

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.003.

高元亢, 李婧, 汪星, 等. 黄土丘陵苜蓿与柠条深层土壤干化状况及根系与养分特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 168-176.

Gao Yuankang, Li Jing, Wang Xing, et al. Soil Desiccation and Root and Nutrient Characteristics of *Medicago sativa* L. and *Caragana korshinskii* in Loess Hilly Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 168-176.

黄土丘陵苜蓿与柠条深层土壤干化状况及根系与养分特征

高元亢¹, 李婧², 汪星¹, 吕雯³, 于晓燕¹, 王雁超¹, 王永强¹

(1.宁夏大学农学院, 银川 750021; 2.银川海关技术中心, 银川 750000; 3.宁夏大学生态环境学院, 银川 750021)

摘要: [目的]探究宁夏南部黄土丘陵区雨养苜蓿及柠条地的深层根系与土壤水分和养分的协同关系, 进而为宁南山区人工植被建设与管理以及生态环境高质量发展提供科学依据。 [方法]采用野外调查与室内分析相结合的方法, 对宁南黄土丘陵区人工种植 18 a 的紫花苜蓿地与 20 a 的柠条林地 0—1 000 cm 土层中土壤水分、根系垂直分布、土壤 N、P 含量变化进行了分析。 [结果] (1) 苜蓿地和柠条林地土壤 200 cm 以下全剖面已经处于干化状态, 其中苜蓿和柠条地土壤处于极度干燥化水平的土层分别为 200—720 cm 和 360—720 cm, 0—1 000 cm 深度范围土壤水分储量较相似地形的雨养农田分别少 987.55, 977.78 mm; (2) 苜蓿和柠条根系主要集中在表层 0—120 cm 土层, 该层根系占 0—1 000 cm 剖面总根干重的 45.66%, 57.54%, 根长密度占 44.45%, 67.58%; (3) 苜蓿和柠条土壤 N、P 养分分布规律与根系分布规律一致, 表层 0—120 cm 范围内平均全 N 含量分别为 0.53, 0.58 g/kg, 是 0—1 000 cm 土壤全 N 含量平均值的 1.77 倍和 1.87 倍, 在 0—120 cm 范围内全 P 平均含量达 0.51, 0.53 g/kg, 与 0—1 000 cm 土层全 P 含量平均值近似。 [结论]黄土丘陵区深层土壤干化背景下人工林草地土壤水分、根系及养分特征具有特殊性, 深入研究人工林草地深层土壤水分、根系及养分协同关系有助于区域人工植被可持续发展及土壤碳循环的调控。

关键词: 黄土丘陵区; 植物根系; 土壤水分; 土壤养分

中图分类号: S152; S153

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0168-09

Soil Desiccation and Root and Nutrient Characteristics of *Medicago sativa* L. and *Caragana korshinskii* in Loess Hilly Area

Gao Yuankang¹, Li Jing², Wang Xing¹, Lü Wen³, Yu Xiaoyan¹,
Wang Yanchao¹, Wang Yongqiang¹

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Yinchuan Customs Technology Center, Yinchuan 750000, China; 3. School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the synergistic relationship between deep roots and soil moisture and nutrients in rainfed *Medicago sativa* L. and *Caragana korshinskii* land in the loess hilly area of southern Ningxia, and to provide scientific basis for the construction and management of artificial vegetation and the high-quality development of ecological environment in the hilly area of southern Ningxia. [Methods] The changes of soil moisture, root vertical distribution and soil N and P contents in 0—1 000 cm soil layer of 18-year-old *Medicago sativa* L. land and 20-year-old *Caragana korshinskii* forest land were analyzed by field investigation and indoor analysis. [Results] (1) The whole profile of soil below 200 cm in *Medicago sativa* L. land and *Caragana korshinskii* land was already in a dry state. The soil layers of *Medicago sativa* L. land and *Caragana korshinskii* land at extremely dry levels were 200—720 cm and 360—720 cm,

收稿日期: 2022-08-05

修回日期: 2022-10-09

资助项目: 宁夏自然科学基金(2022AAC05019; 2021AAC03042); 国家自然科学基金(32060301)

第一作者: 高元亢(1998—), 男, 新疆乌鲁木齐人, 硕士研究生在读, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: 3465203592@qq.com

通信作者: 汪星(1984—), 男, 陕西杨凌人, 博士, 副教授, 主要从事水土资源高效利用研究。E-mail: Xingwang1984@foxmail.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

respectively. The soil water storage in the depth range of 0—1 000 cm was 987.55 mm and 977.78 mm and less than that of rainfed farmland with similar topography. (2) The roots of *Medicago sativa* L. and *Caragana korshinskii* mainly concentrated in the 0—120 cm soil layer, which accounted for 45.66% and 57.54% of the total root dry weight in the 0—1 000 cm profile, and the root length density accounted for 44.45% and 67.58%. (3) The distribution of N and P nutrients in the soil of *Medicago sativa* L. and *Caragana korshinskii* lands was consistent with that of root system. The average total N content in the surface layer of 0—120 cm was 0.53 g/kg and 0.58 g/kg, respectively, which was 1.77 times and 1.87 times of the average total N content in the soil of 0—1 000 cm. The average total P content in the range of 0—120 cm was 0.51 g/kg and 0.53 g/kg, which was similar to the average total P content in the 0—1 000 cm soil layer. [Conclusion] The characteristics of soil moisture, root system and nutrient of artificial forest and grassland under the background of deep soil drying in the loess hilly area are special. In-depth study on the synergistic relationship of soil moisture, root system and nutrient in deep soil of artificial forest and grassland is helpful for the sustainable development of regional artificial vegetation and the regulation of soil carbon cycle.

