

DOI: 10.5846/stxb201506241281

胡健, 吕一河, 张琨, 陶蕴之, 李婷, 任艳娇. 祁连山排露沟流域典型植被类型的水源涵养功能差异初步研究. 生态学报, 2016, 36(11): - .

Hu J, Lü Y H, Zhang K, Tao Y Z, Li T, Ren Y J. A preliminary assess on the differences of water conservation function under typical vegetation types in the Pailugou catchment, Qilian Mountain, northwest China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): - .

祁连山排露沟流域典型植被类型的水源涵养功能差异初步研究

胡 健^{1,2}, 吕一河^{1,*}, 张 琨^{1,2}, 陶蕴之³, 李 婷^{1,2}, 任艳娇^{1,2}

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 浙江师范大学地理与环境科学学院, 金华 321004

摘要: 土壤水分是“绿水”重要的储存, 连接植被与水文系统的纽带。水源涵养功能是山地生态系统重要的生态系统服务, 这种功能主要体现是生态系统将水分保持在系统内的过程和能力, 并受多种因素的影响(如植被类型、土壤类型和地形)。本文通过对祁连山排露沟流域的土壤属性、土壤温湿度和降雨 2 个生长季的野外调查与观测, 以及计算水源涵养功能指标来评估三种典型植被类型土壤水分涵养能力的差异。研究结果:(1) 灌丛和青海云杉林下有机质、粉粒和砂粒含量、田间持水量、饱和持水量和孔隙度等土壤属性值高于草地, 而土壤容重和粘粒含量低于草地;(2) 青海云杉林的根区土壤累计入渗量高于灌丛和草地, 草地土壤水分损失较灌丛和青海云杉林更快;(3) 整个生长季内青海云杉林和灌丛土壤湿度明显高于草地湿度, 青海云杉林的水源涵养功能指标值多大于 1。这些结果表明青海云杉林较灌丛和草地具有更强的水源涵养能力。因此, 本研究结果能为国内干旱区山地生态系统的流域生态系统管理与可持续发展提供科学参考。

关键词: 祁连山; 排露沟; 土壤水分; 水源涵养功能指标; 可持续发展; 绿水

A preliminary assess on the differences of water conservation function under typical vegetation types in the Pailugou catchment, Qilian Mountain, northwest China

HU Jian^{1,2}, LÜ Yihe^{1,*}, ZHANG Kun^{1,2}, TAO Yunzhi³, LI Ting^{1,2}, REN Yanjiao^{1,2}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

Abstract: Soil water is an important element of “green water” that constitutes the physical linkage between vegetation and hydrological system. Water retention function represents the process and ability of retaining water in the ecosystem and is an essential ecosystem service in the mountainous ecosystems. Due to the soil heterogeneity, vegetation and topography, water retention function is variable in space and time. This study aimed to characterize the differences of water retention function of three typical vegetation types in the Pailugou catchment, Qilian Mountain, northwest China. The abilities of different vegetation types are evaluated by the water conservation function index, which portrayed as the integrated effect of soil properties, soil moisture, precipitation and temperature during the growing season. The results indicated that 1) the value of

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAC08B01)

收稿日期: 2015-06-24; 修订日期: 2016-02-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyh@rcees.ac.cn

soil organic matter, sand and silt content, field capacity, saturation moisture capacity and porosity were considerably higher in the shrubland and Qinhai spruce (*Picea crassifolia*) forest than that in the grassland. By contrast, the value of the bulk density and clay content in the grassland was higher in comparison to that of shrubland and forestland; 2) The cumulative water infiltration of the root zone in the Qinhai spruce forest was higher than that in the shrubland and grassland, and the rate of soil water loss at the grassland reached the highest level among the different vegetation types; 3) Soil moisture in the Qinhai spruce forest and shrubland was higher than that in the grassland during the whole growing season, and the water conservation function index were mostly larger than 1. In conclusion, the Qinhai spruce forest had a higher soil water holding capacity in comparison to the shrubland and grassland. Thus, the results of this study can provide scientific guidelines for the management and sustainable development of the mountainous ecosystems in the semi-arid region of China.

Key Words: Qilian Mountain; Pailugou; soil moisture; water conservation function index; sustainable development; green water

瑞典水文学家 Falkenmark 在 1995 年提出“蓝绿水”概念,并在 2006 年根据“蓝绿”水通量进一步丰富概念,这一概念强调了土壤水作为绿水重要组成,对生态系统有着重要作用,有助于水资源的可持续利用和管理,特别是水资源短缺地区^[1-3]。在“蓝绿水”框架下,植被根区土壤水分和生态系统是“绿水”重要的储存,“绿水流”直接与生态系统的生产有关,有着重要的生态功能,影响着生态系统服务的产生和供给、权衡,而“蓝水”贡献给径流和地下水,“蓝水”能再次转化为“绿水”,特别是通过灌溉农业影响粮食生产^[4-6]。因此,山区土壤水分消耗不仅影响山区生态系统健康的自我维持,而且影响中下游地区的生态系统安全。

山地生态系统作为重要的水源区,具有水文调节和水源涵养等多种生态系统服务,而水源涵养功能是山地生态系统服务重要功能之一^[7-8]。水文调节与水源涵养相比,水源涵养应该是生态系统水文调节服务的一部分,是生态系统在一定的时空范围和条件下,将水分保持在系统内的过程和能力,在多种因素的作用下(如生态系统类型、地形、海拔、土壤、气象等)具有复杂性和动态性特征^[9]。关于水源涵养功能的研究多集中于森林生态系统,特别是森林林分结构、土壤属性和不同林地类型对水源涵养功能的影响,但是山区生态系统植被类型并不是单一的森林植被^[10-16]。山地生态系统的水源涵养功能是通过不同植被类型对土壤中“绿水”的涵养作用来体现的,主要表现在土壤水分的动态变化^[17]。同时土壤水分受降雨、植被类型、土壤属性和地形等多种因素影响,其中降雨入渗过程、土壤水分损失是影响土壤-植被连续体绿水储存的主要分量。大气降水经入渗过程转化为土壤-植被连续体中的绿水,绿水再通过植被的蒸腾和土壤的蒸发与地表径流从土壤-植被连续体中损失,形成大气和径流中的“蓝水”,大气水汽经大尺度大气水文循环产生降水形成循环^[4-5]。其中土壤属性和植被类型是影响土壤水分对降雨响应和土壤水分保持与储存两个最主要的影响因子,并且土壤属性与植被类型是相互影响的,植被类型的差异影响土壤的一系列物理化学性质,如有机质含量、土壤容重等,土壤属性又通过影响土壤对水分的保持与储存影响植被的生理生态功能,如根系吸收、蒸腾等^[18-22]。因此,为了更好的理解祁连山典型植被水源涵养功能差异,有必要对不同植被类型下土壤对水分的保持与储存进行研究。本文选择祁连山排露沟小流域三种典型植被对其土壤温湿度和降雨进行野外观测实验,研究不同植被类型对土壤水分涵养功能的差异,主要关注降雨入渗和土壤水分损失过程,希望能提高对不同植被类型水源涵养功能差异的理解,为流域生态系统管理与可持续发展提供科学参考。

