

添加 γ -聚谷氨酸对土壤结构及持水特性的影响

曾健, 费良军, 陈琳, 杨扬

(西安理工大学水资源研究所, 西安 710048)

摘要: 为进一步探究 γ -聚谷氨酸在农业方面应用, 将不同 γ -PGA 含量(0, 0.1%, 0.2%, 0.5%, 1%)施入无团粒结构的砂壤土与粉壤土中, 研究了 γ -PGA 在土壤物理结构及持水特征方面的作用。结果表明: 随 γ -PGA 含量的增加, 同一吸力下土壤持水量增加, VG 模型中参数 α 值均大于对照组, n 值递减。 γ -PGA 添加至 1% 时, 砂壤土中容重降低 0.087 g/cm³, 孔隙度增加 3.28%, 粉壤土中容重降低 0.108 g/cm³, 孔隙度增加 4.08%, 添加 γ -PGA 降低了毛管孔隙比例, 提高无效孔隙比例, 表明 γ -PGA 对粉壤土物理特性影响大于砂壤土。饱和含水量与 γ -PGA 含量呈幂函数正相关, 饱和扩散率则呈负相关关系, 粉壤土中 VG 模型参数所计算饱和和扩散率与水平入渗法计算值间相对误差值小于 10%。除凋萎系数外, γ -PGA 对其余土壤水分常数影响显著, 均随 γ -PGA 含量增加而增大。土壤中薄膜水、毛管水比例提高, 重力水比例显著下降。 γ -PGA 含量为 1% 时, 粉壤土中有效水比例为 64.83%, 砂壤土中仅为 56.14%。添加 γ -PGA 有利于改良土壤内孔隙分布, 提高持水能力, 防止土壤水分的深层渗漏。

关键词: γ -聚谷氨酸; 土壤持水特性; 土壤孔隙; 饱和扩散率; 土壤水分常数

中图分类号: S152.7; S156.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)01-0217-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.01.034

Effects of γ -PGA on Soil Structure and Water—holding Characteristics

ZENG Jian, FEI Liangjun, CHEN Lin, YANG Yang

(Research Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: In order to further research the application of γ -PGA in agriculture, different contents of γ -PGA (0, 0.1%, 0.2%, 0.5% and 1%) were applied in sandy loam and silty loam without granular structure to study the effects of γ -PGA on soil physical structure and water retention characteristics. Results showed that: with the increasing of γ -PGA content, water retention capacity of soil increased under the same absorption force. Values of α in the VG model were all larger than those in the control group, and n value decreased progressively. When the content of γ -PGA increased to 1%, the bulk density of sandy loam decreased by 0.087 g/cm³, and the porosity increased by 3.28%; corresponding parameters of silty loam were 0.108 g/cm³ and 4.08%. The addition of γ -PGA reduced the proportion of capillary pore, and increased the proportion of invalid pore, indicating that effect of γ -PGA on the physical characteristic of silty loam were greater than those of sandy loam. Power function positive correlation existed between the saturation moisture content and the γ -PGA content, while negative correlation existed between the saturation diffusion rate and the γ -PGA content. The relative error between the saturation diffusion rates calculated by parameters of VG model and horizontal infiltration method was smaller than 10% in silty loam. Except for the wilting coefficient, γ -PGA had significant effects on other soil water constants, wherein the constants increased with the increasing of γ -PGA content. In the soil, proportions of film water and capillary water increased, whereas the proportion of gravitational water decreased significantly. When the γ -PGA content was 1%, the proportion of available water was 64.83% in silty loam, whereas the value was only 56.14% in sandy loam. Adding γ -PGA was beneficial to improve pore distribution in soil and water retention capacity, and prevent deep seepage of soil moisture.