Keywords: loess hilly area; plant roots; soil moisture; soil nutrient

土壤水分、植物根系、养分协同关系是土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 研究的重要内容^[1]。近年的研究证明根系构型 (RSA) 反映根的空间排列和位置, 对土壤中水分和养分具有决定作用, 根系分泌物是植物与微生物交流的途径, 在生态系统对环境变化的响应中发挥着关键作用^[2-6]。但是由于黄土区多年生植物往往根系深达 1 000 cm 以下, 研究深层根系及其水分和养分难度极大, 所以相关研究报道甚少。宁南山区地处黄土高原西部, 属于典型的黄土丘陵区^[7], 受严重的水蚀影响, 该地区地貌复杂, 水土流失严重, 紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 和柠条 (*Caragana korshinskii*) 是当地重要的牧草资源和主要的退耕还草植物, 已有多年的研究证明在干旱和半干旱地区植被恢复和作物种植结构应考虑土壤水分动态以维持环境的可持续发展^[8], 而在黄土丘陵区半干旱环境下苜蓿和柠条两种植物生长耗水大于当地降水对土壤水分的补给量, 因而苜蓿和柠条在其生长过程中持续消耗土壤深层水分并造成深层土壤干化不断加重, 土壤水分有效性降低, 最终导致苜蓿及柠条生长衰败。近年来随着紫花苜蓿与柠条利用年限的不断增加, 群落衰败特征日益凸显。黄土丘陵半干旱区苜蓿和柠条地不断恶化的土壤水分环境与植物日益衰败的现象一直是植物学、生态学、土壤学等众多领域学者关注的焦点和热点^[9-12]。诸多专家担心半干旱黄土区深层土壤的干化会造成该区域后续植物更替以及区域植被建设可持续发展的严重障碍^[12-14]。因此, 通过研究黄土丘陵区深层土壤干化背景下高龄苜蓿和柠条根系分布与深层土壤水分含量及养分分布特征及其差异, 阐明土壤水分、植物根系、养分的协同关系, 既是 SPAC 研究的重要内容, 也是当地生态建设可

持续发展与植被管理的关键科学问题。

有研究证明苜蓿和柠条每年较旱作农田多消耗至少 50 mm 的土壤含水量^[15-16], 同时多年生长的苜蓿和柠条还会在 200 cm 以下出现土壤干层^[17]。半干旱黄土区因其独特的水文特征, 一旦形成 200 cm 以下干层, 将很难得到恢复^[18]。干层限制了苜蓿与柠条的生长发育, 使苜蓿产量下降, 柠条生活力水平降低, 最终引发林草地退化衰败, 并且对后续植被和作物的生长起着持续不良影响^[19-21]。根系分布特征决定了根系与土壤的接触面积与深度, 直接影响植物对土壤水分和养分的利用情况, 对植被地上部分的生长有着重要的意义^[22]。土壤养分含量影响苜蓿及柠条的生长状况^[23], 土壤养分含量降低, 不仅会导致苜蓿与柠条生长不良, 还会影响其生态与经济效益。由于植物根系不易观测, 且目前在半干旱黄土区有关苜蓿、柠条生长与根系研究较多集中在 200—500 cm 土层范围, 对于老龄苜蓿和柠条研究报道较少, 尤其对老龄苜蓿和柠条地深层根系、水分及养分分布关系研究较薄弱。高龄苜蓿和柠条深层根系的土壤水分养分状态如何? 分布规律是怎样的? 这些问题依然亟待去研究。故本研究选择宁南山区现存 18 a 苜蓿和 20 a 柠条为研究对象, 以揭示宁南山区雨养老龄苜蓿和柠条土壤水分的分布规律、根系分布深度、根系与养分空间分布及相互关系, 旨在为宁南山区人工植被建设与管理以及生态环境高质量发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区固原市彭阳县白阳镇中庄村, 地理坐标在东经 105°9′—106°58′, 北纬

34°14'—37°04', 平均海拔为 1 600~1 700 m, 地貌类型为典型的黄土高原梁峁丘陵地, 区内梁峁相间, 地形支离破碎沟壑纵横, 土壤类型以黄绵土与黑垆土为主, pH 值 8~8.5, 土厚 > 1 500 cm, 气候属温带大陆性季风气候, 年均气温 7.4℃, 降雨集中在 7—9 月, 年平均降水量 400~500 mm, 干燥度 ($\geq 0^\circ\text{C}$ 的蒸发量) 为 1.21~1.99, 日照时间 2 200~2 700 h, 无霜期 140~160 d^[24]。研究区内人工种植苜蓿和柠条均为雨养旱作, 研究样地为缓坡生长 18 a 的苜蓿地和 20 a 的柠条林, 苜蓿地上生物量分别为 3 187 kg/hm², 柠条平茬当年地面生物 2 231 kg/hm², 实测该试验地土壤容重均值为 1.33 g/cm³, 田间持水量为 18.93%, 凋萎含水量采用 Van Genuchten 模型拟合得到, 均值为 7.12%。土壤稳定含水量取田间持水量的 60%^[25], 即 11.36%, 低于稳定含水量视为土壤干化^[18]。

1.2 研究方法

研究区苜蓿于 2002 年 4 月以 40 cm 的行距人工条播种植, 品种为甘农 3 号紫花苜蓿 (*Medicago sativa* cv. Gannong No.3), 苜蓿地和柠条林均选在坡度 15° 的阳坡, 研究区带状柠条林于 2000 年 4 月栽种, 对照旱作农田为附近同一水平坡度相似的坡耕地, 对照农地作物为谷子和土豆与豆类交替种植。于 2020 年 8 月 5—20 日, 对苜蓿地和柠条林 0—1 000 cm 深度的土壤及根系进行取样, 同类样地选取 3 个重复, 样地之间

距离为 5~10 m (取样地如图 1 所示)。

1.2.1 土壤水分测定 使用烘干法对土壤水分进行测定^[26]。在研究区(坡中)选择长势均一的苜蓿和柠条, 设置苜蓿地、柠条地及早作农田共 3 个试验区, 各试验区均设置 3 个样方, 采用土钻法在样方内取样(图 1), 测定 0—1 000 cm 区间土层的土壤水分, 取样间隔设置为 40 cm, 每个样地取样一次, 3 个样地为 3 次重复。将采集的土壤样品装入铝盒带回实验室, 称重后放入烘箱, 设定烘箱温度 105℃, 烘干 12 h, 之后取出铝盒并称重计算得到土壤含水量。

1.2.2 土壤全氮、全磷测定 使用土钻法取样, 采集方法和分层方法和上文土壤水分测定部分相同, 将采集的土样自然风干, 在实验室检测并分析样品各养分指标, 本研究使用凯式定氮法对全氮进行测定, 使用 HClO₄-H₂SO₄ 法对全磷进行测定^[27]。