1 研究区概况

祁连山排露沟小流域位于大野口流域东北部,祁连山地区中段北麓,甘肃省张掖市区以南约 50 km,肃南裕固族自治县境内,毗邻张掖市甘州区花寨乡(图 1)。地理位置在北纬 38°32′-38°33′N,东经 100°17′-100°18′E,小流域面积为 2.82 km²,流域海拔 2600—3800 m,属高寒山地森林草原气候。根据地面气象站数据,年平均气温为 5.4 °C,最低月平均气温为 -12.5 °C,最高月平均气温在 19.6 °C 左右,且随着海拔升高,气温

以 $0.58\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 的速率递减;年降水量为 $300\text{--}500\text{ mm}$ (2002—2011 年 10 年间,最低值出现在 2004 年为 289.7 mm ,最高值出现在 2007 年为 550.9 mm),多集中在 6—9 月份 (占全年 80 % 左右),且存在随海拔升高而增加的趋势^[17]。土壤呈现明显的垂直分异,土壤类型从低海拔到高海拔依次为砂夹石、山地栗钙土、山地森林灰褐土、灌丛草甸土、裸岩,其中,砂夹石主要分布在流域出口处,平均土层厚度 15 cm ;山地栗钙土主要分布在海拔 $2720\text{--}3000\text{ m}$ 的阳坡,平均土层厚度 40 cm ;山地森林灰褐土主要分布在海拔 $2600\text{--}3300\text{ m}$ 的阴坡,平均土层厚度 67 cm ;灌丛草甸土分布在海拔 $3300\text{--}3770\text{ m}$ 的亚高山地带,平均土层厚度 44 cm ;裸岩零星分布于海拔 $3090\text{--}3770\text{ m}$ 的亚高山地带。植被主要有青海云杉(*Picea crassifolia*)林、灌丛、草地和少量祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)林,其中青海云杉林呈片状分布于 $2400\text{--}3300\text{ m}$ 的阴坡、半阴坡,土壤为山地灰褐土,阳坡、半阳坡为山地草原,伴生有小灌木。高海拔($3300\text{--}3800\text{ m}$)区主要为湿性灌木林,主要种类有箭叶锦鸡儿(*Caragana jubata*)、吉拉柳(*Salix gilashanica*)、忍冬(*Lanicerasp*)、高山绣线菊(*Spiraeaglaciac*)等,土壤为亚高山灌丛草甸土和高山草甸土。在阳坡 3900 m 和阴坡 3800 m 以上至山顶,主要生长稀疏垫状植被,大面积为裸岩,土壤为高山草甸土和高山寒漠土^[23-25]。

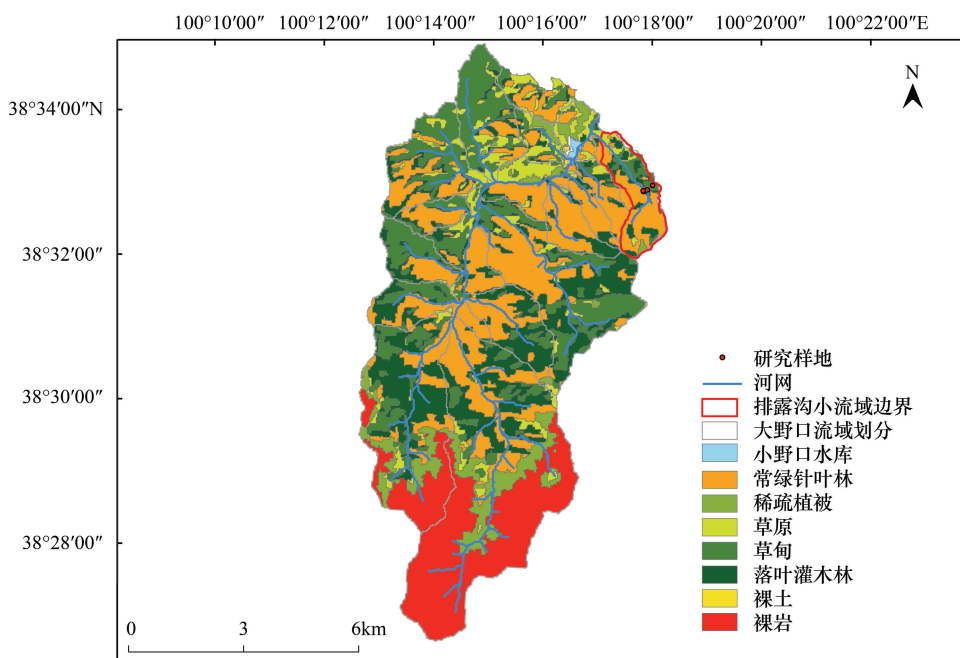


图 1 研究区位图以及三种植被类型

Fig.1 Location map of the study area and three typical vegetation types

2 材料与方法

2.1 样地选择与数据采集

祁连山排露沟流域植被分布格局呈现明显的斑块格局,即青海云杉林分布于阴坡、半阴坡,草地仅分布与阳坡,灌丛分布于阴坡、半阴坡,紧邻青海云杉林,三种植被类型对土壤水分的保持与储存能力是理解小尺度生态水文过程的基础,也是流域尺度生态水文过程模拟的重要内容。因此,通过对三种典型植被的土壤温湿度和降雨进行野外观测实验,研究不同植被类型对土壤水分涵养功能的差异,主要包括土壤温湿度剖面差异、降雨入渗和土壤水分损失过程,并计算水源涵养功能指标。在海拔高度 2900 m ,选择三种典型植被类型的样地进行野外观测研究,分别是草地、灌丛和青海云杉林(图 1)。青海云杉(*Picea crassifolia*),分布在阴坡,多为中龄林和近成熟林,郁闭度为 0.6 左右,坡度为 25° ;灌丛主要植物种是金露梅(*Potentilla fruticosa*),分布在青海云杉林边缘,郁闭度为 0.4 左右,坡度为 15° ;草地主要有珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、苔草

(*Carex*)、针茅(*Stipa capillata*)、蒿(*Artemisia selengensis*)、棘豆(*Oxytropis*)、马蔺(*Iris lacteal*)等草本植物覆盖,分布于阳坡,坡度为 30°。在野外安装土壤温湿度探头之前,先挖土壤剖面,取土样,通过烘干法、激光粒度仪(Mastersizer 2000)和重铬酸钾外加加热法等方法,测量了土壤容重、粒径组成、有机质含量、田间持水量、饱和持水力和孔隙度等土壤指标。三种典型植被类型的土壤属性差异见表 1。

表 1 三种植被类型下土壤属性差异

Table 1 The difference of soil properties under three vegetation types

土壤性质 Soil properties	灌丛 Shrubland	青海云杉林 Qinhai spruce forest	草地 Grassland
粘粒 Clay/%	0.71	0.81	2.20
粉粒 Silt/%	58.12	55.39	80.27
砂粒 Sand/%	41.17	43.80	17.53
土壤容重 Bulk density/(g/cm ³)	0.75	0.84	0.95
土壤有机质 Soil organic matte/(g/kg)	62.72	54.83	16.91
田间持水量 Field capacity/%	45.29	47.83	39.77
饱和持水能力 Saturation moisture capacity/%	87.32	79.04	61.43
孔隙度 Porosity/%	71.69	70.10	64.14