Keywords: γ -polyglutamic acid; soil water—holding capacity; soil porosity; saturated diffusivity; soil water constant

γ -聚谷氨酸(Poly- γ -glutamic acid, γ -PGA)是由微生物发酵而成的一种新型可溶解的环保型高分子材料,降解产物为无公害的谷氨酸^[1-2]。目前 γ -PGA 在制备方法中研究较多^[2-3],应用方面, γ -PGA 在食品、化妆品、医药、农业领域中发展较为迅速^[4-7]。常用保水剂对土壤结构与作物安全性具有一定负作用^[8-9]。 γ -PGA 最早在农业中应用是对作物种子活力的影响进行了研究^[10],王传海等^[11]对 γ -PGA 吸水性能与生物效应研究发现, γ -PGA 最大吸水倍数可达到 1 108.4 倍,土壤水倍数为 30~80 倍,能有效提高小麦与黑麦草种子发芽率。 γ -PGA 除作为土壤保水剂应用广泛外,也可作为肥料增效剂可有效提高肥料利用率,提高作物产量^[12-13]。 γ -PGA 运用于农业生产过程中对土壤结构及其持水特性的研究较少,史文娟等^[14]研究了 γ -PGA 对土壤水分入渗能力的影响,结果表明 γ -PGA 对土壤水分入渗具有显著减渗作用,增强了土壤的持水能力。Doran 等^[15]研究结果则显示, γ -PGA 能有效改良土壤酸碱度,防止土壤板结。本研究选取不同质地土壤添加 γ -PGA 分析其对土壤孔隙结构、入渗能力及土壤持水特性的影响,并借助土壤水分常数分析不同 γ -PGA 含量下,不同类型土壤水比例分布,以期对 γ -PGA 的合理使用提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试土样 试验土壤分别来自陕北米脂县远志山地微灌枣树示范基地砂壤土与西安理工大学节水灌溉试验中心粉壤土,试验土样经风干、均匀混合后过 2 mm 筛备用,采用 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪测土壤颗粒。结果见表 1(采用国际制划分土壤质地)。

表 1 试验土壤颗粒级配组成

土壤质地	颗粒级配组成/%		
	<0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~2 mm
砂壤土	1.46	29.01	69.53
粉壤土	2.79	85.57	11.64

1.1.2 γ -PGA 理化特性 土壤保水剂选自山东福瑞达生物科技有限公司所产 γ -PGA,外观为白色粉末,其粒度为 100 目,分子量为 700 kD。称取 2 g 的 γ -PGA 置于透析袋中(m_1),称得添加剂与透析袋质量为 m_2 ,将透析袋两端密封后放入盛入 1 000 mL 蒸馏水的烧杯中,12 h 后将透析袋从烧杯中取出悬空放置 15 min,不再有水滴后称得质量为 m_3 ,其吸水倍数计算公式为 $(m_3 - m_2)/(m_2 - m_1)$,每组试验重复 3 次,取平均值得 γ -PGA 在蒸馏水中的吸水倍数为 731 g/g,自来水中为 319 g/g。

1.2 试验方法

试验于 2016 年 8 月 12 日至 12 月 22 日在西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室农水大厅进行。

1.2.1 水分特征曲线测定 试验设置 γ -PGA 质量比为 0 为对照组,其余 4 个水平 γ -PGA 质量比分别为 0.1%,0.2%,0.5%,1%,土壤质地分别为砂壤土与粉壤土,利用离心机选取 10 个不同水吸力值进行试验,得到不同处理下各吸力所对应的含水量,数据运用 RETC 软件拟合 van Genuchten 水分特征曲线模型参数。

1.2.2 土壤物理特性测定 土壤容重与孔隙含量为土壤物理特性的重要组成部分。土壤孔隙类别划分国内外缺乏共同标准,Thomasson 按不同大小的当量孔隙进行分类,将其大于 0.06 mm 的称之为通气孔隙,0.06~0.002 mm 称为毛管孔隙,而当量孔隙小于 0.002 mm 则为无效孔隙,而当量孔隙是与水分吸力相对应的孔隙,根据水分特征曲线及茹林公式(公式 1)可计算出不同类型孔隙含量^[16]。

$$d=\frac{3}{h}$$

(1)