1.2.3 根系测定 考虑到深层根系获取的难度, 本研究采用根钻法对深层根系进行取样, 根钻直径 10 cm, 钻头长度 10 cm, 取样方式如图 1 所示。每次取样深度间距为 10 cm, 条状苜蓿两侧交替采样, 带状柠条与柠条带两侧交替采样。用清水将样品清洗干净之后使用大于 18 目的网筛筛出根系, 再利用 EPSON(PERFECTION C700) 根系扫描仪进行扫描图像, (WinRHIZOPro, 2009) 测定根长, 计算得出根长密度。将深度区间的根系烘干称重得到根系干重。

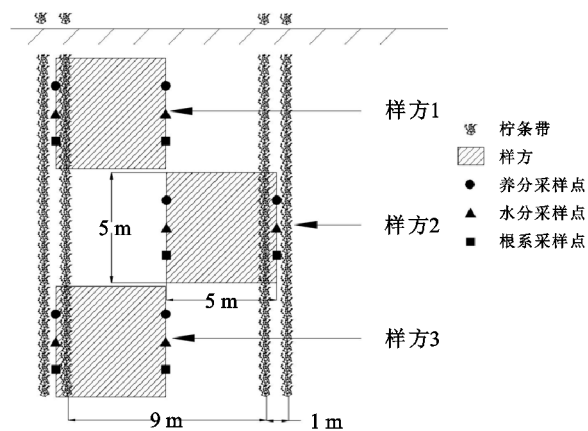
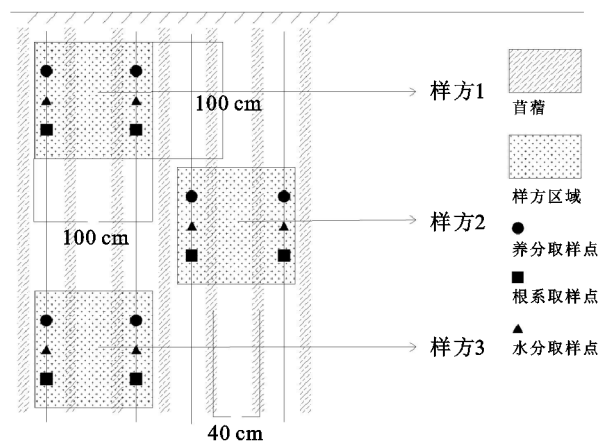


图 1 苜蓿地、柠条林取样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of *Medicago sativa* L. and *Caragana korshinskii* forest sampling

1.2.4 土壤容重测定 土壤容重采用环刀法 (100 cm³) 进行测定, 在样地附近 5 m 范围内开挖一个 300 cm 深的剖面, 利用环刀每 20 cm 取样一次, 将装有土壤的环刀放入烘箱, 设定烘箱温度 105℃, 烘干时间 12 h, 12 h 之后将烘箱内环刀取出称重, 计算并得到土壤容重。

1.2.5 生物量测定 对样方的苜蓿和柠条进行采集并将采集的两批样本分别称量其鲜重, 然后分别将其置于

烘箱先以 105℃ 进行 30 min 的杀青处理, 再以 80℃ 烘干至恒重, 取出并分别对其干重进行称量测定。

1.2.6 计算公式 土壤储水量^[26]、土壤干燥化强度^[28]、土壤水分有效性^[29]、土壤供水系数^[29] 计算如下:

$$\text{SWS} = \sum_{i=1}^n \theta_i \times h_i \quad (1)$$

式中: SWS 为一定厚度的土壤储水量 (mm); n 为一定深度划分的层次数; θ_i 为第 i 层土壤体积含水量; h_i 为第 i 层土壤厚度 (mm)。

$$I_{SD}=\frac{\theta-\theta_w}{\theta_{ss}-\theta_w}\times 100\%$$

(2)

式中: I_{SD} 为土壤干燥化指数; θ 为实测土壤含水量; θ_{ss} 为土壤稳定含水量; θ_w 为土壤凋萎湿度。

$$A_w=\frac{\theta-\theta_w}{\theta_i-\theta_w}\times 100\%$$

(3)

式中: A_w 为土壤水分有效性指数; θ 为实测土壤含水量; θ_w 为土壤凋萎含水量; θ_i 为田间持水量。 $A_w<0$ 表示水分无效水。

$$K_s=\frac{\ln(A_w+1)}{\ln(101)}$$

(4)

式中: K_s 为土壤供水系数,当 $A_w=100$ 时, $K_s=1$,此时为作物最大腾发量,当土壤含水量下降至凋萎湿度时, $K_s=0$,此时作物不能吸水,腾发量为 0。根据刘增文^[30]、张珂萌^[28]等研究将土壤水分有效性和干燥化程度进行划分(表 1)。

表 1 土壤水分有效性及干燥化状态划分标准

Table 1 Classification standard of soil moisture availability and soil desiccation state

水分有效性水平	θ (实测土壤含水量)	干燥化程度	$I_{SD}/\%$
富余水	大于田间持水量	无干燥化	$I_{SD}<0$
易效水	田间持水量的 80%~100%	轻度干燥化	$0\leq I_{SD}<75$
中效水	田间持水量的 60%~80%	严重干燥化	$75\leq I_{SD}<100$
难效水	凋萎湿度到田间持水量的 60%	极度干燥化	$I_{SD}\geq 100$
无效水	小于凋萎湿度		

1.3 数据分析

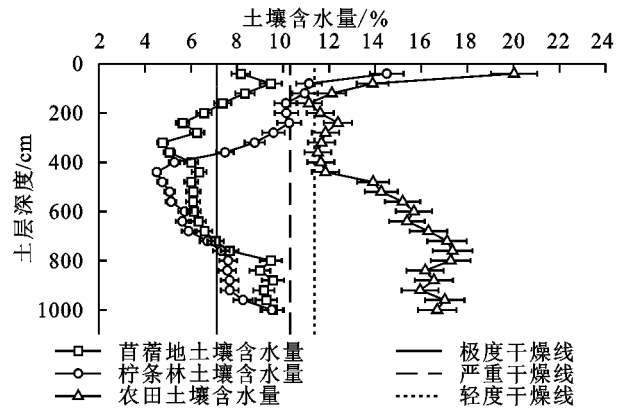
利用 WPS Office 对各参数进行计算、整理、归纳,使用 SPSS 25.0 软件对数据进行统计分析,Origin 2018 绘制各测定指标的趋势图。

