

夏尔希里自然保护区典型植被土壤水源涵养功能探究

刘西刚^{1,2}, 王勇辉^{1,2}, 焦黎^{1,2}

(1. 新疆维吾尔自治区干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 乌鲁木齐 830054;

2. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054)

摘要: 为了探究夏尔希里自然保护区不同植被类型土壤水源涵养功能特征, 在保护区内选取具有代表性的草地、灌木、森林样地共13个, 以不同植被类型的土壤为试验材料, 采用野外调查与室内试验相结合的方法, 分别对保护区内的草地区、灌木区、森林区的土壤水源涵养能力进行定量分析。结果表明: (1) 随着土层深度的增加, 研究区草地土壤容重逐渐增大, 在土壤层0—10 cm处出现最小值为0.69 g/cm³。草地土壤持水能力和蓄水能力变化规律一致, 均表现为0—10 cm > 10—20 cm > 20—30 cm。(2) 随着土层深度的增加, 灌木土壤容重变化差异较大, 变化范围为0.98~1.63 g/cm³, 最小值出现在土壤层0—10 cm处。各水源涵养能力指标含量在不同的土层深度上差异性显著($P < 0.05$), 灌木持水能力大体表现为0—10 cm > 10—20 cm > 20—30 cm > 30—40 cm > 40—50 cm, 蓄水能力随着土层深度的增加, 呈现先增加后减小的趋势。(3) 森林土壤水物理性质和土壤水源涵养指标之间存在显著性差异($P < 0.05$), 随着土层深度的增加, 土壤容重逐渐增大, 在土层0—10 cm处出现最小值为0.45 g/cm³。森林土壤持水能力主要以0—10, 20—30, 40—50 cm为主, 占总持水量的71.6%, 蓄水量在水源涵养功能中占比较小。

关键词: 夏尔希里自然保护区; 草地区; 灌木区; 森林区; 土壤; 水源涵养

中图分类号: S715

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)03-0121-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.03.019

Study on Soil Water Conservation Function Under Typical Vegetation in Xarxili Nature Reserve

LIU Xigang^{1,2}, WANG Yonghui^{1,2}, JIAO Li^{1,2}

(1. Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone,

Urumqi 830054; 2. College of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054)

Abstract: In order to explore the characteristics of soil water conservation function of different vegetation types in the Xarxili Nature Reserve, a total of 13 representative grassland, shrub and forest plots were selected in the reserve area, and soils of different vegetation types were used as experimental materials. Soil water conservation capacity of grassland, shrub and forest was quantitatively analyzed by a combination of field investigation and laboratory tests. The results showed that: (1) With the increasing of soil depth, the soil bulk density of the grassland increased gradually, and the minimum value was 0.69 g/cm³ at 0—10 cm soil layer. The changes of soil water holding capacity and water storage capacity of grassland were consistent, which followed the order of 0—10 cm > 10—20 cm > 20—30 cm. (2) With the increasing of soil depth, the variation of soil bulk density of shrub was quite different, ranging from 0.98 to 1.63 g/cm³, and the minimum value appeared at 0—10 cm soil layer. The water conservation capacity index contents were significantly different in different soil depths ($P < 0.05$), and the water holding capacity of shrub was generally listed in the order of 0—10 cm > 10—20 cm > 20—30 cm > 30—40 cm > 40—50 cm, and the water capacity increased first and then decreased with the increasing of soil depth. (3) There was a significant difference between the hydrophysical properties of forest soil and soil water conservation index ($P < 0.05$). With the increasing of soil depth, the soil bulk density increased gradually, and the minimum value was 0.45 g/cm³ at 0—10 cm soil layer. The water holding capacity of forest soil was mainly 0—10, 20—30 and 40—50 cm, accounting for 71.6% of the total water holding capacity, the water storage capacity was relatively small in

收稿日期: 2018-12-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(41261055)

第一作者: 刘西刚(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事干旱区环境利用研究。E-mail: lxg1129712036@qq.com

通信作者: 王勇辉(1977—), 男, 副教授, 博士, 主要从事干旱区资源利用与环境演变研究。E-mail: wyhsd_3011@163.com

the water conservation function.

Keywords: Xarxili Nature Reserve; grassland; shrubland; forest land; soil; water conservation

“蓝绿水”概念是由瑞典水文学家 Falkenmark^[1]提出的。“绿水”主要来源于植被根系土壤水分和生态系统,“蓝水”主要贡献给径流和地下水,土壤水是二者的综合产物,在土壤中“绿水”和“蓝水”可以相互转换,通过灌溉农业影响粮食生产^[2]。因此,保护土壤水不仅能确保水资源可持续管理和利用,而且对水资源短缺的干旱地区有重要的作用。

山地生态系统是大陆生态系统中重要的水源涵养区,而水源涵养功能是山地生态系统服务的重要功能之一^[3]。对于山地生态系统而言,该系统并不是由单一的植被所组成,由于海拔高度的不同,导致降水、热量分布不均,使整个山地系统涵盖 2 个或 2 个以上的植被类型,如草地、灌木、森林等。草地在植被类型中分布最广,不但在截留降水中起作用,而且具有较高的渗透性和保水能力,在水源涵养、水土保持及改良土壤等方面具有重要意义^[4]。灌丛林是陆地生态系统中的一个重要生态类型,也是水源涵养林重要的组成成分,在区域环境保护和替代能源方面起着非常重要的作用^[5]。森林生态系统水源涵养功能是森林生态系统服务的重要组成部分,是森林与水的相互作用在生态系统服务领域的集中体现^[6]。目前,对于不同植被类型的水源涵养研究大多只是单一的植被,主要集中在对草地^[4,7]和森林^[8-9]的研究,对整个山地生态系统的水源涵养功能的研究较少^[10],且对夏尔希里自然保护区的相关研究未见报道。