式中: d 为当量孔隙直径(mm); h 为土壤水分吸力(cm)。

不同 γ -PGA 含量下土壤容重的测定方法与土壤饱和含水量的测定方式一致,将试验土样按容重为 1.30 g/cm³ 装入边长 40 cm,高 40 cm 的土箱中,土箱底部有机玻璃可拆卸,土层高度为 10 cm,将土箱放入盛水的容器内,水面高度略低于 10 cm,直至土壤表层出现一薄水层时用环刀测定饱和含水量,烘干后测定土壤容重;利用公式(2)计算各处理间土壤孔隙度,土壤比重采用均值 2.65 g/cm³ 计算。

$$P_t=(1-\frac{\rho_b}{\rho_s})\times 100\%$$

(2)

式中: P_t 为土壤孔隙度(%); ρ_b 为土壤容重(g/cm³); ρ_s 为土壤比重(g/cm³)。

1.2.3 土壤水分运动参数测定 土壤饱和导水率与扩散率反映了土壤水分入渗性能,利用渗透仪测得环刀内饱和土壤的饱和导水率。土壤饱和扩散率可根据水分特征曲线模型进行推导其拟合值,利用一维土柱水平入渗试验可测得土壤饱和扩散率,具体计算方法见下述数学模型。

1.2.4 土壤水分常数的测定 土壤水分常数为不同特征条件下、不同类型土壤水分所达到的最大值,它标志着土壤水分形态和性质的特征值,在不同质地土壤中添加不同含量的 γ -PGA,分别测得土壤吸湿系数、凋萎系数、最大分子持水量、毛管断裂含水量及田间持水量。不同土壤水分类型的划分对田间灌溉起

着重要的指导作用,通过土壤水分常数可根据其作用力类型将土壤水分类型分为吸湿水、薄膜水、毛管水及重力水。同样也可根据其水分对作物吸收利用的有效性通过土壤水分常数将其划分为无效水、有效水及多余水,土壤含水量到达凋萎系数时作物因吸水不足难以补充蒸腾消耗进而导致叶片发生萎焉现象,该土壤水分无法维持作物正常生长,称为无效水;凋萎系数至田间持水量间土壤水分可被植物吸收利用为有效水,根据其可利用难易程度又可划分为难有效水与易有效水,毛管断裂含水量为毛管水失去连续性时土壤含水量,也为难有效水与易有效水区分点,土壤水分在凋萎系数至毛管断裂含水量时土壤颗粒表面分子吸引力较大,作物难以吸收利用,而含水量在毛管断裂含水量至田间持水量区间时毛管力相对较小,植物较容易直接吸收利用土壤水分;超过田间持水量部分土壤含水量由于不能被毛管吸持,而在重力作用下通过土壤孔隙向下运移发生渗漏成为多余水^[17]。

(1)最大吸湿系数测定。将风干试验土样过 1 mm 筛后取 15 g,添加相应质量比的 γ -PGA 后放入干燥器内,同时取 30 mL 饱和的 K_2SO_4 溶液,1 周后取样称重,再将其放入干燥器内继续吸水,3 d 后再次称重直至达到恒重为止,将恒重土样放入烘箱内,计算出相应最大吸湿系数。

(2)凋萎系数测定。凋萎系数的测定采用生物法,将发芽大麦种子移入不同处理下土壤中培育,当幼苗出现两片真叶时将其移至没有阳光直接照射处,直至作物开始凋萎将其移至盛有饱和 K_2SO_4 溶液与湿木屑的木箱中(使箱内水汽饱和,保持较高湿度),若萎焉现象消失则从木箱移回原处,反复此操作直至植物不再复苏,此时土壤含水量则为凋萎系数^[18]。