2 结果与分析

2.1 苜蓿地、柠条土壤含水量垂直剖面分布特征

2.1.1 土壤干化状况 考虑 0—200 cm 土层水分受实时降水入渗影响波动较大^[31],在此不做详细分析。根据野外调查将苜蓿、柠条和农田(对照)0—1 000 cm 土壤水分垂直变化作图 2 表示。由图 2 可以看出,苜蓿、柠条和农田 200 cm 以下农田通体水分高于苜蓿和柠条林地,其中柠条林地水分在 200—400 cm 高于苜蓿地,400 cm 以下柠条林地土壤水分略低于苜蓿。从土壤干燥化程度看,18 a 苜蓿地在 200—720 cm 处于极度干燥化,其余各深度处于重度干燥化,柠条林地在 200—360 cm 处于严重干燥化,360—720 cm 处于极度干燥化,720 cm 以下为严重干燥化;农田 200—1 000 cm 范围土壤处于无干化状态。苜蓿地和柠条林土壤水分与附近旱作农地土壤水

分对比可以看出,200—1 000 cm 剖面苜蓿地平均土壤含水量与农田平均土壤含水量差值达 7.56%,柠条林平均土壤含水量与农田差值为 7.46%;苜蓿地土壤储水量为 753.36 mm,柠条林为 763.13 mm,农田为 1 740.91 mm,农田土壤储水量较苜蓿地和柠条林差异明显,与苜蓿地差值为 987.55 mm,与柠条林差值为 977.78 mm,按照苜蓿生长 18 a 计算每年苜蓿较早作农田多耗水 54.86 mm,年地面生物量为 3 187 kg/hm²,年均水分利用效率(WUE)为 58.09 kg/(hm²·mm),柠条生长 20 a 每年柠条较农田多耗水 48.89 mm,平茬当年地面生物 2 231 kg/hm²,年均水分利用效率为 45.63 kg/(hm²·mm)。



注:极度干燥线表示 $I_{SD}=0\%$ 时的土壤含水量,土壤含水量低于该水平表明土壤极度干燥;严重干燥线表示 $I_{SD}=75\%$ 时的土壤含水量,土壤含水量低于该水平表明土壤严重干燥;轻度干燥线表示 $I_{SD}=100\%$ 时的土壤含水量,土壤含水量低于该水平表明土壤轻度干燥,高于该水平则表明土壤无干燥化。

图 2 苜蓿地和柠条林与对照旱作农田 0—1 000 cm 土壤水分垂直变化

Fig. 2 Vertical variation of soil moisture between *Medicago sativa* L. field and *Caragana korshinskii* forest and control dry farmland at 0—1 000 cm

2.1.2 土壤剖面水分有效性 利用土壤水分有效性指标 A_w 对苜蓿地和柠条林不同深度土壤水分有效性进行比较(表 2)。结果显示苜蓿地 200—720 cm 土层深度 $A_w<0$,显著低于 720—1 000 cm 土层深度 A_w ($p<0.05$);在 200—720 cm 范围各土层深度之间 A_w 无显著差异。柠条林 320—720 cm 范围各土层 $A_w<0$,显著低于 720—1 000 cm 土层深度 A_w ($p<0.05$);200—320 cm 土层的 A_w 则显著高于 720—1 000 cm 土层的 A_w 。由表 1 可知,苜蓿地土壤水分有效性等级划分结果为:苜蓿地 760—1 000 cm 深度土壤水分为难效水,200—760 cm 范围土壤水分无效水。柠条林对照农地土壤水分有效性等级划分结果为:200—360 cm 和 760—1 000 cm 范围土壤水分为难效水,360—760 cm 范围土壤水分无效水。

从苜蓿地土壤供水系数上看(表2),苜蓿地土壤平均供水系数 K_s 为 0.20,其土壤水分可达苜蓿生长所产生最大腾发量的 20%,不同深度土壤供水系数变化规律为: K_s 值随着土层深度的增加先增大后减小,其中在 200—720 cm 土层,土壤供水系数 K_s 值为 0,说明土壤水分极度亏缺,没有供水能力,苜蓿根系无法从该深度土壤汲取水分,同时腾发量也为 0;在土壤水分活跃层(200 cm 深度)以下,苜蓿地土壤 720—1 000 cm 土层的供水系数 K_s 值最大,土壤水分状态较好,基本可供应其达到最大生长腾发量。柠条林的土壤平均供水系数 K_s 为 0.27,土壤水分达到了柠条生长过程中最大腾发量的 27%,其各深度土层土壤供水系数 K_s 规律如下:同苜蓿地一样,整体上也呈现出 K_s 值随着深度的增加先减小后增大的趋势,其中在 320—720 cm 土层供水系数 K_s 值为 0,说明该深度土层土壤严重干旱,水分状况差,该深度土壤供水能力为 0,无法为柠条的生长发育提供水分补给;土壤水分活跃层(200 cm 深度)以下柠条林土壤 200—320 cm 土层的供水系数 K_s 值最大,土壤水分状态良好,基本能够供应柠条达到最大生长腾发水平的耗水量。

表 2 0—1 000 cm 深度土壤水分指标统计

Table 2 Statistics of soil moisture index at 0—1 000 cm depth

指数	土层深度/cm	苜蓿地	柠条林
A_w	200—320	$-0.1109 \pm 0.03b$	$0.2702 \pm 0.08a$
	320—440	$-0.1106 \pm 0.05b$	$-0.1124 \pm 0.08c$
	440—720	$-0.0666 \pm 0.05b$	$-0.1335 \pm 0.08c$
	720—1000	$0.1677 \pm 0.05a$	$0.0702 \pm 0.09b$
K_s	200—320	0.00	0.72
	320—440	0.00	0.00
	440—720	0.00	0.00
	720—1000	0.53	0.45
	平均值	0.20	0.27