在选择样地内,采用自记录雨量筒和土壤水分温湿度自动监测系统分别记录降雨量和土壤温湿度的动态变化。自记录雨量筒的记录阈值为 0.2 mm,即雨量达到 0.2 mm 记录一次,少于 0.2 mm 该系统不记录。3 组土壤水分温湿度自动监测系统(H21, Decagon Devices Inc., Pullman, WA)分别对三种植被下的土壤温湿度动态变化进行监测,每组土壤水分温度自动监测系统(H21)各配备 5 组土壤水分传感探头(S-SMC-M005)和 5 组土壤温度传感探头(S-TMB-M006),全部按照土壤剖面 0—10 cm, 10—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm 和 60—80 cm 进行埋设,并通过 HOBO 气象站(HOBO weather station logger)来记录数据,按照 15 分钟/次采样频率。野外观测期主要集中在 2013 和 2014 年的生长季(6 月—9 月),其中除了 2014 年灌丛 0—10cm 土壤湿度探头损坏。

2.2 数据处理与分析

降雨事件筛选:根据根区土壤水分对单次降雨或多次连续降雨的脉动响应强弱,选择较强的土壤水分脉动事件,其中具有较强的土壤水分脉动事件时间段内所对应日降雨量累计为该次降雨事件的降雨总量,即降雨事件是包含多日降雨量,并引起了土壤水分强的脉动响应。在 2013 和 2014 年的生长季一共筛选了 9 次引起根区土壤水分强的脉动响应的降雨事件(表 2)。

表 2 根据降雨脉动标准筛选的降雨事件以及土壤脉动的响应

Table 2 Rainfall events and soil pulse responses by precipitation pulse criterion

降雨事件 Rainfall event	降雨量 Rainfall/mm	草地 Grassland			灌丛 Shrubland			青海云杉林 Qinhai spruce forest		
		θ_{RZi}	θ_{RZmax}	θ_{RZe}	θ_{RZi}	θ_{RZmax}	θ_{RZe}	θ_{RZi}	θ_{RZmax}	θ_{RZe}
1	61.8	0.0663	0.1151	0.1070	0.2368	0.2744	0.2656	0.1194	0.1864	0.1700
2	97.0	0.1070	0.1633	0.1284	0.2656	0.3080	0.2668	0.1700	0.2175	0.1811
3	65.4	0.1284	0.1866	0.1478	0.2668	0.2901	0.2582	0.1811	0.2183	0.1955
4	65.4	0.1431	0.1826	—	0.2328	0.2599		0.1899	0.2336	—
5	38.0	0.1826	0.1861	—	0.2527	0.2535		0.2310	0.2415	—
6	50.4	0.1782	0.2006	0.1538	0.2443	0.2578	0.2255	0.2376	0.2703	0.2378
7	42.8	0.1538	0.1656	0.1187	0.2255	0.2367	0.2149	0.2378	0.2441	0.2260
8	54.8	0.1187	0.1470	—	0.2149	0.2307		0.2260	0.2444	—
9	18.8	0.1437	0.1637	0.1450	0.2266	0.2382	0.2227	0.2355	0.2484	0.2350

θ_{RZi} 、 θ_{RZmax} 和 θ_{RZe} 在公式(1)、(2)中有解释

根区土壤累计入渗量计算:根据根区土壤水分对降雨事件响应的前后土壤水分含量变化计算根区土壤累计入渗量 I_{RZ} , 即

$$I_{RZ} = (\theta_{RZmax} - \theta_{RZi})D \quad (1)$$

其中 θ_{RZmax} 是降雨事件引起土壤水分脉动的最大根区土壤含水量 (cm^3/cm^3), θ_{RZi} 是土壤水分脉动前期的初始根区土壤水分含量 (cm^3/cm^3), D 是土壤水分测量深度 (80 cm)^[26]。

根区土壤水分累计损失量计算:根据根区土壤水分对降雨事件响应到达最高点、其后最低点之差和根区深度的乘积来计算根区土壤水分累计损失量 CWL_{RZ} , 即

$$CWL_{RZ} = (\theta_{RZmax} - \theta_{RZe})D \quad (2)$$

其中 θ_{RZmax} 是降雨事件引起土壤水分脉动的最大根区土壤含水量 (cm^3/cm^3), θ_{RZe} 是降雨事件后土壤湿度降到最低时的根区土壤水分含量 (cm^3/cm^3), D 是土壤水分测量深度 (80 cm)^[21]。

水源涵养功能指标 (conservation of water resources, CWR):降雨经入渗过程转化为土壤-植被连续体中的绿水,绿水再通过植被的蒸腾和土壤的蒸发与地表径流从土壤-植被连续体中损失,模式如图 2,定义水源涵养功能指标为每次土壤水分脉动事件下根区土壤累计入渗量与根区土壤水分累计损失量的比值,即

$$CWR = \frac{(\theta_{RZmax} - \theta_{RZi})D}{(\theta_{RZmax} - \theta_{RZe})D} = \frac{I_{RZ}}{CWL_{RZ}} \quad (3)$$

各物理量的含义公式(1)、(2)中一致,其中当 $CWR > 1$,说明土壤-植被连续体涵养了水源,而 $CWR \leq 1$,说明土壤-植被连续体收入等于或小于水分损失,未能涵养水源。

本文中图全部通过 OriginPro 软件 9.0 版本制作 (OriginLab Corporation, Northampton, U.S.A.), 而土壤温湿度数据分析通过 SPSS 软件 21.0 版本 (SPSS Inc., Chicago, IL) 进行。对不同植被类型下土壤温湿度进行单因素方差分析和多重比较 (LSD 方法), 并对根区土壤累计入渗量与降雨事件强弱, 以及根区土壤水分累计损失量与根区土壤温度进行线性相关分析和线性拟合的单因素方差分析。

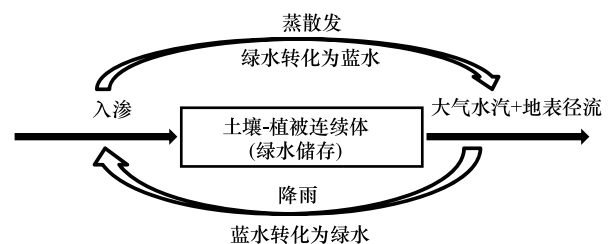


图 2 水文与蓝绿水流循环模式图

Fig.2 The framework of hydrological cycle and 'blue and green' flow cycle

3 结果与分析

3.1 典型植被下土壤属性差异与生长季土壤温湿度变化

通过对三种植被类型下的土壤属性分析,结果表明草地粘粒和粉粒百分比含量都高于灌丛和青海云杉林,分别为 2.2% 和 80.27%,而砂粒含量草地最低;土壤有机质含量灌丛和青海云杉林高于草地,分别为 62.72% 和 54.83%,而土壤容重与其相反,灌丛、青海云杉林和草地依次增加;与土壤水分保持有关的饱和持水量和孔隙度等土壤属性按灌丛、青海云杉林和草地的顺序依次降低,而田间持水量青海云杉林最高。