(3)最大分子持水量与毛管断裂含水量测定。中科院南京土壤研究所提出最大分子持水量测定方法是利用杠杆式压力机在 25.5~30 kgf/cm² 作用下土壤含水量^[19],且杨文治^[20]研究指出毛管断裂含水量约为土壤基质吸力 100 kPa 左右,利用压力膜法测得水吸力为 100,2 500 kPa(25.49 kgf/cm²)时土壤含水量为毛管断裂含水量与最大分子持水量。

(4)田间持水量测定。田间持水量利用环刀采用威尔科斯法测定。

1.3 数学模型

van Genuchten^[21]采用的水分特征曲线模型为:

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (3)$$

式中: θ 为土壤含水量(cm^3/cm^3); θ_r 为土壤残余含水量(cm^3/cm^3); θ_s 为土壤饱和含水量(cm^3/cm^3); α 为水分特性曲线进气值拐点处水势的倒数(cm^{-1}); n, m 为形状系

数,其中 $m=1-1/n$ 。

土壤水分扩散率可表示为土壤水分特征曲线与非饱和导水率的函数,计算公式为:

$$D(\theta) = k(\theta) \frac{dh}{d\theta} \quad (4)$$

式中: $D(\theta)$ 为土壤水分扩散率函数; $k(\theta)$ 为非饱和导水率函数。

对 VG 模型进行求导得:

$$\frac{dh}{d\theta} = \frac{(1-m)\Theta^{-1/m}}{\alpha m (\theta_s - \theta_r) (1 - \Theta^{1/m})^m} \quad (5)$$

联立公式(4)、公式(5)得:

$$D(\theta) = \frac{k(\theta) (1-m)\Theta^{-1/m}}{\alpha m (\theta_s - \theta_r) (1 - \Theta^{1/m})^m} \quad (6)$$

当土壤含水量 θ 无限接近 θ_s 时, $1 - \Theta^{1/m}$ 极值为 0, 公式(6)无意义,在高吸力段时, V-G 模型中 $(\alpha h)^n$ 远大于 1, 因此忽略公式(3)右边分母中 1 计算饱和扩散度为:

$$D_s = \frac{k_s (1-m)}{\alpha m (\theta_s - \theta_r) \Theta^{1/m}} \quad (7)$$

式中: D_s 为土壤水分饱和扩散率(cm^2/min); k_s 为土壤饱和导水率(cm/min)。

土壤达到饱和状态时, $\Theta^{1/m}$ 等于 1, 得:

$$D_s = \frac{k_s (1-m)}{\alpha m (\theta_s - \theta_r)} \quad (8)$$

王全九等^[22]以一维水平土壤水分运动的达西定律与 Brooks-Corey 水分特征曲线为基础得出累积入渗量与湿润锋、入渗率与湿润锋倒数存在线性关系,从而推出饱和扩散率计算值。

$$I = (\theta_s - \theta_0) \frac{1}{[1 + N/(M-1)]} Z \quad (9)$$

$$i = \frac{h_d k_s}{M-1} \frac{1}{Z} \quad (10)$$

$$D_s = \frac{k_s h_d}{N (\theta_s - \theta_0)} \quad (11)$$

式中: I 为累积入渗量(cm); Z 为湿润锋(cm); i 为入渗率(cm/min); h_d 为进气吸力(cm); N 为 Brooks-Corey 模型中形状系数; M 为 Brooks-Corey 非饱和导水率函数中经验系数,其中 $M=3+2/N$; θ_0 为土壤初始含水量(cm^3/cm^3)。