注:同列不同小写字母表示差异性在 0.05 水平上显著($p < 0.05$)。

2.2 苜蓿、柠条根系分布特征

不同深层下苜蓿与柠条根系干重垂直分布变化如图 3 所示。本次野外根系测定取样深度均为 0—1 000 cm,但取样发现根系深度未达到 1 000 cm 深度,苜蓿与柠条林地根系深度略大于 700 cm。18 a 苜蓿和 20 a 柠条根系在剖面的分布趋势十分一致,0—720 cm 土层深度范围内苜蓿地根系随土层深度增加呈下降趋势,其中柠条($2\ 922.97\text{ g/m}^3$)>苜蓿($2\ 156.30\text{ g/m}^3$)。根系主要分布在 0—120 cm 土层深度范围,苜蓿地 0—120 cm 土层范围内根干重总量为 984.52 g/m^3 ,占总根干重的 45.66%;柠条林地 0—120 cm 土层范围内根干重总量为 $1\ 681.93\text{ g/m}^3$,占总根

干重的 57.54%。苜蓿地 120—720 cm 土层中根干重 $1\ 171.78\text{ g/m}^3$,占总根干重的 54.34%;柠条林地 120—720 cm 土层中根干重 $1\ 241.04\text{ g/m}^3$,占总根干重的 42.46%。苜蓿、柠条 0—720 cm 土层范围内根干重平均值分别为 $119.79, 162.39\text{ g/m}^3$ 。

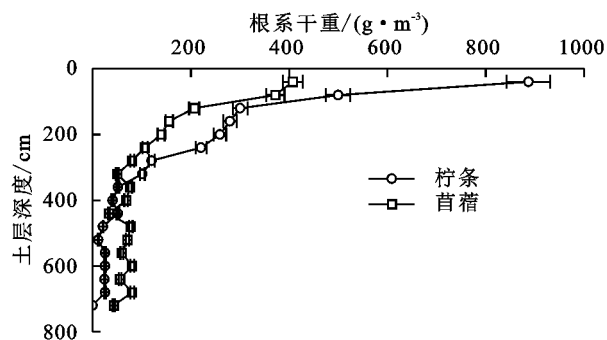


图 3 苜蓿、柠条根系干重垂直变化

Fig. 3 Vertical variation of root dry weight of *Medicago sativa* L. and *Caragana korshinskii*

18 a 苜蓿、20 a 柠条地土壤不同深度下根长密度变化规律如图 4 所示。可以看出,苜蓿地根长密度在土壤垂直分布形式与柠条林地根系基本一致,也与上面的根系重量规律基本一致,主要表现为随深度增加而下降的趋势。苜蓿地 0—120 cm 土层范围内根长密度为 6.41 cm/cm^3 ,占总根长密度的 44.45%;柠条林地 0—120 cm 土层范围内根长密度为 8.90 cm/cm^3 ,占总根长密度的 67.58%;苜蓿地 120—720 cm 土层中根长密度为 8.01 cm/cm^3 ,占总根长密度的 55.55%;柠条林地 120—720 cm 土层范围内根长密度为 4.27 cm/cm^3 ,占总根长密度的 32.42%。苜蓿、柠条 0—720 cm 土层范围内根长平均值分布为 $0.80, 0.73\text{ cm/cm}^3$ 。

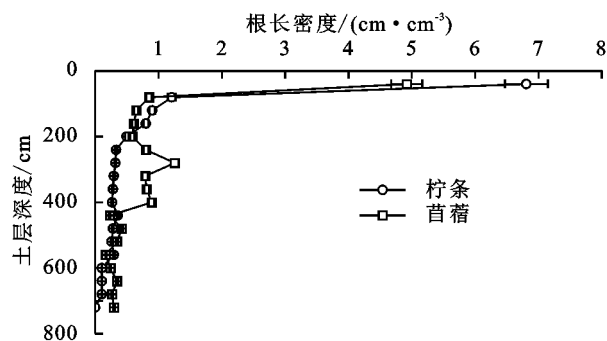


图 4 苜蓿和柠条根系根长密度垂直变化

Fig. 4 Vertical variation of root length density of *Medicago sativa* L. and *Caragana korshinskii*

2.3 苜蓿、柠条林地养分垂直特征

18 a 苜蓿、20 a 柠条地土壤全氮含量垂直变化规律如图 5 所示。由图 5 可以看出,苜蓿、柠条地 0—1 000 cm 深度范围内土壤全氮含量呈现随土层深度增加而逐渐减少的趋势。苜蓿、柠条地土壤全氮含量

垂直向下具体表现为,表层0—120 cm 范围全氮量均值分别为 0.53, 0.58 g/kg; 120—720 cm 土层范围全氮量均值分别为 0.30, 0.31 g/kg; 720—1 000 cm 全氮含量均值很低,但比较稳定,全氮量均值分别为 0.11, 0.10 g/kg; 在 0—1 000 cm 土层范围内全 N 含量平均值分别为 0.27, 0.28 g/kg。

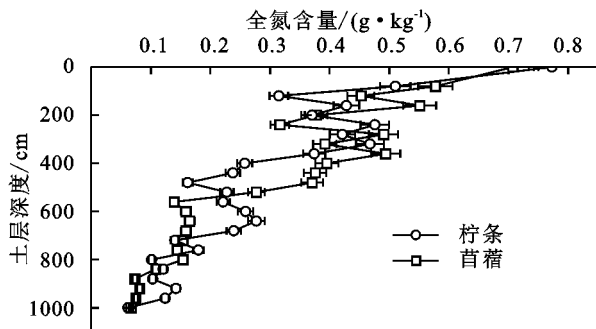


图5 苜蓿、柠条土壤全氮含量垂直变化

Fig. 5 Vertical variation of soil total nitrogen content in *Medicago sativa* L. and *Caragana korshinskii*

图6为18 a 苜蓿、20 a 柠条地土壤垂直剖面全磷含量分布。可以看出,苜蓿、柠条地土壤全磷含量垂直向下具体表现为表层0—120 cm 范围内全磷含量均值分别为 0.51, 0.53 g/kg; 120—720 cm 范围全磷含量均值分别为 0.49, 0.51 g/kg; 720—1 000 cm 全磷含量均值分别为 0.48, 0.50 g/kg; 0—1 000 cm 土层范围内全磷含量平均值分别为 0.49, 0.51 g/kg。

