advances in Water Science*, 2010, **21**(1): 16-22.
- [24] 陈洪松,邵明安,王克林. 黄土区深层土壤干燥化与土壤水循环特征[J]. 生态学报, 2005, **25**(10): 2 491-2 498.
- CHEN H S, SHAO M A, WANG K L. Desiccation of deep soil layer and soil water cycle characteristics on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(10): 2 491-2 498.
- [25] 苏子龙,张光辉,于 艳. 东北典型黑土区不同土地利用方式土壤水分动态变化特征[J]. 地理科学, 2013, **33**(9): 1 104-1 110.
- SU Z L, ZHANG G H, YU Y. Soil moisture characteristic of different land use types in the typical black soil region of northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, **33**(9): 1 104-1 110.
- [26] 赵云鹏,白一茹,王幼奇,等. 城市绿地覆盖砂石后土壤水分入渗过程及模型分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, **45**(7): 67-73.
- ZHAO Y P, BAI Y R, WANG Y Q, *et al.* Soil infiltration process and model analysis of gravel mulch on urban green space[J]. *Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Edi.)*, 2017, **45**(7): 67-73.
- [27] 关红杰. 砂石覆盖对土壤入渗及蒸发的影响[D]. 北京: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), 2009.
- [28] 曹 裕,李 军,张社红,等. 黄土高原苹果园深层土壤干燥化特征[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(15): 72-79.
- CAO Y, LI J, ZHANG S H, *et al.* Characteristics of deep soil desiccation of apple orchards in different weather and landform zones on the Loess Plateau in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, **28**(15): 72-79.
- [29] 何福红,黄明斌,党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤干层的分布特征[J]. 自然资源学报, 2003, **18**(1): 30-36.
- HE F H, HUANG M B, DANG T H. Distribution characteristic of dried soil layer in Wang dong gou watershed in gully region of the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, **18**(1): 30-36.
- [30] 樊 军,郝明德,邵明安. 黄土旱源农业生态系统土壤深层水分消耗与水分生态环境效应[J]. 农业工程学报, 2004, **20**(1): 61-64.
- FAN J, HAO M D, SHAO M A. Water consumption of deep soil layers and eco-environmental effects of agricultural ecosystem in the Loess plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, **20**(1): 61-64.
- [31] WANG Y Q, SHAO M A, LIU Z P. Large-scale spatial variability of dried soil layers and related factors across the entire Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2010, **159**: 99-108.
- [32] ZHU Y J, SHAO M A. Variability and pattern of surface moisture on a small-scale hillslope in Liu dao gou catchment on the northern Loess Plateau of China [J]. *Geoderma*, 2008, **147**(4): 185-191.
- [33] 刘 庚,牛俊杰,朱炜歆,等. 黄土丘陵区不同植被土壤水分的分异性特征[J]. 水土保持通报, 2014, **34**(6): 83-88.
- LIU G, NIU J J, ZHU W X, *et al.* Heterogeneous characteristics of soil moisture of different vegetation types in loess hilly regions[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, **34**(6): 83-88.
- [34] 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响[J]. 生态学报, 1983, **3**(2): 91-101.
- LI Y S. The properties of water cycle in soil and their effect on water cycle for land in the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1983, **3**(2): 91-101.