夏尔希里自然保护区是国家级自然保护区,垂直自然带景观明显,由于自然保护区管理严格,外人极难进入,是典型不受人干扰的山地生态系统,该保护区内富集大量生物物种,是许多珍稀濒危动物的居住地、繁衍地和避难地^[11],是我国少有的以天然植被为主的山地自然保护区。目前,对该区域的研究较少,主要是针对该地区的植被、土壤重金属进行初步的调查研究^[12-13]。本文以夏尔希里自然保护区的不同植被类型的土壤为研究对象,用野外调查和室内试验相结合的方法,对不同植被类型的土壤水源涵养功能进行分析研究,旨在揭示山地生态系统不同植被类型的土壤涵养水分能力大小,以期保护区自然资源的科学管理和水土保持综合效益的分析提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

夏尔希里自然保护区位于新疆博尔塔拉蒙古自治州境内(81°43′09″—82°33′18″ E, 45°07′43″—45°23′15″ N),与哈萨克斯坦相邻,地理位置独特,是

中国为数极少的边界保护区之一。试验区设在夏尔希里自然保护区内,该区域主要以大陆性寒温带寒冷气候为主,保护区地形复杂,自西向东海拔高度逐渐降低。海拔 1 000 m 时,年平均气温为 3.6 ℃,海拔 2 000 m 时,年平均气温为 1.1 ℃^[14]。降水量随着海拔升高而增加,低山带为 100~250 mm,中山带为 250~450 mm,高山带可达 450~600 mm。受西高东低的地势影响,该保护区内垂直带自然景观差异明显,以荒漠带为基带(310~1 000 m)。草地主要以山地干旱草原草地(1 200~1 700 m)为主,土壤类型为山地栗钙土,主要建群种为狐茅(*Festuca sp.*)、针茅(*Stipa capillata Linn.*)、白草(*Pennisetum centrasianicum.*)、冷蒿(*Artemisia frigida Willd.*),覆盖度在 50%~70%。灌木区在保护区内分布较狭窄(1 600~1 800 m),主要建群种为锦鸡儿(*Caragana sinica Buchoz rehd.*)、野蔷薇(*Rosa multiflora Thunb.*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia L.*),土壤类型为山地棕钙土,覆盖度为 6.0%~7.4%。森林区主要的建群种为雪岭云杉(*P. schrenkiana Fisch. et Mey.*),分布在海拔 1 800~2 400 m 的阴坡处,覆盖度达 30.7%~32.1%,土壤类型为山地黑钙土,该区域常见森林植被群丛组^[11]为:(1)草类——云杉林群丛组是森林带主要分布地带的最为广泛的组合类型;(2)灌木草类——云杉林群丛组多分布于山地森林带的阴坡中下部,林内常混有桦木、杨类;(3)草类藓类——云杉林群丛组多分布于林缘上线附近及陡峭的阴坡,林下藓类主要以塔藓为主。

1.2 样地设置及调查方法

于 2018 年 10 月 10—12 日对该地区进行为期 3 天的野外调查。根据海拔、坡度、坡向、植被类型生长情况等特征综合考虑,设置具有代表性的标准样地 13 个(表 1),草地区 5 个(C1~C5)、灌木区 3 个(G1~G3)、森林区 5 个(S1~S5)。每个样地之间的海拔相差为 100 m 左右,每个不同植被类型的样地采集的范围各不相同,草地样地(5 m×5 m),灌木样地(10 m×10 m),森林样地(30 m×30 m),分别记录各样地的海拔、经纬度、坡度、坡向、土壤类型、群落组成等指标。

1.3 样品采集及蓄水能力测定

土壤采集均按照五点法原则在每个样地内选取 2 个样点进行土壤分层采样,用 100 cm³ 的环刀进行土壤采集,土壤剖面均按照每层 10 cm 进行样品采集,由于草地土壤下方多砂石,草地区土壤只采集土壤剖面 0—30 cm,灌木和森林土壤剖面均采集到 0—50 cm,共采集土壤样品 110 个。土壤容重、孔隙度指

标均参照《土壤农化分析》^[15]测定,用烘干法测定土壤含水量,环刀法测定土壤容重、总孔隙度、非毛管孔隙度、毛管孔隙度等物理性质。最大持水量与土壤前期含水量之差作为衡量土壤涵蓄降水量的指标,毛管持水量与土壤前期含水量之差作为评价土壤有效涵蓄量指标^[16]。本文采用郭梦娇等^[17]的计算方法进行计算,公式为:

$$W_l = 1000P_l h$$

$$W_o = 1000P_o h$$

$$W_c = 1000P_c h$$

式中: W_l 为土壤最大持水量(mm); W_o 为土壤非毛管持水量(mm); W_c 为土壤毛管持水量(mm); P_l 为土壤总孔隙度(%); P_o 为土壤非毛管孔隙度(%); P_c 为土壤毛管孔隙度(%); h 为土层厚度(取0.1 m)。

表1 研究区样地基本情况

样地编号	经纬度	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向	坡位	土壤类型	盖度/ %	群落组成
C1	45.14826° N, 81.79678° E	1236	18	N	坡下		35	
C2	45.15574° N, 81.80586° E	1341	21	NE	坡下	棕钙土	39	主要建群种以狐茅、 针茅、白草、冷蒿等
C3	45.16228° N, 81.81878° E	1437	15	NE	坡下		51	
C4	45.17957° N, 82.11111° E	1521	17	NE	坡下		46	
C5	45.17395° N, 81.81346° E	1647	19	E	坡下		43	
G1	45.21526° N, 81.95298° E	1647	18	NE	坡下	栗钙土	47	
G2	45.21113° N, 82.01070° E	1736	16	NE	坡下		49	主要建群种为锦鸡儿、 野蔷薇、绣线菊等
G3	45.22165° N, 82.08035° E	1850	22	NE	坡中		53	
S1	45.22866° N, 81.87687° E	1743	23	NE	坡下		54	
S2	45.22040° N, 82.07041° E	1846	21	NE	坡下	黑钙土	61	
S3	45.18826° N, 82.09552° E	1937	19	NE	坡下		65	建群种主要以
S4	45.20642° N, 82.09174° E	2059	23	NE	坡下		79	雪岭云杉为主
S5	45.20846° N, 81.82462° E	2167	17	NE	坡下		81	