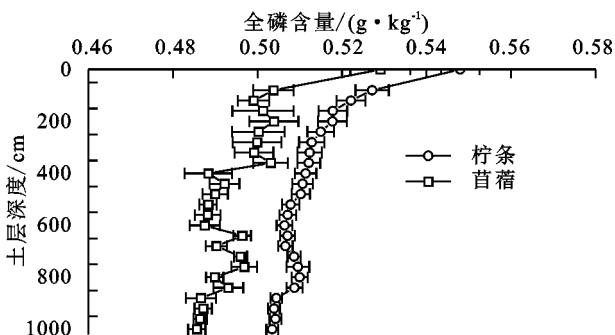


图6 苜蓿、柠条土壤全磷含量垂直变化

Fig. 6 Vertical variation of total phosphorus content in *Medicago sativa* L. and *Caragana korshinskii*

3 讨论

迄今为止有关半干旱黄土区人工苜蓿和柠条地土壤水分以往研究已取得不少成果,但同时研究苜蓿和柠条林地的深层土壤水分、根系及养分的报道较少,尤其是宁夏南部地区高龄人工苜蓿与人工柠条林深层土壤水分、根系及养分相关性研究薄弱,本文也仅仅是一个初步探究,更多深化研究还有待后期加强。虽然本研究调查取样深度达 1 000 cm 的土层,也证明 18 a 苜蓿、20 a 柠条地土壤干化深度已

达 1 000 cm 处,但还不能证明 18 a 苜蓿、20 a 柠条林地土壤最大干化深度是多少。在宁南山区高龄苜蓿和柠条地干层可达最大深度需要今后进一步研究确定。另外,本论文参照前人常用的方法^[32],以样地附近旱作农田作为对照,可以看出相同深度土层 18 a 苜蓿和 20 a 柠条地水分含量皆明显低于对照(旱作农田)土壤水分,说明苜蓿、柠条耗水高于传统的旱作农作物。本次调查 18 a 苜蓿、20 a 柠条地 0—1 000 cm 范围土壤水分附近较相似立地条件的旱作农田多耗水 987.55, 977.78 mm,这个差值可以看作生长 18 a 的苜蓿和 20 a 柠条地每年平均多消耗土壤水分约 54.86, 48.89 mm,这与 Dunin^[15]和 Cheng^[16]等的研究结果基本一致,同时水分利用效率分别为 58.09, 45.63 kg/(hm² · mm),每年高于旱作农田约 50 mm 的土壤水分消耗量应该是造成较苜蓿、柠条地土壤干化的直接原因。

本论文表述的苜蓿、柠条地浅层根系是人工苜蓿地及人工柠条林这类在黄土丘陵区具有代表性的人工林草群落浅层根系,其包含苜蓿、柠条的根系及其共生的其他多种浅根植物的根系,从土壤水分、养分角度考虑,均与人工林草群落中地浅层的多种植物根系有关,而苜蓿、柠条地的根系与水分和养分的分布特征应是苜蓿和柠条人工林草群落中所有植物共同作用的结果,是多植物协同关系。这也是苜蓿地和柠条林土壤-植物-大气连续体(SPAC)的真实情况。由于当年降水渗透深度大多停留在 0—200 cm 土层范围,水分较多也是导致 0—200 cm 范围内植物根系分布较多的主要原因。降水通过渗透补充 200 cm 以下土层水分十分困难,加上苜蓿、柠条根系每年以 50 mm 左右的速度消耗深层土壤储水量,使得 200 cm 以下土层的深层位置出现土壤极度干化现象。总体看,苜蓿、柠条地根系与根层土壤水分是具有协同互馈作用机制,即根系向水性决定苜蓿、柠条根系在生长过程中向下土层延伸吸取土壤水分,深层土壤含水量因此降低,同时土壤上层(0—200 cm)受降雨入渗会得到较大程度的补充,这促进了土壤上层根系的增加(主要在 0—200 cm 土层),200 cm 以下土层水分被根系吸收后很难通过降雨补充恢复,所以也称 200 cm 以下的土壤干层为“永久性干层”。永久性干层一般存在一个含水量最低的区域,然后继续往下土壤水分会逐渐升高,这可能与根系达到土层的年限有关,根系到达某一深度的时间短其造成土壤的干化程度也较轻,但根系所在土层时间与土壤水分含量及土壤干化程度的量化规律性还有待研究。

有研究证明苜蓿、柠条根系在黄土丘陵区随着生

长年限增加会达到很深的地下土层,如王志强等^[32]研究发现7 a 苜蓿根系耗水深度最高可以达到1 550 cm,23 a 柠条根系耗水深度可达2 240 cm,而本研究取样仅达1 000 cm,且两者1 000 cm 深度土层土壤水分含量与对照坡耕地仍存在7%以上的差值,由此可以推测宁南黄土丘陵区高龄人工苜蓿和柠条林地耗水深度大于1 000 cm。另外,本研究调查取样发现18 a 苜蓿、20 a 柠条根系深度分别为720,880 cm,小于其土壤干化深度,我们认为这不能说明18 a 苜蓿、20 a 柠条根系深度未达到1 000 cm 处,其原因:一是苜蓿、柠条根系在土壤的分布形式会使得根系分布密度随着深度增加越发稀疏,而试验方法我们这里采用的是根钻法,而根钻法以“点”的形式进行取样会随着深度增加根钻获取到根系的机率不断降低,所以有可能这也是本次调查取样到达720 cm 及880 cm 以下时未能发现根系的原因;二是18 a 老龄苜蓿和20 a 柠条深层根系有可能随着地上生长的衰败深层根系也衰败死亡,所以720 cm 及880 cm 以下取样无法获取根系,但深层土壤已经被消耗处于干化状态。总体来看,由于深层根系研究的困难较大,目前黄土区深层根系研究仍然十分薄弱,尤其是在深厚的黄土区多年生植物根系深度超过其他地区,这个特征也再次说明研究黄土丘陵区多年生深根系植物具有特殊的重要意义。近期有研究^[2-6]发现,根系分泌物是植物与微生物交流的途径,在生态系统对环境变化的响应中发挥着关键作用,不同生长策略的植物在根系分泌物方面存在差异,干旱影响根系分泌物的数量和质量,同时根际效益对土壤养分循环和植物养分的获取和生长有重要影响。这些研究在此说明,黄土高原植物根系深层特征对土壤物理性质、土壤水分及其运移机制、养分具有重要作用,所以研究深层根系、土壤水分与深层土壤微生物群落之间的关系也十分重要。