根据 2013 和 2014 生长季对三种典型植被类型土壤湿度的野外观测,在 0—80 cm 根区的土壤湿度均值有明显差异,从大到小依次是灌丛、青海云杉林和草地 (图 3abc, 5abc)。与此同时,三种典型植被生长季土壤湿度在各土层上有着显著差异, $P < 0.001$ (图 4A, 6A)。单因素方差分析表明除了 2014 年生长季青海云杉林与灌丛在 40—60 cm 土壤深度的土壤湿度,以及青海云杉林与草地在 60—80 cm 土壤深度的土壤湿度差异不显著,其余各土壤层的土壤湿度有显著差异,其中青海云杉林与灌丛在 0—60 cm 各土层都具有较高的土壤湿度,除了在 60—80 cm 土壤深度青海云杉林的土壤湿度较低。除此之外,三种典型植被生长季土壤湿度沿土壤剖面也有着明显的规律性。在草地,10—20 cm 土壤深度的土壤湿度值最高,土壤湿度沿 10 cm 到 80 cm 土壤深度依次减少;在灌丛,表层土壤到 20—40 cm 土壤层的土壤湿度依次升高,在 20—40 cm 的土壤湿度值最大,往更深土壤深度的土壤湿度依次减小;在青海云杉林,0—60 cm 土壤深度的土壤湿度随深度增加

升高,60—80 cm 土壤深度的土壤湿度最低,2013、2014 年该层生长季土壤湿度均值分别为 $0.086 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 、 $0.114 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。这些结果说明在祁连山区植被类型对土壤湿度有着显著的影响,灌丛与青海云杉具有较高的土壤水分含量,有着较强的水源涵养的功能。

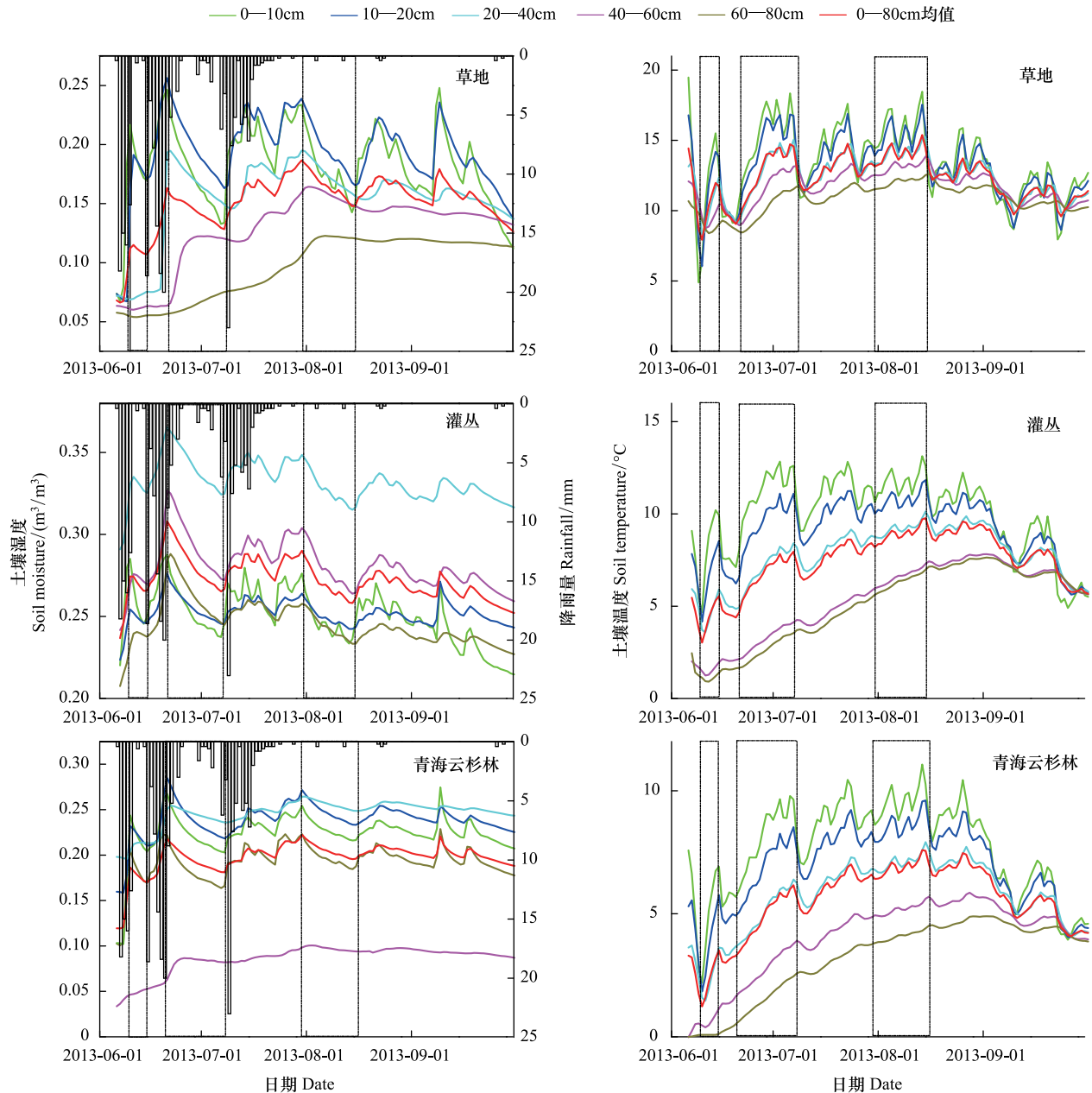


图 3 2013 生长季三种植被类型土壤温湿度动态变化

Fig.3 Soil moisture and soil temperature dynamics under three vegetation types during the growing season in 2013

根据 2013 和 2014 生长季对三种典型植被类型土壤温度野外观测,三种植被在 0—80 cm 根区的土壤温度均值有明显差异,从高到底的顺序是草地、灌丛和青海云杉林(图 3def,5def)。三种典型植被的生长季土壤温度在各土壤剖面土壤层上也有着显著差异,各土壤层的土壤温度高低顺序均是:草地>灌丛>青海云杉林(图 4B,6B)。除此之外,三种典型植被生长季土壤温度沿土壤剖面的变化规律一致,在 0—80 cm 土壤深度的土壤温度随土壤深度的增加而依次降低。这些结果表明在地形和植被类型的影响下,草地比灌丛和青海云杉林两种植被类型接收更多的热量,并且各植被类型下的土壤热量沿剖面依次降低。