注:C1、C2、C3、C4、C5分别表示草地样地;G1、G2、G3分别表示灌木样地;S1、S2、S3、S4、S5分别表示森林样地。

1.4 数据分析

利用 Origin 9.0、Excel 2003 软件进行图表的制作,采用 SPSS 21.0 统计学软件对土壤水文物理性质的相关指标进行统计和差异性分析。

2 结果与分析

2.1 草地土壤水源涵养特征

2.1.1 草地土壤水文物理特征 由图1可知,夏尔希里保护区草地不同的水文物理指标在不同的土层深度上发生着不同的变化。在土壤剖面0—10,10—20,20—30 cm处,随着海拔高度的升高,土壤自然含水率、饱和含水率、总孔隙度、毛管孔隙度大体呈现先增加后减小的趋势,土壤容重呈现先减小后增大的趋势。在海拔1437 m的0—10 cm处,土壤自然含水率、饱和含水率、总孔隙度、毛管孔隙度出现最大值,最大值分别为36.18%,67.24%,68.64%,67.27%,而土壤容重的变化规律与其相反,在海拔为1437 m的0—10 cm处,有最小值为0.69 g/cm³。随着土层深度的增加,土壤自然含水率、饱和含水率、总孔隙度、毛管孔隙度含量均呈现下降的趋势,在土壤剖面0—10 cm处出现最大值,20—30 cm处出现最小值,土壤容重的变化规律与其相反。这可能与海拔和地表植被覆盖有关,随着海拔的升高,降水量发生变化,

地表植被覆盖度增大,导致草地土壤表层保持水分的能力逐渐增强,土壤发育逐渐成熟。

2.1.2 草地土壤水源涵养能力分析 草地土壤的持水能力与土壤厚度和土壤孔隙度状况密切相关^[18]。由表2可知,在同一土层深度下,平均前期含水量、最大持水量、毛管持水量、非毛管持水量、涵蓄降水量、有效涵蓄量大小之间存在显著性差异($P < 0.05$)。在不同的土层深度下,草地土壤的平均前期含水量、最大持水量、毛管持水量、非毛管持水量、涵蓄降水量、有效涵蓄量变化规律一致,均表现为0—10 cm > 10—20 cm > 20—30 cm,平均前期含水量变化范围为(17.71~20.72 mm),平均最大持水量的变化范围为(49.43~56.54 mm),平均毛管持水量的变化范围为(44.73~50.47 mm),平均非毛管持水量变化范围为(4.69%~6.07%),平均涵蓄降水量变化范围为(31.72~35.82 mm),平均有效涵蓄量变化范围为(26.02~33.75 mm)。这主要与草地区下层土壤砾石有关,下层土壤砾石多,土壤质地差,导致土壤孔隙度下降,致使草地不同深度的水源涵养能力发生不同程度变化。

2.2 灌木土壤水源涵养特征

2.2.1 灌木土壤水文物理特征 由图2可知,在海拔1647 m处的不同土层深度上,自然含水率、饱和

含水率、总孔隙度、毛管孔隙度、容重含量变化范围分别为 4.70%~34.23%, 24.36%~49.20%, 40.66%~57.79%, 37.68%~53.08%, 0.98~1.63 g/cm³。在海拔 1 736 m 处的不同土层深度上,总孔隙度、毛管孔隙度含量的变化范围分别为 55.09%~75.03%, 47.82%~73.00%。在海拔 1 850 m 处的不同土层深度上,总孔隙度、毛管孔隙度含量的变化范围分别为 55.75%~77.60%, 53.01%~73.24%。随着海拔的升高,土壤自然含水率、饱和含水率、总孔隙度、毛管孔隙度的平均含量均呈现出上升趋势,而土壤容重平均含量呈现出下降的趋势,其中自然含水率、饱和含水率、总孔隙度、毛管孔隙度、土壤容重的含量最大值分别是最小值的 3.01, 1.69, 1.42, 1.43, 1.69 倍。已有研究^[19]认为,土壤饱和含水率的含量主要与土壤容重、土壤孔隙度的大小关联紧密,饱和含水率、土壤孔隙度与土壤容重变化相反,即土壤容重越小,土壤孔隙度越大,饱和含水率也随之增大,这与本研究分析的结果一致,这说明灌木区的土壤随着海拔的升高,土壤发育良好,土壤水分的保持能力逐渐增强,这可能与海拔升高导致降水量增加有关。

2.2.2 灌木土壤水源涵养能力分析 由表 3 可知,各水源涵养量指标在同一土层深度上的平均含量差异性显著($P < 0.05$)。前期含水量、最大持水量、毛管持水量的平均含量在不同的土层深度上均表现为 0—10 cm > 10—20 cm > 20—30 cm > 30—40 cm > 40—50 cm,在 0—10 cm 处平均含量出现最大值,最大值分别为 56.57, 67.05, 60.82 mm, 平均含量的最小值在 40—50 cm 出现,分别为 22.89, 52.68, 46.75 mm。非毛管持水量的平均含量在土层深度 30—40 cm 处出现最大值,在土层深度 20—30 cm 处有最小值,最大值约是最小值的 1.46 倍。涵养降水量、有效涵养量的平均含量随着土层深度的增加,均表现为先上升后下降的趋势,平均含量的变化范围为 10.48~31.85, 4.25~24.95 mm。总体分析可得,灌木区的土壤在土壤剖面 0—10 cm 处,土壤持水性能最好,随