本文研究宁南山区苜蓿和柠条地土壤养分发现,苜蓿、柠条地土壤全氮与全磷含量都表现为随土层深度的递增而减小的趋势,这与根系分布趋势相一致,但由于黄土丘陵有关深根系多年生植物根系研究较少,本次试验取样范围及其取样时间等原因,还不能充分证明深层剖面养分与根系的关系,在此只能看出浅层养分与已有研究趋势基本一致。在退耕还林草地区,曾经的土地经营者使用肥料种类、数量、时间及苜蓿、柠条林地的栽植密度、生长年限、经营管理与利用方式等因素均会造成土地养分差异,这也是影响苜蓿与柠条地养分的重要因素。近年来,随着林草地保护水平的不断提升,苜蓿及柠条的生长也趋近于自然生长,保护好的林草与人工干扰严重的林草,其必然

存在土壤养分特征的差异。有关苜蓿、柠条增加土壤养分的问题,目前学术上还未定论,如牟红霞等^[33]对黄土丘陵区苜蓿养分状况的研究认为,苜蓿地土壤全磷含量状况与生长年限关系的不大。王世军等^[34]认为,土壤养分积累受植被生长年限影响,全氮和有机质含量会随着生长年限的增加而增加。顾振宽等^[35]的研究认为全磷含量随土层的增加无明显的规律性。有关苜蓿、柠条地深层土壤中根系与养分的关系研究,目前很少见报道。已有研究在黄土区苜蓿、柠条根系耗水深度可以深达1 550 cm 以下^[28],无论是豆科植物根系的固氮作用,还是根系与微生物的协同作用都会对根系周围土壤养分与水分产生影响。所以本文在此建议今后在半干旱黄土区,不能仅仅着眼于苜蓿、柠条地深层土壤水分研究,要围绕苜蓿、柠条地深层根系,对土壤水分循环和养分及微生物生态等多方面多角度进行研究,形成半干旱黄土区土壤-植物-大气连续体(SPAC)的理论闭环。本试验对苜蓿、柠条地0—1 000 cm 深度范围内土壤水分、根系及土壤养分仅仅是初步调查分析,希望能为黄土丘陵区人工林草的可持续生态建设提供一些理论依据。

4 结 论

宁南黄土丘陵区的高龄苜蓿与柠条地200 cm 深度以下已经出现深达1 000 cm 的土层通体干化现象,其中18 a 苜蓿地200—720 cm 土层处于极度干燥化水平,720—1 000 cm 土层处于重度干燥化水平;20 a 柠条地360—720 cm 土层处于极度干燥化水平,200—360 cm 及720—1 000 cm 土层处于重度干燥化水平。此外苜蓿、柠条地土壤贮水量较相似地形的旱作农地少987.55,977.78 mm,证明18 a 苜蓿与20 a 柠条林每年较早作农田多耗水54.86,48.89 mm。种植18 a 的苜蓿和20 a 柠条根系主要集中在0—120 cm 土层,该层根系占整个剖面根系的45.66%,57.54%,根长密度分别占44.45%,67.58%。苜蓿、柠条地根系和养分在土壤剖面中分布规律一致。该研究可为黄土丘陵区苜蓿和柠条可持续建设的科学管理以及后续植被更替提供数据支撑。

参考文献:

- [1] Greta M, Samantha H, Amilcare P. Ecohydrology of epiphytes: Modelling water balance, CAM photosynthesis, and their climate impacts[J]. *Ecohydrology*, 2021, 14(3): 1-15.
- [2] Williams A, de Vries F T. Plant root exudation under drought: Implications for ecosystem functioning [J]. *The New Phytologist*, 2020, 225(5): 1899-1905.

- [3] Oppenheimer-Shaanan Y, Jakoby G, Starr M L, et al. A dynamic rhizosphere interplay between tree roots and soil bacteria under drought stress[J]. *Elife*, 2022,11:79679.
- [4] Xie H T, Chen Z M, Feng X X, et al. L-theanine exuded from *Camellia sinensis* roots regulates element cycling in soil by shaping the rhizosphere microbiome assembly[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022,837: 155801.
- [5] He W C, Luo C, Wang Y, et al. Response strategies of root system architecture to soil environment: A case study of single-species *Cupressus funebris* plantations[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022,13:822223.
- [6] Henneron L, Kardol P, Wardle D A, et al. Rhizosphere control of soil nitrogen cycling: A key component of plant economic strategies[J]. *The New Phytologist*, 2020,228(4):1269-1282.
- [7] 王幼奇,马娴,夏子书,等.基于云模型的宁南山区小流域土壤养分综合评价[J].*干旱区资源与环境*,2022,36(1):120-127.
- Wang Y Q, Ma X, Xia Z S, et al. Comprehensive evaluation of soil nutrient in small watershed of southern Ningxia mountain area based on cloud model[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022,36(1):120-127.
- [8] Gulnazar A, Wang Z K, Li X R, et al. Deep soil water deficit and recovery in alfalfa fields of the Loess Plateau of China[J]. *Field Crops Research*, 2021,260:107990.
- [9] Ma J P, Wang X, Zhao X N, et al. Effects of water-saving pruning on the growth and water consumption of jujube(*Ziziphus jujuba* Mill.) in a loess hilly region with deep soil desiccation[J]. *Water Supply*, 2021,21(7):3526-3540.
- [10] 李青华,张静,王力,等.黄土丘陵沟壑区山地苹果林土壤干化及养分变异特征[J].*土壤学报*,2018,55(2): 503-514.
- Li Q H, Zhang J, Wang L, et al. Desiccation and nutrient status of the soil in apple orchards in hilly-gully region of the Loess Plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018,55(2):503-514.
- [11] 王松伟,郭忠升.多年生人工柠条林生长对土壤水分的影响[J].*水土保持研究*,2020,7(3):70-75.
- Wang S W, Guo Z S. Effects of perennial *Caragana korshinskii* Kom on soil moisture[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020,7(3):70-75.
- [12] Shangguan Z P. Soil desiccation occurrence and its impact on forest vegetation in the Loess Plateau of China[J]. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2007,14(3):299-306.
- [13] 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.
- [14] Bai X, Jia X X, Zhao C L, et al. Artificial forest conversion into grassland alleviates deep-soil desiccation in typical grass zone on China's Loess Plateau: Regional modeling[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021,320:107608..
- [15] Dunin F X, Smith C J, Zegelin S J, et al. Water balance changes in a crop sequence with lucerne[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2001,52(2): 247-261.
- [16] Cheng X R, Huang M B, Shao M A, et al. A comparison of fine root distribution and water consumption of mature *Caragana korshinskii* Kom grown in two soils in a semiarid region, China[J]. *Plant and Soil*, 2009, 315(1/2):149-161.
- [17] 李玉山.苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应[J].*土壤学报*,2002,39(3):404-411.
- Li Y S. Productivity dynamic of alfalfa and its effects on water eco-environment[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002,39(3):404-411.
- [18] 王力,邵明安,侯庆春.土壤干层量化指标初探[J].*水土保持学报*,2000,14(4):87-90.
- Wang L, Shao M A, Hou Q C. Preliminary research on measured indexes of dried soil layer[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000,14(4):87-90.
- [19] Jia X X, Zhao C L, Wang Y Q, et al. Traditional dry soil layer index method overestimates soil desiccation severity following conversion of cropland into forest and grassland on China's Loess Plateau[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020,291:106794.
- [20] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2008,143(1/2):91-100.
- [21] 韩晓阳,刘文兆,程立平.黄土塬区深剖面土壤水分垂直分布特征及其时间稳定性[J].*应用生态学报*,2017, 28(2):430-438.
- Han X Y, Liu W Z, Cheng L P. Vertical distribution characteristics and temporal stability of soil water in deep profile on the Loess Tableland, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017,28(2): 430-438.
- [22] 程瑞梅,王瑞丽,肖文发,等.三峡库区马尾松根系生物量的空间分布[J].*生态学报*,2012,32(3):823-832.
- Cheng R M, Wang R L, Xiao W F, et al. Spatial distribution of root biomass of *Pinus massoniana* plantation in Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2012,32(3):823-832.