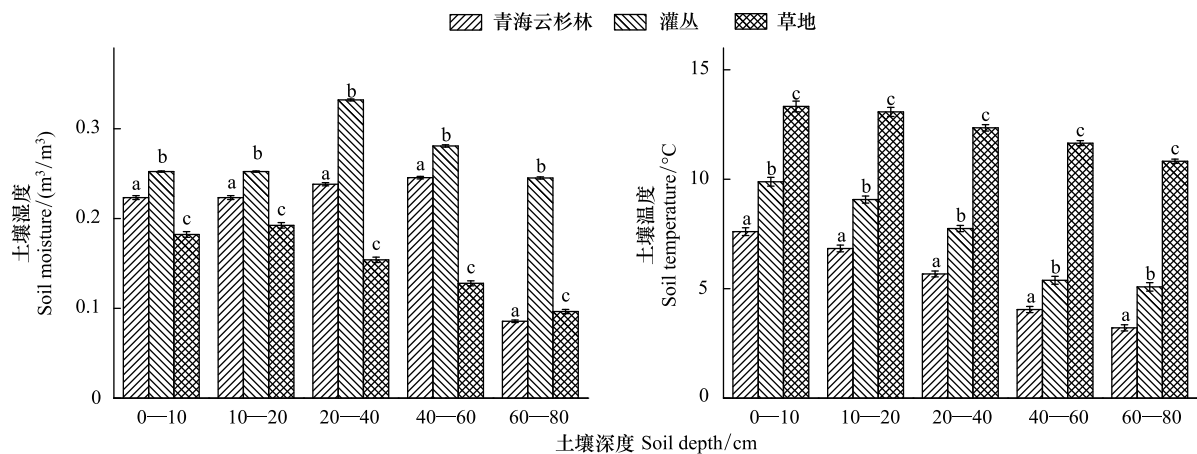


图4 2013 生长季三种植被类型土壤温湿度剖面单因素方差分析及多重比较

Fig.4 One factor analysis of variance and multiple comparison of soil moisture and soil temperature profiles under three vegetation types during the growing season in 2013

3.2 典型植被下土壤水分对降雨的响应差异

三种植被类型的土壤水分对强降雨都有着明显响应,特别是几天的连续降雨,但是沿土壤剖面各土壤层对降雨的响应存在差异,表层土壤相比深层土壤响应更快,草地比青海云杉林和灌丛的土壤水分对降雨的响应更快(图3abc,5abc)。在草地,土壤表层(0—20 cm)对强降雨事件有着及时的响应,20—40 cm 土壤层响应滞后于土壤表层,而深层土壤40—60 cm 和60—80 cm 的土壤水分很少受强降雨的补给,主要是上层土壤在重力作用下往深层土壤补给,从而使得土壤湿度的剖面特征沿土壤深度而升高;灌丛在强降雨或者连续几天降雨的情况下,各层土壤水分对降雨都有着明显的响应,并且土壤水分在各土壤层保持在较高水平,特别是2014 年生长季各土壤层的土壤水分都大于 $0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$;青海云杉林土壤深度在0—60 cm 内土壤水分对降雨有着强的响应,而60—80 cm 土壤深度的土壤水分对降雨响应不强烈,整个生长季土壤湿度低于上层土壤。

不同植被类型的根区土壤累计入渗量存在差异,从图7中可以看出,根区土壤累计入渗量与降雨量有着明显的正相关关系,但是不同植被类型下的各次降雨事件内根区土壤累计入渗量存在差异。线性回归发现,单次降雨事件下草地和青海云杉林的根区土壤累计入渗量高于灌丛,其中连续几天降雨量低于32 mm 时,青海云杉林的根区土壤累计入渗量高于草地,而连续几天降雨量大于32 mm 时,青海云杉林与草地的根区土壤累计入渗量关系则相反。

3.3 典型植被水源涵养功能差异

从图3和图5竖立虚线分割部分表明,不同植被类型不同土壤层的土壤水分损失过程存在差异,其中草地沿土壤剖面差异最明显,表层0—40 cm 土壤损失曲线更陡峭,土壤水分损失比深层40—80 cm 土壤层快,而灌丛和青海云杉林沿土壤剖面土壤水分损失相对一致,并且较缓慢。除此之外,图8中根区土壤累计损失量与土壤温度有较好一致的趋势,根区土壤累计损失量随着土壤温度的升高而增加,并且草地的根区土壤累计损失量与土壤温度有着显著的正相关关系,而灌丛与青海云杉林则不显著。这些结果表明草地土壤水分损失较灌丛和青海云杉林更快,且对土壤温度的敏感性最高,而青海云杉林土壤水分损失对土壤温度敏感性最低。

水源涵养功能指标(CWR)存在较大差异(图9),生长季初期三种植被类型的CWR 值都大于1,说明初期土壤水分含量低,植被尚未处于生长旺盛时期耗水量少,都涵养着水源,但是整个生长季青海云杉林的CWR 值多大于1,说明其有较强涵养水源能力,即保持了水分的能力,而灌丛的CWR 值多小于1,说明其涵养水源能力较弱,土壤水分损失较高,而草地在生长季初期($\text{CWR} > 1$)涵养水源,随着生长季温度升高和植被开始旺盛生长,生长季后期($\text{CWR} < 1$),多为水分消耗。除此之外,水源涵养功能指标(CWR)值并没有受降雨事件大