着土层深度的增加,土壤持水性能逐渐减弱,这可能是由于灌木区表层土壤枯落物较多,分解的腐殖质较多,致使土壤孔隙度增大,从而导致表层土壤水源涵养能力增强,随着土层深度的增加,土壤质地变差,下部砾石逐渐增多,导致土壤疏松程度降低,从而导致土壤层涵养水分的能力逐渐下降。

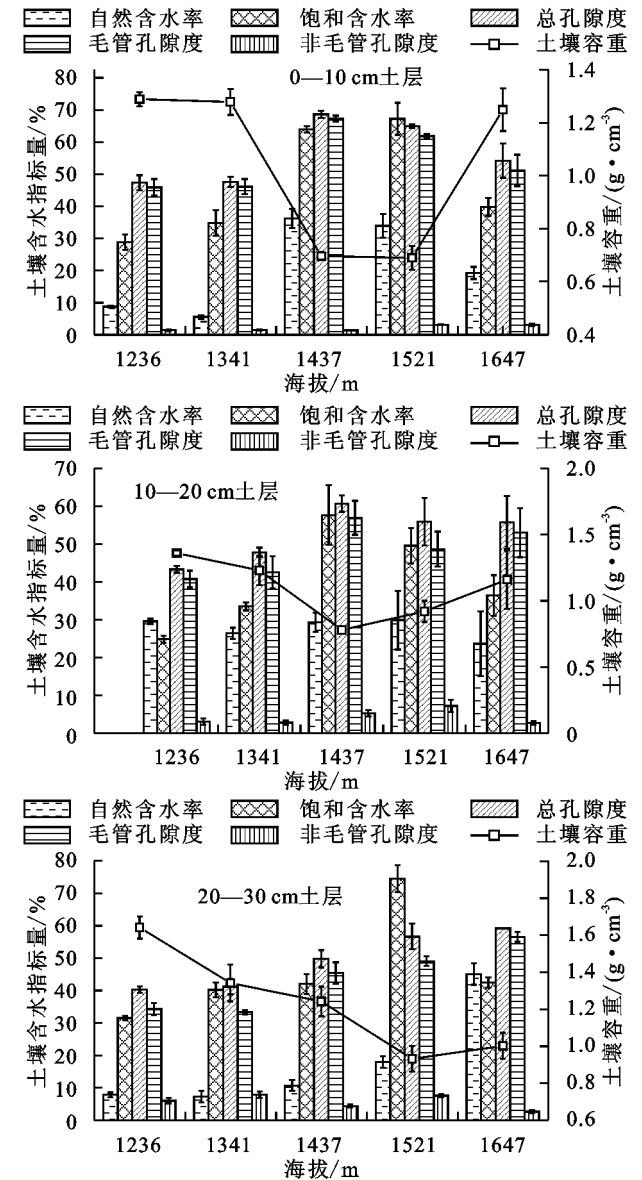


图 1 草地土壤水文物理指标变化

表 2 草地土壤水源涵养能力特征

单位:mm

土层深度/cm	前期含水量	最大持水量	毛管持水量	非毛管持水量	涵养降水量	有效涵养量
0—10	20.72±5.66b	56.54±3.10a	50.47±3.23a	6.07±0.14c	35.82±2.56ab	33.75±2.43ab
10—20	19.21±7.55b	52.69±3.74a	47.37±3.71a	5.33±0.04c	33.48±3.81ab	29.16±3.84b
20—30	17.71±4.19b	49.43±1.34a	44.73±2.58a	4.69±1.23c	31.72±2.85b	26.02±1.61b