- [23] Liu W J, Wang J S, Sun L, et al. Sustainability evaluation of soybean-corn rotation systems in the Loess Plateau region of Shaanxi, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019,210:1229-1237.
- [24] 王月玲,王思成,蔡进军,等.宁南半干旱黄土丘陵区土壤水分的演变特征[J].水土保持研究,2015,22(3):40-43,49.
Wang Y L, Wang S C, Cai J J, et al. Evolution characteristics of the soil moisture in semi arid loess hilly region of South Ningxia[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015,22(3):40-43,49.
- [25] 吕渡,杨亚辉,赵文慧,等.黄土高原沟壑区不同植被对土壤水分分布特征影响[J].水土保持研究,2018,25(4):60-64.
Lyu D, Yang Y H, Zhao W H, et al. Impacts of vegetation types on soil water distributions in Loess Hilly Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(4):60-64.
- [26] 梁海斌,史建伟,李宗善,等.晋西北黄土丘陵区不同林龄柠条林地土壤干燥化效应[J].水土保持研究,2018,25(2):87-93.
Liang H B, Shi J W, Li Z S, et al. Evaluation of soil desiccation intensity in different ages of *Caragana korshinskii* Kom, in loess hilly region, Northwestern Shanxi[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(2):87-93.
- [27] 杨合龙,孙宗玖,管光玉,等.封育对伊犁绢蒿荒漠草地土壤养分的影响[J].中国草地学报,2015,37(2):107-111.
Yang H L, Sun Z J, Guan G Y, et al. Effects of enclosure on soil nutrients of *Seriphidium transiliense* desert grassland[J]. Chinese Journal of Grassland, 2015,37(2):107-111.
- [28] 张珂萌,汪星,汪有科,等.典型地面覆盖下黄土丘陵区干化土壤深层水分变化研究[J].农业机械学报,2022,53(2):336-345.
Zhang K M, Wang X, Wang Y K, et al. Water variation of deep desiccation soil in loess hilly area under typical mulching[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(2):336-345.
- [29] 吕文强,王立,党宏忠,等.黄土高原坡面带状植被土壤水分有效性的空间分异特征[J].水土保持学报,2015,29(6):233-240.
Lyu W Q, Wang L, Dang H Z, et al. The spatial variability characteristics of soil water availability under vegetation ribbon on the slope of Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015,29(6):233-240.
- [30] 刘增文,王佑民.人工油松林蒸腾耗水及林地水分动态特征的研究[J].水土保持通报,1990,10(6):78-84.
Liu Z W, Wang Y M. Study on transpiration water consumption of artificial *Pinus tabulaeformis* forest and dynamic characteristics of forest water[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1990,10(6):78-84.
- [31] 杨敏,赵西宁,高晓东,等.黄土高原人工林深层土壤水分利用研究[J].水土保持研究,2019,26(6):100-106.
Yang M, Zhao X N, Gao X D, et al. Deep soil moisture use of planted forests in the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(6):100-106.
- [32] 王志强,刘宝元,刘刚,等.黄土丘陵区人工林草植被耗水深度研究[J].中国科学 D 辑:地球科学,2009,39(9):1297-1303.
Wang Z Q, Liu B Y, Liu G, et al. Study on water consumption depth of artificial forest grass vegetation in loess hilly region[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2009,39(9):1297-1303.
- [33] 牟红霞,张文文,刘秉儒.引黄灌区不同种植年限紫花苜蓿土壤真菌群落多样性特征[J].水土保持研究,2021,28(4):91-96,104.
Mu H X, Zhang W W, Liu B R. Soil fungi community diversity in *Medicago sativa* field of different planting years at Yellow Rivers division irrigation area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(4):91-96,104.
- [34] 王世军,杨磊,段兴武,等.黄土高原小流域植被恢复的土壤水分和养分权衡效应研究[J].土壤通报,2022,53(2):356-365.
Wang S J, Yang L, Duan X W, et al. Trade-off effects of soil moisture and soil nutrients under vegetation restoration in a small watershed on the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022,53(2):356-365.
- [35] 顾振宽,杜国祯,朱炜歆,等.青藏高原东部不同草地类型土壤养分的分布规律[J].草业科学,2012,29(4):507-512.
Gu Z K, Du G Z, Zhu W X, et al. Distribution of soil nutrients in different grassland types in eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Pratacultural Science, 2012,29(4):507-512.