公式(9)、公式(10)中, $(\theta_s - \theta_0)/[1 + N/(M-1)]$ 表示为 a , $h_d k_s/(M-1)$ 表示为 b 。已知将 VG 模型(公式3)分母 $1 + (\alpha h)^n$ 中 1 舍去时, Brooks-Corey 模型与 VG 模型间参数存在一定关系,其中 $h_d = 1/\alpha$, $N = mn$, 得:

$$a = (\theta_s - \theta_0) \frac{2(1-m)}{(1-m)^2 + 1} \quad (12)$$

$$b = \frac{k_s m}{\alpha (m+2)} \quad (13)$$

$$D_s = \frac{ab}{(\theta_s - \theta_0)(\theta_s - \theta_0 - a)} \quad (14)$$

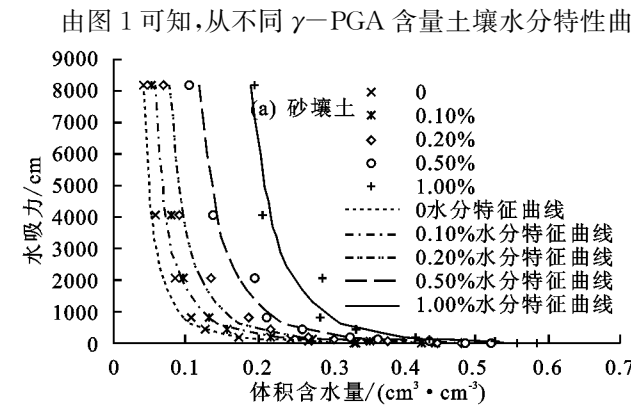
利用一维水平土柱吸渗试验得累积入渗量与湿润锋、入渗率与湿润锋倒数线性函数斜率 a 、 b 计算出不同处理下土壤水分饱和和扩散率。

1.4 数据分析

数据采用 Excel 2003 及 SPSS 21.0 软件处理及作图,利用最小极差法(LSD)在显著性水平为 0.05 上进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 γ -PGA 对水分特征曲线的影响



线的差别程度分析可知,不同土壤质地下随 γ -PGA 含量的增加,土壤持水容量均呈现递增效应。在低含水量时,不同添加剂含量土壤水吸力值差异较大,随土壤含水量的增加,各处理间水吸力差值逐渐减少。由拟合曲线可知 γ -PGA 含量越大,土壤含水量所作用的吸力范围也将越高。相同 γ -PGA 含量处理在同一水吸力时,粉壤土含水量高于砂壤土,粉壤土中土壤颗粒比表面积较大,故能吸持更多水分。粉壤土中孔隙分布较均匀,当水吸力不断增加时,土壤含水量减少较缓和,反之砂壤土中土壤水分特征曲线坡度较陡。

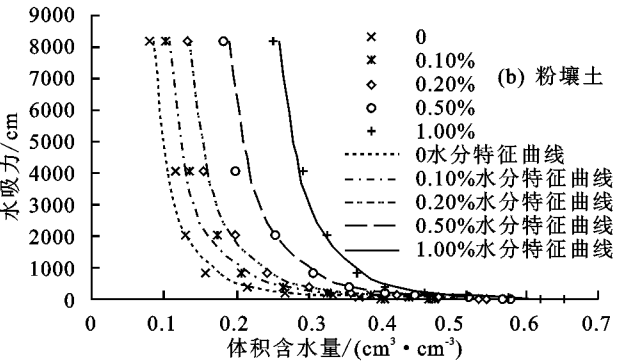


图 1 水分特征曲线随 γ -PGA 含量的变化

由表 2 可知,不同质地下,饱和含水量随 γ -PGA 含量增大而递增,残余含水量变化不显著,说明 γ -PGA 的添加加强了土壤的持水性能。 α 为土壤开始排水时的水吸力倒数,其值越小,意味着开始失水时的土壤水吸力越大,表征着失水起始点, γ -PGA 含量增加, α 值变大,意味着开始失水时的土壤吸水力越小,越容易发生失水。 n 值表示土壤水分特征曲线的失水速率,砂壤土失水速率均大于粉壤土,意味着土壤中 γ -PGA 含量增加能有效降低土壤失水速率。10 个处理下所拟合 VG 模型相关系数均大于显著性水平 0.01 下临界值 $r_{0.01}=0.7646$ 。