注:表中数据为平均值±标准误差($n=3$);同行不同字母表示同一土层不同水源涵养能力差异性显著($P < 0.05$)。下同。

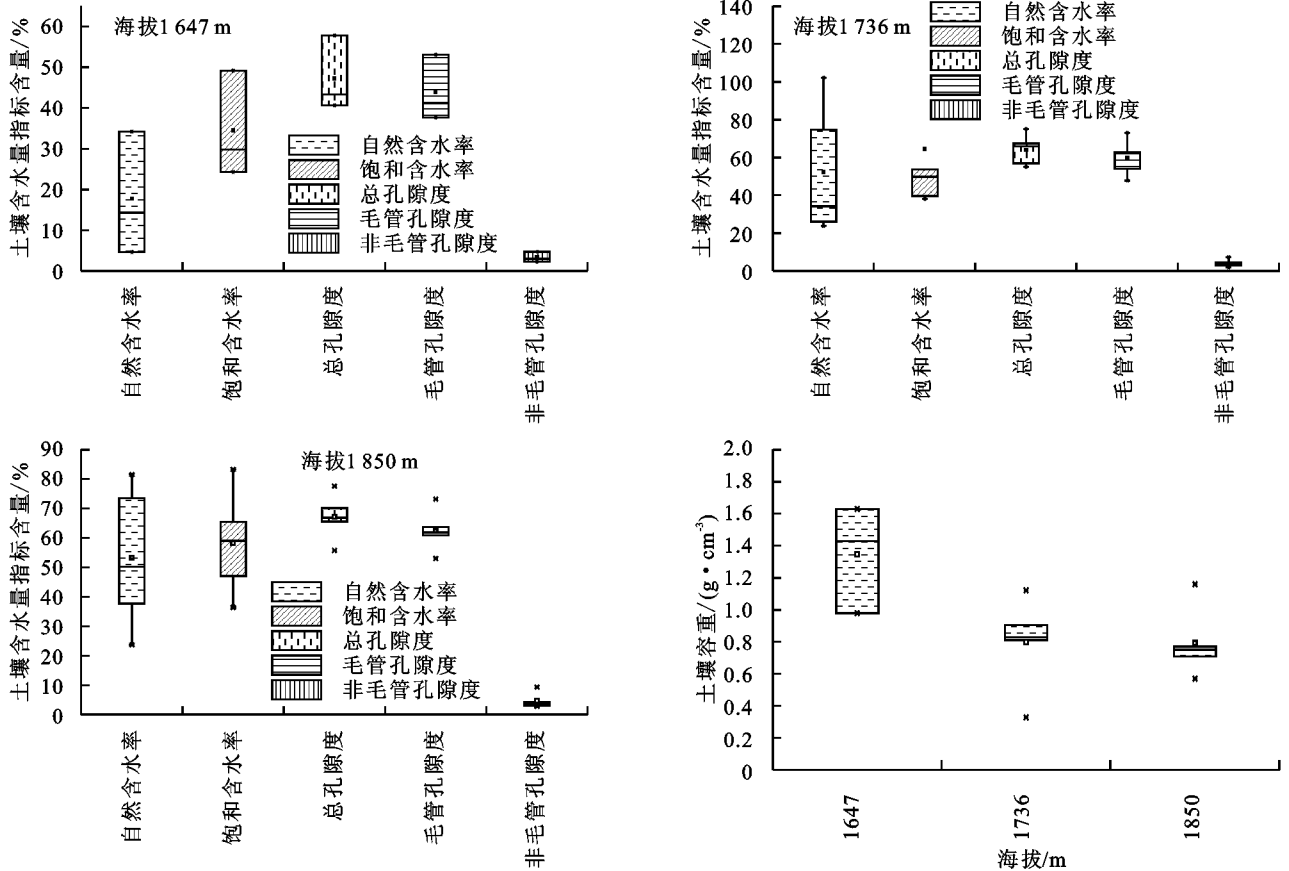
2.3 森林土壤水源涵养特征

2.3.1 森林土壤水文物理特征 由表 4 可知,各水文物理量指标含量在同一土层深度上差异性显著($P < 0.05$)。在森林样地 S1、S2、S3、S4、S5 处,随着土层深度的增加,土壤含水量、总孔隙度、毛管孔隙度的平

均含量均呈现逐渐下降的趋势,在 S4 样地 0—10 cm 土壤剖面处出现平均含量最大值,分别为 54.1%, 79.07%, 74.33%, 在 S1 样地 40—50 cm 土壤剖面处出现平均含量最小值,分别为 16.38%, 47.23%, 39.33%。土壤容重的变化规律与其相反,在 S4 样地土层深度 0—

10 cm 处出现平均含量最小值,最小值为 0.45 g/cm³。非毛管孔隙度平均值含量在 S5 样地土壤剖面 0—10 cm 处出现最大值,在 S5 样地土壤剖面 10—20 cm 处出现最小值,最大值是最小值的 7.09 倍。在土壤剖面为 0—10,10—20,20—30,30—40,40—50 cm 下,随着海拔高度的升高,土壤含水量、总孔隙度、毛管孔

隙度均呈现出先增加后减小的趋势,在 S4 样地处均出现最大值,S1 样地处均出现最小值,土壤容重变化规律与其相反。总体分析表明,随着海拔高度的增加,森林土壤的容重在同一土层深度上逐渐减小,土壤孔隙度逐渐增强,说明森林土壤疏松程度高,发育较成熟,土壤质量趋于良好。



注:箱体上、下*为最大、小值;箱体内□为平均值,一为中值。

图 2 不同深度灌木土壤水文物理指标变化

表 3 灌木土壤水源涵养能力特征

单位:mm

土层深度/cm	前期含水量	最大持水量	毛管持水量	非毛管持水量	涵养降水量	有效涵养量
0—10	56.57±2.23b	67.05±3.62a	60.82±4.05ab	6.24±0.43c	10.48±1.39c	4.25±1.82c
10—20	40.48±3.87b	62.07±3.29a	56.90±2.38a	5.17±0.92d	21.59±0.58c	16.43±1.49c
20—30	31.87±3.50b	59.75±2.67a	54.62±0.43a	5.12±3.09d	27.87±0.83bc	22.75±3.92c
30—40	25.58±1.83d	57.43±0.40a	50.53±2.06b	7.45±1.68e	31.85±1.43c	24.95±3.88d
40—50	22.89±1.34d	52.68±1.39a	46.75±1.67b	5.93±0.28e	29.79±2.72e	23.86±3.01d

2.3.2 森林土壤水源涵养能力分析 由表 5 可知,在同一土层深度下,水源涵养能力指标的平均含量之间差异性显著($P < 0.05$)。在森林土壤层 0—10 cm 处,前期含水量、最大持水量、毛管持水量的平均含量均出现最大值,最大值分别为 63.36,70.14,66.44 mm,随着土层深度的增加,平均含量不断变化,平均含量从大到小依次为 0—10 cm > 40—50 cm > 20—30 cm > 30—40 cm > 10—20 cm。非毛管持水量平均含量表现为先增加后减小的趋势,在土壤层 20—30 cm 处出现最大值,为 6.11 mm。涵养降水量和有效

涵养量平均含量的变化较一致,变化范围分别为 6.78~30.24,3.08~25.07 mm,二者的平均含量均在土壤深度为 30—40 cm 处出现最大值。综合来看,森林土壤的水源涵养能力中持水能力占主要作用,在不同的土层深度上均较强,主要以土层 0—10,20—30,40—50 cm 为主,占总持水量的 71.6%。森林土壤的蓄水能力在水源涵养功能中占比较小,主要集中在土层 10—20,30—40 cm 处,这可能是由于样地内的 0—10 cm 土壤层腐殖质层较厚,土壤质地优良,土壤疏松程度高,再加上森林区样地海拔均在 1 800 m 以上,