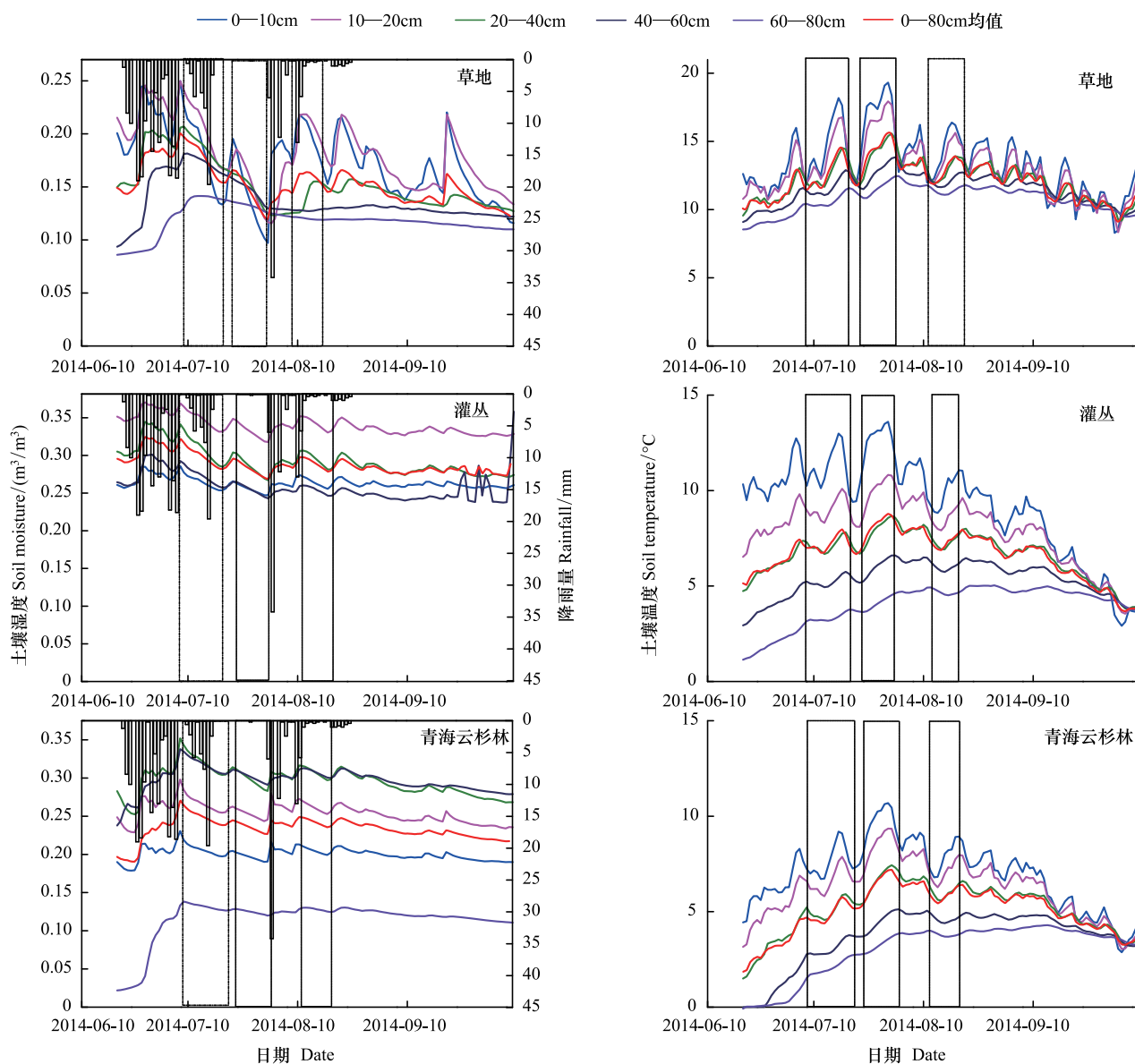


图5 2014 生长季三种植被类型土壤温湿度动态变化

Fig.5 Soil moisture and soil temperature dynamics under three vegetation types during the growing season in 2014

小所影响。通过计算筛选降雨事件下的各植被类型水源涵养功能指标(CWR)的平均值,草地的CWR 值为1.8,灌丛的CWR 值为1.3,青海云杉林的CWR 值为1.6,这表明三种植被类型在生长季都有着涵养水源的功能,即生长季三种植被类型保持和储存着水分,有利于其余季节的生活生长。

4 讨论

4.1 典型植被下土壤性质与土壤水分保持

土壤水分保持是土壤重要的水力性质,包括控制土壤水分储存、再分布、植被可利用性、潜在蒸发等过程,对陆地生态系统的水文过程和生态过程有着深远的影响^[27]。土壤属性与植被水源涵养功能密切相关,主要影响因素是土壤粒径分布、土壤有机质含量和土壤容重,其他因素还有土壤结构和实际表面面积等^[22]。而植被又影响着土壤属性,如土壤容重、孔隙度、有机质含量等,从而影响土壤水分的储存^[20]。通过对三种典型植被类型下土壤性质的分析,灌丛和青海云杉林的有机质含量高于草地,有利于改善土壤质地,使得灌丛和青海

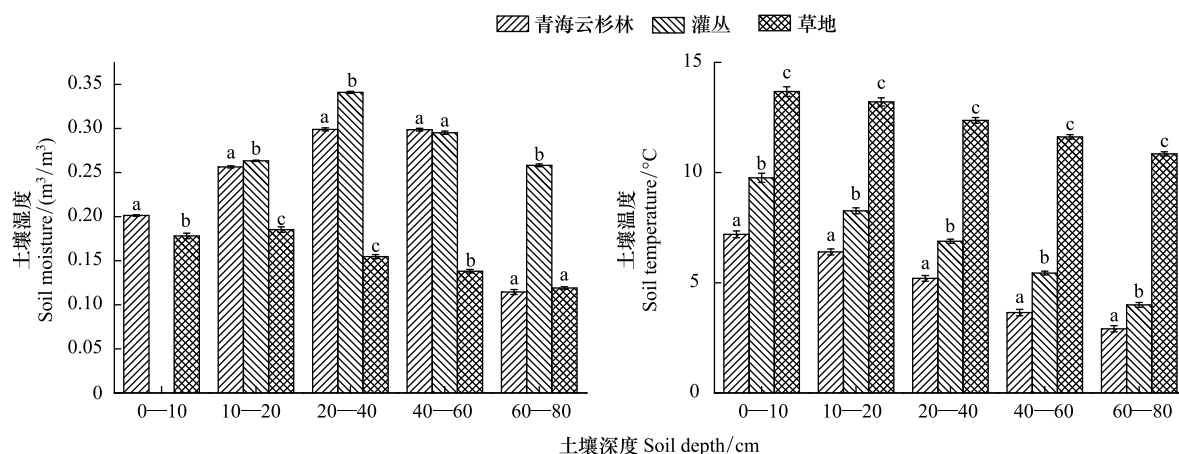


图 6 2014 生长季三种植被类型土壤温湿度剖面单因素方差分析及多重比较

Fig.6 One factor analysis of variance and multiple comparison of soil moisture and soil temperature profiles under three vegetation types during the growing season in 2014

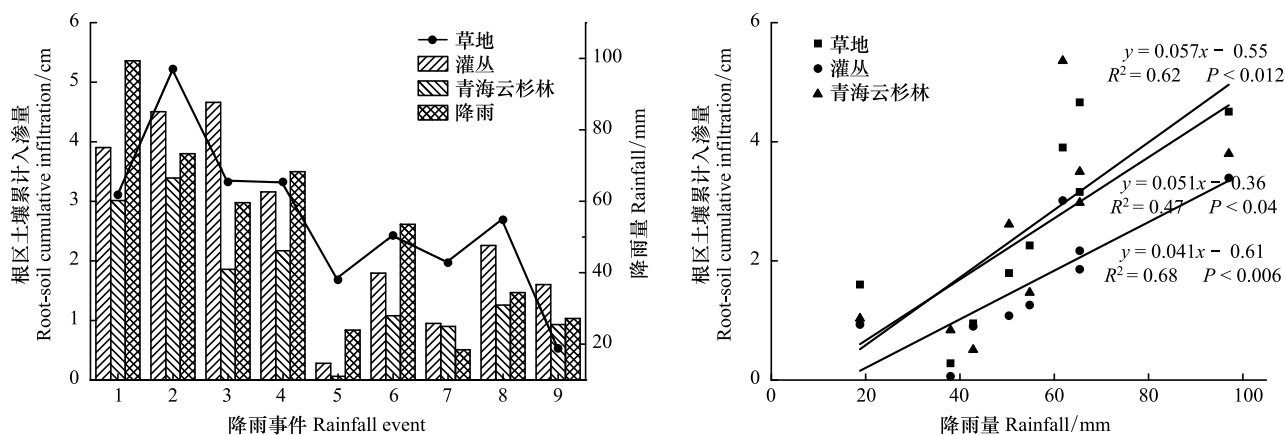


图 7 三种植被类型根区土壤累计入渗量与连续降雨事件降雨量关系

Fig.7 The relationship of root zone soil cumulative infiltration and precipitation under three vegetation types