2.2 γ -PGA 对土壤物理特性的影响

由图 2 可知, γ -PGA 添加入土壤中后,添加剂吸水膨胀,进而导致土壤中孔隙含量增加,土壤容重减小。土壤容重及孔隙度随 γ -PGA 含量变化呈指

数函数。随 γ -PGA 含量增加至 1% 时,砂壤土中土壤容重与孔隙度分别为 1.21 g/cm^3 , 54.23% ,粉壤土中则为 1.19 g/cm^3 , 55.02% ,粉壤土中容重与孔隙度变化趋势均大于砂壤土。

表 2 不同处理土壤水分特征曲线参数

土壤 质地	聚谷氨酸 含量/%	VG 模型参数				R^2
		$\theta_s/$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\theta_r/$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\alpha/$ (cm^{-1})	n	
砂壤土	0	0.3656	0.0178	0.021	1.51	0.96
	0.1	0.4323	0.0172	0.022	1.46	0.92
	0.2	0.4684	0.0162	0.028	1.38	0.98
	0.5	0.5412	0.0173	0.025	1.31	0.94
	1	0.6671	0.0160	0.038	1.22	0.98
粉壤土	0	0.4122	0.0317	0.013	1.42	0.90
	0.1	0.4661	0.0336	0.014	1.41	0.97
	0.2	0.5071	0.0388	0.019	1.34	0.91
	0.5	0.5755	0.0482	0.018	1.27	0.93
	1	0.6864	0.0462	0.039	1.19	0.94

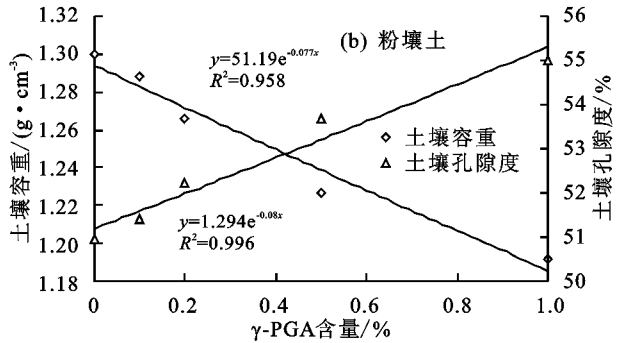
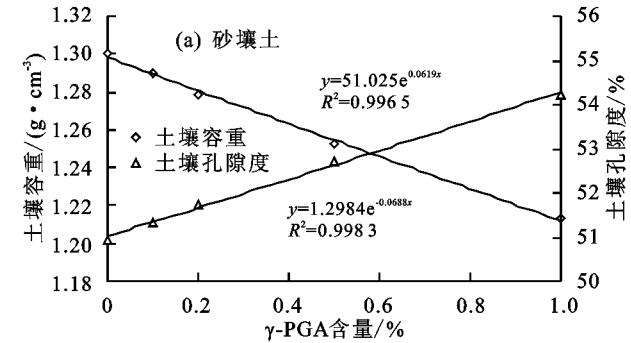