样地内温度较低、降水相对较多,降水量大于蒸发 壤涵水能力较好的原因可能是在此土层植被根系量,致使土壤涵养水分的能力较好,40—50 cm 的土 较多有关。

表 4 森林区土壤水文物理指标变化

样地 编号	土层 深度/cm	土壤容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	土壤 含水量/%	总孔隙度/ %	毛管 孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%
S1	0—10	0.63±0.36b	31.45±11.7ab	53.43±1.01a	50.59±2.58ab	2.84±3.59b
	10—20	0.98±0.18d	19.24±3.15c	50.89±1.97a	44.19±6.91ab	6.70±4.94cd
	20—30	1.09±0.28c	18.19±1.66c	51.23±2.47a	44.57±7.45ab	6.66±5.01c
	30—40	1.12±0.18c	16.77±0.90b	53.62±4.68a	46.75±3.82a	6.87±0.86bc
	40—50	1.17±0.05c	16.38±2.76c	47.23±2.77a	39.33±0.28a	7.91±2.50c
S2	0—10	0.59±0.04c	37.90±8.24b	69.67±6.10bc	64.60±10.71bc	5.07±4.61c
	10—20	0.76±0.06d	37.86±1.97c	65.63±6.74b	56.45±0.96bc	9.18±7.70d
	20—30	0.85±0.38b	27.08±2.96ab	63.11±4.47ab	56.12±4.13ab	6.99±5.37b
	30—40	0.96±0.16b	18.32±0.65c	55.15±0.28b	46.95±2.86c	8.21±3.97b
	40—50	1.05±0.08b	20.13±0.25c	50.69±0.98c	45.44±1.65c	5.25±0.78c
S3	0—10	0.57±0.17b	41.39±6.56b	70.97±8.43ab	67.85±10.73ab	3.12±2.30b
	10—20	0.58±0.12d	38.06±9.57c	66.02±0.69b	58.62±0.98b	5.40±1.67d
	20—30	0.61±0.25b	30.53±15.79b	64.31±0.83ab	56.46±3.09ab	2.85±3.92b
	30—40	0.93±0.12c	25.47±7.59c	55.78±2.58c	47.98±1.59ab	7.80±0.78b
	40—50	1.03±0.11c	22.98±1.25b	53.92±1.67c	46.93±2.58b	6.99±0.84c
S4	0—10	0.45±0.29b	54.10±3.89ab	79.07±1.18ab	74.33±2.92ab	4.74±4.10ab
	10—20	0.53±0.33a	44.40±9.92a	70.31±12.07a	67.51±13.27a	2.80±1.20a
	20—30	0.59±0.33b	43.28±7.64ab	63.58±3.68a	58.52±2.04a	5.07±1.63b
	30—40	0.91±0.04c	29.61±2.89b	58.51±1.02a	48.85±8.78ab	9.66±7.76c
	40—50	1.02±0.09c	32.31±3.80b	55.13±3.30a	51.82±4.27a	3.31±0.98c
S5	0—10	0.64±0.19b	39.97±10.3ab	67.13±3.77a	54.72±1.53a	12.41±5.29b
	10—20	0.80±0.02c	35.71±14.21b	67.51±5.01a	65.76±6.37a	1.75±1.38c
	20—30	0.82±0.11c	30.66±6.17b	60.49±3.34a	54.09±0.34a	6.40±3.01c
	30—40	0.83±0.16c	30.36±3.48b	60.15±2.47a	55.99±1.20a	4.16±1.27c
	40—50	1.15±0.04d	19.99±2.97c	55.68±3.64a	49.11±1.02a	6.57±2.62d

表 5 森林土壤水源涵养能力特征

单位:mm

土层 深度/cm	前期 含水量	最大 持水量	毛管 持水量	非毛管 持水量	涵养 降水量	有效 涵蓄量
0—10	63.36±4.94a	70.14±2.03a	66.44±4.85a	3.70±2.82b	6.78±2.91b	3.08±0.09b
10—20	30.49±1.20c	58.54±0.92a	55.08±1.72b	3.46±0.80e	28.05±0.27c	24.59±0.52d
20—30	43.83±3.50b	63.52±5.07a	57.41±4.64ab	6.11±0.43c	19.69±8.56c	13.58±2.41c
30—40	30.73±15.5b	60.97±5.86a	55.80±3.24a	5.17±2.63c	30.24±9.70b	25.07±7.32bc
40—50	47.40±27.8ab	66.54±22.52a	62.35±17.80a	4.19±3.72b	19.12±5.23b	14.93±9.96b

3 讨论

土壤是大气降水的主要蓄存库、调节器和植被生存的重要物质基础,直接影响生态系统的水文过程^[6],由于受植被、地形、气候、母岩等多因素的综合影响,导致土壤类型分布多样,致使土壤理化性质存在较大的差异,直接影响到土壤中的水分运动方式及途径,决定土壤层水文生态功能的强弱从而影响土壤的水源涵养功能特性^[9]。土壤容重和孔隙度均是影响土壤水源涵养功能的重要参数,土壤容重越低,土壤越疏松、孔隙越多,水土保持和土壤水源涵养能力越

高^[20],土壤水源涵养功能是由土壤持水能力和土壤蓄水能力综合体现的,土壤持水能力是评价不同植被土壤涵养水源、调节水循环的重要指标,它反映了土壤持水、供水与调蓄能力,可用来评价土壤层的水文功能^[21],土壤蓄水性能与土壤前期含水量密切相关,当土壤湿度大时,土壤蓄水量减少,即使降雨量很小,也会产生地表径流。因此,把饱和蓄水量与土壤前期含水量之差作为衡量土壤涵养降水量的指标,毛管蓄水量与土壤前期含水量之差反映供植物利用的潜在土壤有效蓄水,称其为有效涵蓄量^[16]。