云杉林的粉粒和砂粒含量、田间持水量、饱和持水量和孔隙度等土壤属性值高于草地,而土壤容重和粘粒含量低于草地。三种植被类型的土壤属性差异使得灌丛和青海云杉林可能比草地具有更强的水源涵养的功能。这与 2013 和 2014 生长季对三种典型植被类型土壤湿度野外观测结果一致,即在灌丛、青海云杉林根区的土壤湿度均值有明显高于草地。

4.2 典型植被下降雨入渗与土壤水分损失

土壤水分动态是生态水文循环的中心组成,主要受入渗、蒸散发和泄流等过程影响^[28]。根据土壤水分平衡原理,不同植被类型下土壤水分动态差异主要受输入与输出过程决定。其中植被类型的作用首先影响的是降雨入渗过程,即土壤水分对降雨的响应过程存在差异,其次是植被通过根吸收土壤水分和土壤表面蒸发过程消耗土壤水分,即土壤水分损失过程。在本研究中通过对 2013 和 2014 生长季的典型植被土壤湿度和降雨的野外观测,三种植被类型的土壤水分对强降雨都有着明显响应,特别是几天的连续降雨,但是沿土壤剖面各土层对降雨的响应存在差异,特别是草地土壤剖面的土壤湿度对降雨的响应受土壤深度影响强烈,表层土壤相比深层土壤响应更快,这与常宗强等^[29]、He 等^[18]和 Sun 等^[17]研究结果一致。通过对根区土壤累计入渗量与降雨量进行线性回归分析结果发现,降雨事件下青海云杉林的根区土壤累计入渗量高于灌丛和草地,这表明青海云杉林比草灌更能增加入渗,有利于土壤水分的保持作用。

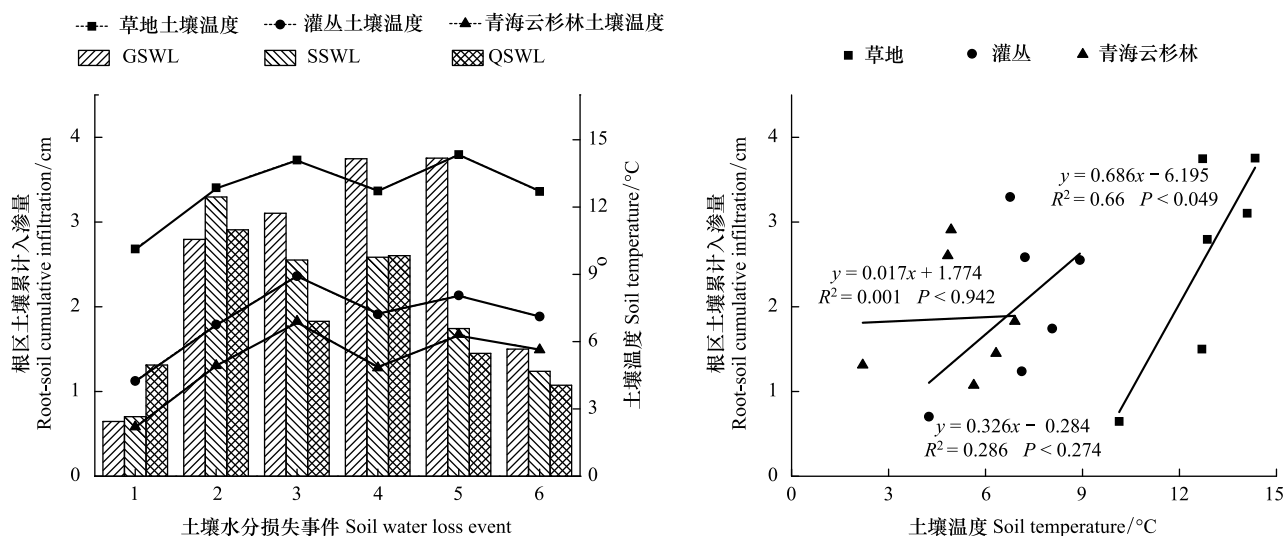


图8 三种植被类型根区土壤累计损失量与土壤温度关系

Fig.8 The relationship of root zone soil water loss and soil temperature under three vegetation types

GSWL: 草地土壤水分损失, SSWL: 灌丛土壤水分损失, QSWL: 青海云杉林土壤水分损失 Qinghai spruce forest soil water loss (GSWL: grass soil water loss, SSWL: shrub soil water loss, QSWL: Qinghai spruce forest soil water loss)

在高的土壤水分条件下,温度是造成土壤水分损失的主要因素,特别是土壤温度^[21]。土壤温度也受多种因素的影响,如地形和植被形成的微气候^[30]。祁连山排露沟小流域典型植被分布呈斑块格局,青海云杉林与灌丛主要分布在阴坡、半阴坡位置,而草地主要分布在阳坡,这使得阳坡草地不管是根区土壤温度均值还是沿土壤剖面各层土壤温度都明显高于灌丛和青海云杉林,这也直接影响这三种植被类型的土壤水分损失情况^[31]。本文通过降雨事件后根区土壤累计损失量与土壤温度之间的关系结果表明根区土壤累计损失量与土壤温度有明显的正相关关系,即降雨事件后根区土壤累计损失量随着土壤温度的升高而增加,其中草地的根区土壤累计损失量与土壤温度有着显著的正相关关系,而灌丛与青海云杉林则不显著,这表明阳坡草地的土壤水分损失受土壤温度影响较大,灌丛与青海云杉林反之。草地沿土壤剖面差异最明显,表层0—40 cm土壤水分损失比深层40—80 cm土壤层更快,这与草地根系主要分布于0—40 cm土壤深度有密切联系^[18,32]。通过计算的水源涵养功能指标(CWR)结果表明,CWR值存在较大差异,但是青海云杉林的CWR值多大于1,说明其每次降雨事件后是涵养了水源,这与整个生长季青海云杉林与灌丛土壤湿度都高于草地土壤湿度一致,同时三种典型植被在生长季都涵养了水源。这也说明青海云杉林是保持“绿水”最多的植被类型,并主要用于自身消耗,与Sun等研究结果一致^[17]。

5 结论

灌丛和青海云杉林的有机质、粉粒和砂粒含量、田间持水量、饱和持水量和孔隙度等土壤属性值高于草地,而土壤容重和粘粒含量低于草地;草地比青海云杉林和灌丛的土壤水分对降雨的响应更强,但是沿土壤剖面各土层对降雨的响应表层土壤相比深层土壤响应更快;青海云杉林的根区土壤累计入渗量高于灌丛和草

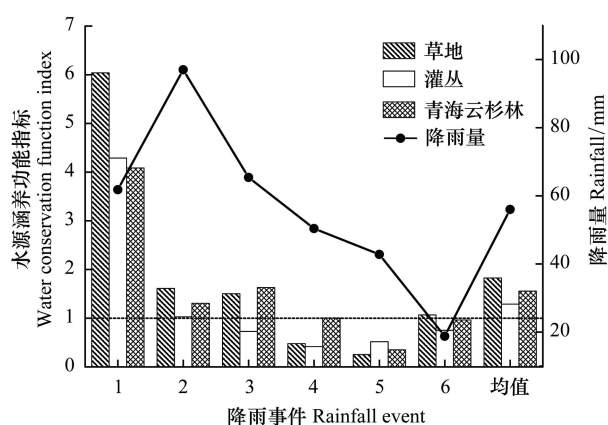


图9 三种植被类型水源涵养功能指标差异

Fig.9 The difference of water conservation function index under three vegetation types