3.1 草地土壤水源涵养特征

研究区草地在海拔 1 236~1 647 m 时,随着土层深度的增加,土壤容重均呈上升状态,土壤孔隙度呈下降趋势,这主要是因为草地下部多砾石,土壤质地较差,分解不彻底,导致土壤疏松度降低,孔隙度减少,这与马国飞等^[10]对托木尔峰自然保护区台兰河上游不同植被类型的水源涵养功能研究结果一致。在同一土层深度不同海拔下,随着海拔高度的增加,土壤孔隙度呈现出先上升后下降的趋势,土壤容重呈现出先下降后上升的趋势,同时在海拔 1 437 m 出现孔隙度最大值,土壤容重最小值,这与马国飞等^[7]对托木尔峰国家级自然保护区台兰河上游不同海拔草地土壤持水能力研究不一致,这可能是因为 1 437 m 处的草地样地附近有河流通过,土壤分解速度加快,微生物量增多,导致该点的孔隙含量比 1 521, 1 647 m 的含量偏高的主要原因,研究区内的草地区在不同的土壤深度上,均呈现出随着土层深度的增加,土壤持水性能和蓄水性能逐渐降低,在土壤层 0—10 cm 处水源涵养功能最好,这与韩路等^[16]对塔里木河上游不同植被类型土壤水文特性研究所得到的结果不一致,主要是因为研究区的草地不受人为因素干扰,土壤表层枯枝落叶以及植被覆盖度均较高,导致 0—10 cm 土壤孔隙度增多。

3.2 灌木土壤水源涵养特征

研究区灌木土壤在相同海拔不同土层深度上,土壤水文物理指标含量变化范围各不相同。随着海拔升高,土壤孔隙度逐渐上升,土壤容重逐渐下降,这主要是由于灌木区土壤表层枯落物较多,随着土层深度的增加,砂石逐渐增多,土壤质地下降,土壤孔隙度和容重发生相应变化,随着海拔高度的增加,降水量增多,枯枝落叶分解速度加快所致。灌木区土壤持水能力随着土层深度的增加,呈逐渐下降的趋势,在 0—10 cm 处持水性能最好,但蓄水性能与其变化不同,这主要是由于灌木区各土层的前期含水量均较高所致。

3.3 森林土壤水源涵养特征

一般认为,不同林地随着土层深度的增加,土壤容重增加,土壤孔隙度减少^[22],在研究区的森林土壤中,各样地随着土层深度的增加,土壤容重逐渐上升,孔隙度逐渐下降,与此研究所得结果一致。森林区土壤涵水功能主要以持水能力为主,随着土层深度的增加,大体呈现下降的趋势,持水能力主要集中在土壤层 0—10, 20—30, 40—50 cm 处,占到总持水量的 71.6%,土壤深度 0—10 cm 处持水能力最好,这主要是因为土壤表层 0—10 cm 的枯落物较厚,土壤疏松程度较好,涵养水分能力较强,土层深度 40—50 cm

土壤处,植被根系较多,这可能是导致该层土壤持水能力增强的主要原因。涵蓄降水量和有效涵蓄量平均含量的变化较一致,二者的平均含量均在土层深度为 30—40 cm 处出现最大值,这主要是因为森林土壤的前期含水量在该层较低,导致有效含水量升高。

4 结论

(1)研究区草地土壤水文物理性质和水源涵养能力在不同的土层深度各含量呈现不同的差异性($P < 0.05$)。随着土层深度的增加,土壤容重呈现逐渐上升的趋势,在土层深度 0—10 cm 处出现最小值,为 0.69 g/cm^3 。土壤自然含水率、饱和含水率、总孔隙度、毛管孔隙度含量变化规律与其相反,随着土层深度的增加,各含量大体呈现下降的趋势,在土壤层 0—10 cm 处出现最大值。草地土壤的平均前期含水量、最大持水量、毛管持水量、非毛管持水量、涵蓄降水量、有效涵蓄量变化规律一致,均表现为 $0—10 \text{ cm} > 10—20 \text{ cm} > 20—30 \text{ cm}$ 。

(2)研究区灌木土壤水文物理性质在不同的土层深度上变化不同。随着土层深度的增加,土壤容重平均含量呈现逐渐上升的趋势,在土壤层 0—10 cm 处出现最小值。自然含水率、饱和含水率、总孔隙度、毛管孔隙度的平均含量均呈现出下降趋势,在土壤层 0—10 cm 处出现最大值。研究区灌木土壤前期含水量、最大持水量、毛管持水量均表现为 $0—10 \text{ cm} > 10—20 \text{ cm} > 20—30 \text{ cm} > 30—40 \text{ cm} > 40—50 \text{ cm}$,涵蓄降水量、有效涵蓄量随着土层深度的增加,表现为先上升后下降的趋势,在土壤层 30—40 cm 处出现最大值。

(3)森林区在不同的土层深度上水文物理性质和土壤水源涵养能力差异性显著($P < 0.05$)。随着土层深度的增加,土壤容重平均含量逐渐增大,在土层 0—10 cm 处出现最小值为 0.45 g/cm^3 ,土壤含水量、总孔隙度、毛管孔隙度的平均含量均呈现逐渐下降的趋势,在土层 0—10 cm 处出现最大值,分别为 54.1%, 79.07%, 74.33%。研究区森林土壤前期含水量、最大持水量、毛管持水量在不同的土层深度上均表现为 $0—10 \text{ cm} > 40—50 \text{ cm} > 20—30 \text{ cm} > 30—40 \text{ cm} > 10—20 \text{ cm}$,最大值分别为 63.36, 70.14, 66.44 mm,涵蓄降水量和有效涵蓄量平均含量的变化较一致,最大值在 30—40 cm 土层处出现。

参考文献:

- [1] Falkenmark M. Stockholm, water symposium 1994: Integrated land and water management—challenges and new opportunities [J]. *Ambio*, 1995, 24(1): 68-68.
- [2] D'Odorico P, Laio F. Ecohydrology of terrestrial ecosystems [J]. *Bioscience*, 2010, 60(11): 898-907.
- [3] 胡健,吕一河,张琨,等.祁连山排露沟流域典型植被类

- 型的水源涵养功能差异[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3338-3349.
- [4] 李士美, 谢高地. 草甸生态系统水源涵养服务功能的时空异质性[J]. 中国草地学报, 2015, 37(2): 88-93.
- [5] 张平, 刘贤德, 张学龙, 等. 祁连山林草复合流域灌木林水文生态功能研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(5): 922-929.
- [6] 周佳雯, 高吉喜, 高志球, 等. 森林生态系统水源涵养服务功能解析[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1679-1686.
- [7] 马国飞, 满苏尔·沙比提, 张雪琪. 托木尔峰国家级自然保护区台兰河上游不同海拔草地土壤持水能力研究[J]. 草地学报, 2017, 25(5): 966-972.
- [8] 王尧, 徐佩, 傅斌, 等. 森林生态系统水源涵养功能评估模型研究进展[J]. 生态经济, 2018, 34(2): 158-164, 169.
- [9] 周玉杰, 李建华, 王春燕, 等. 海南岛 3 种森林类型的土壤特性及水源涵养功能[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(36): 165-167, 172.
- [10] 马国飞, 满苏尔·沙比提, 张雪琪. 托木尔峰自然保护区台兰河上游不同植被类型的水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 210-216, 224.
- [11] 陈蜀江, 海鹰, 金海龙, 等. 新疆夏尔西里自然保护区综合科学考察[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2006: 1-25.
- [12] 王勇辉, 钟巧, 焦黎. 夏尔希里地区土壤重金属特征及空间变异分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(5): 1043-1050.
- [13] 海鹰, 姚建保, 兵布加甫, 等. 新疆夏尔希里自然保护区植物区系研究[J]. 干旱区研究, 2011, 28(1): 98-103.
- [14] 钟巧, 王勇辉, 焦黎. 夏尔希里地区土壤重金属含量特征及空间变异分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 360-365.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 韩路, 王海珍, 于军. 塔里木河上游不同植被类型土壤水文特性研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 124-129.
- [17] 郭梦娇, 朱江, 程小琴, 等. 辽河源不同林龄油松林水源涵养能力研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 279-284.
- [18] 巍强, 张秋良, 代海燕, 等. 大青山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 111-115.
- [19] 王昭艳, 左长清, 曹文洪, 等. 红壤丘陵区不同植被恢复模式土壤理化性质相关分析[J]. 土壤学报, 2011, 44(4): 715-724.
- [20] 马维玲, 石培礼, 宗宁, 等. 太行山区主要森林生态系统水源涵养能力[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 478-489.
- [21] 胡淑萍, 余新晓, 岳永杰. 北京百花山森林枯落物层和土壤层水文效应研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 146-151.
- [22] 马国飞, 满苏尔·沙比提. 托木尔峰自然保护区台兰河上游森林植被水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 147-153.
- (上接第 120 页)
- [8] 郭晋丽, 刘爽. 晋西北风沙区长期不同植被恢复类型下土壤物理特征分析[J]. 山西农业科学, 2017, 45(11): 1794-1800.
- [9] 朱宝文, 郑有飞, 陈晓光. 高寒针茅草原植物生长季土壤水分动态变化规律[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 96-100.
- [10] 王贺年, 余新晓, 李铁涛. 北京山区林地土壤水分动态变化[J]. 山地学报, 2011, 29(6): 701-706.
- [11] 贾志清. 晋西北黄土丘陵沟壑区典型灌草植被土壤水分动态变化规律研究[J]. 水土保持通报, 2006, 26(1): 10-15.
- [12] 易亮. 黄土高原沟壑区生态经济型防护林土壤水分养分特征与空间配置研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [13] 白一茹. 水蚀风蚀交错带坡面土壤水分特性研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [14] 马文. 黄土丘陵区典型人工林土壤水分补给与消耗特征研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [15] 武建虎. 农田土壤水分动态及其影响因素分析[J]. 地下水, 2011, 33(4): 13-14.
- [16] 李竞, 贾生海, 陈小红, 等. 黄土高原不同立地条件下柠条林地土壤水分的变化规律[J]. 甘肃农业大学学报, 2015, 50(2): 111-115.
- [17] 罗珠珠, 牛伊宁, 李玲玲, 等. 陇中黄土高原不同种植年限苜蓿草地土壤水分及产量响应[J]. 草业学报, 2015, 24(1): 31-38.
- [18] 程立平, 刘文兆, 李志. 黄土塬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.
- [19] 张艳丽, 张国珍. 黄土高原典型塬区土壤湿度特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(5): 190-195.
- [20] 赵磊磊, 朱清科, 聂立水, 等. 陕北黄土区陡坡土壤水分变异规律研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 253-259.
- [21] 刘晶森, 安顺清, 廖荣伟, 等. 玉米根系在土壤剖面中的分布研究[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(3): 517-521.
- [22] 毕建琦, 杜峰, 梁宗锁, 等. 黄土高原丘陵区不同立地条件下柠条根系研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(2): 225-230.
- [23] 王月胜. 不同苜蓿品种根系特征及其抗寒性关系的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2008.
- [24] 张洪芬, 王劲松, 黄斌, 等. 西峰黄土高原麦田土壤水分的垂直分布[J]. 土壤通报, 2007, 37(6): 1081-1085.