地,草地土壤水分损失较灌丛和青海云杉林更快,并且阳坡草地的土壤水分损失受土壤温度影响较大,灌丛与青海云杉林则反之;整个生长季内青海云杉林和灌丛土壤湿度明显高于草地湿度,青海云杉林的 CWR 值多大于 1。综上所述,青海云杉林较灌丛和草地具有更强的水源涵养的能力,并储存着更多的“绿水”。未来在流域生态系统管理与可持续发展利用中,应重视青海云杉林强的蓄水保水对流域水文和生态系统健康的作用。

参考文献 (References):

- [1] Falkenmark M. Stockholm water symposium 1994: Integrated land and water management-challenges and new opportunities. *Ambio*, 1995, 24(1): 68-68.
- [2] Falkenmark M, Rockstrom J. The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2006, 132(2): 129-132.
- [3] Falkenmark M, Rockstrom J, Karlberg L. Present and future water requirements for feeding humanity. *Food Security*, 2009, 1(1): 59-69.
- [4] D'Odorico P, Laio F, Porporato A, Ridolfi L, Rinaldo A, Rodriguez-Iturbe I. Ecohydrology of Terrestrial Ecosystems. *Bioscience*, 2010, 60(11): 898-907.
- [5] Ellison D, N. Futter M, Bishop K. On the forest cover-water yield debate: from demand- to supply-side thinking. *Global Change Biology*, 2012, 18(3): 806-820.
- [6] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 2009, 12(12): 1394-1404.
- [7] 傅伯杰. 生态系统服务与生态安全. 北京: 高等教育出版社, 2013: 155-159.
- [8] 鲁绍伟, 毛富玲, 靳芳, 余新晓, 饶良懿. 中国森林生态系统水源涵养功能. *水土保持研究*, 2005, 12(4): 223-226.
- [9] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 张立伟. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务. *生态学报*, 2015, 35(15): 5191-5196.
- [10] 陈严武, 史正涛, 曾建军, 林紫红, 毛慧玲. 水源地不同林分水源涵养功能评价. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(2): 67-74.
- [11] 牛赞, 刘贤德, 李新, 张学龙, 赵维俊. 祁连山大野口流域森林空间结构及水源涵养功能. *中国沙漠*, 2014, 34(6): 1685-1691.
- [12] 秦嘉海, 魏淑莲, 金自学, 刘金荣, 谢晓蓉. 不同针叶林对祁连山森林灰褐土理化性质和水源涵养功能的影响. *水土保持通报*, 2010, 30(5): 84-87.
- [13] 孙昌平, 刘贤德, 雷蕾, 王有科, 张学龙. 祁连山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能. *水土保持通报*, 2010, 30(4): 68-72.
- [14] 何斌, 黄承标, 秦武明, 刘运华, 苏有文, 施福军. 不同植被恢复类型对土壤性质和水源涵养功能的影响. *水土保持学报*, 2009, 23(2): 71-74.
- [15] 秦嘉海, 金自学, 王进, 刘金荣, 谢晓蓉. 祁连山不同林地类型对土壤理化性质和水源涵养功能的影响. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 92-94.
- [16] 秦嘉海, 王进, 刘金荣, 谢晓蓉. 祁连山不同林龄青海云杉对灰褐土理化性质和水源涵养功能的影响. *土壤*, 2007, 39(4): 661-664.
- [17] Sun F X, Lü Y H, Wang J L, Hu J, Fu B J. Soil moisture dynamics of typical ecosystems in response to precipitation: A monitoring-based analysis of hydrological service in the Qilian Mountains. *Catena*, 2015, 129: 63-75.
- [18] He Z B, Zhao W Z, Liu H, Chang X X. The response of soil moisture to rainfall event size in subalpine grassland and meadows in a semi-arid mountain range: A case study in northwestern China's Qilian Mountains. *Journal of Hydrology*, 2012, 420-421: 183-190.
- [19] Wang C, Zhao C Y, Xu Z L, Wang Y, Peng H H. Effect of vegetation on soil water retention and storage in a semi-arid alpine forest catchment. *Journal of Arid Land*, 2013, 5(2): 207-219.
- [20] Wang S, Fu B J, Gao G Y, Liu Y, Zhou J. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China. *Catena*, 2013, 101: 122-128.
- [21] Wang S, Fu B J, Gao G Y, Yao X L, Zhou J. Soil moisture and evapotranspiration of different land cover types in the Loess Plateau, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(8): 2883-2892.
- [22] Yang F, Zhang G L, Yang J L, Li D C, Zhao Y G, Liu F, Yang R M, Yang F. Organic matter controls of soil water retention in an alpine grassland and its significance for hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 3086-3093.
- [23] 赵传燕, 沈卫华, 彭焕华, 王超. 青海云杉林叶面积指数空间分布模拟——以祁连山区排露沟流域为例. *兰州大学学报*, 2009, 45(5): 68-72.
- [24] 吴旭东. 青海云杉林对祁连山排露沟小流域径流的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
- [25] 常宗强, 王金叶, 常学向, 王艺林, 贾玉琴. 祁连山水源涵养林枯枝落叶层水文生态功能. *西北林学院学报*, 2001, 16(S1): 8-13.

- [26] Moran M S, Hamerlynck E P, Scott R L, Stone J J, Holifield Collins C D, Keefer T O, Bryant R, DeYoung L, Nearing G S, Sugg Z, Hymer D C. Hydrologic response to precipitation pulses under and between shrubs in the Chihuahuan Desert, Arizona. *Water Resources Research*, 2010, 46 (10): W10509.
- [27] Rodriguez-Iturbe I, Porporato A. *Ecohydrology of water-controlled ecosystems: soil moisture and plant dynamics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005: 1-15.
- [28] Legates D R, Mahmood R, Levia D F, DeLiberty T L, Quiring S M, Houser C, Nelson F E. Soil moisture: A central and unifying theme in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 2011, 35(1): 65-86.
- [29] 常宗强, 王金叶, 常学向, 张学龙, 董晓丽. 祁连山林区土壤水分与降水的关系分析. *西北林学院学报*, 2001, 16(S1): 22-25.
- [30] Zou C B, Barron-Gafford G A, Breshears D D. Effects of topography and woody plant canopy cover on near-ground solar radiation: Relevant energy inputs for ecohydrology and hydopedology. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(24): L24S21.
- [31] Liu H, Zhao W Z, He Z B. Self-organized vegetation patterning effects on surface soil hydraulic conductivity: A case study in the Qilian Mountains, China. *Geoderma*, 2013, 192: 362-367.
- [32] Liu H, Zhao W Z, He Z B, Zhang L J. Stochastic modelling of soil moisture dynamics in a grassland of Qilian Mountain at point scale. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2007, 50(12): 1844-185.