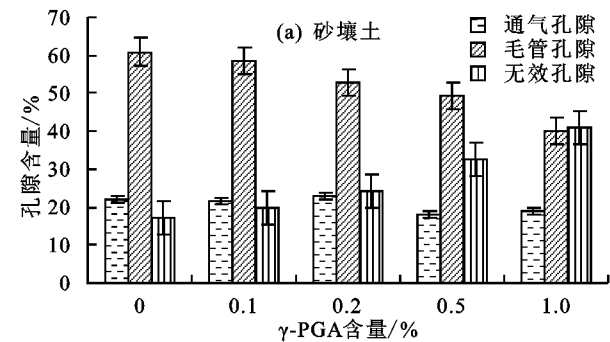
图 2 土壤容重、土壤孔隙度与 γ -PGA 含量的关系

土壤孔隙是水分和空气的主要通道,决定着土壤的持水性和保肥性,影响着植物的正常生长。上述分

析中根据土壤容重计算出各处理间总土壤孔隙度,进一步利用土壤水分特征曲线得各处理下通气孔隙、毛

管孔隙、无效孔隙含量(图 3)。

未添加 γ -PGA 时砂壤土中通气孔隙含量大于粉壤土,而粉壤土中无效孔隙含量较高,两者间毛管孔隙含量均为 60%。随 γ -PGA 含量增加,砂壤土



中通气孔隙含量所占比例大小顺序为 $0.2\% > 0.1\% > 1\% > 0.5\%$,无明显变化规律,粉壤土中含量递增;毛管孔隙含量在砂壤土、粉壤土中均递减;无效孔隙含量递增。

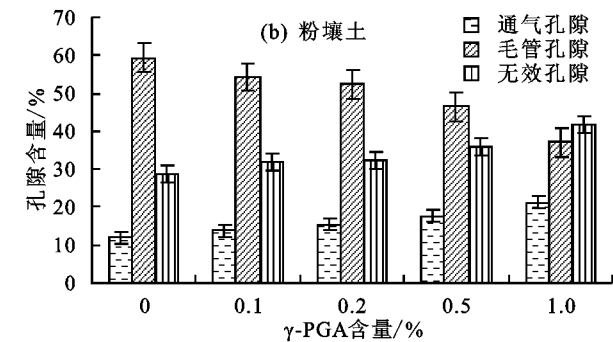


图 3 使用不同含量 γ -PGA 后土壤孔隙分布的变化

2.3 γ -PGA 对土壤水分运动参数的影响

根据一维土柱水平入渗试验数据资料验证数学模型中所述累积入渗量与湿润锋、入渗率与湿润锋倒数间关系见图 4。利用线性回归法拟合出表 3 砂壤土、粉壤土中不同 γ -PGA 含量下参数 a 、 b 值,结合

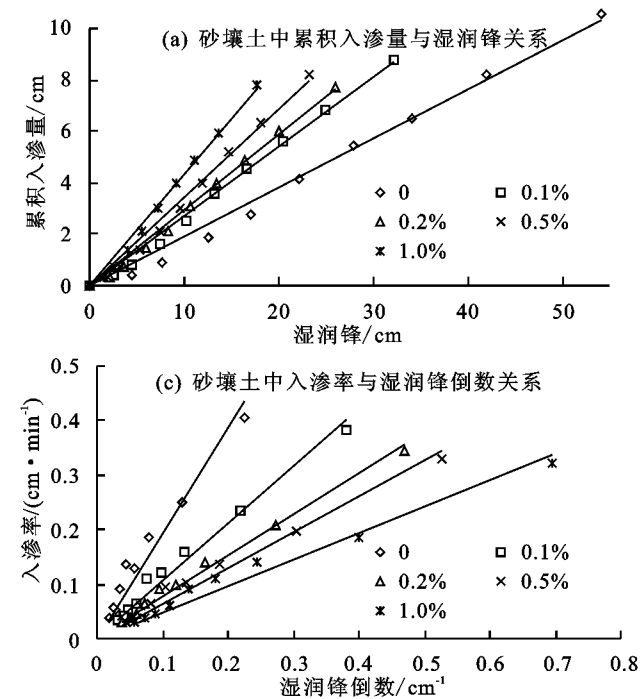


图 4 可知,砂壤土、粉壤土中不同 γ -PGA 含量下累积入渗量与湿润锋、入渗率与湿润锋倒数间线性相关,决定系数 R^2 均大于 0.94,拟合精度较高。不同土壤质地参数 a 均随 γ -PGA 含量增加而递增;反之,参数 b 逐渐减小。

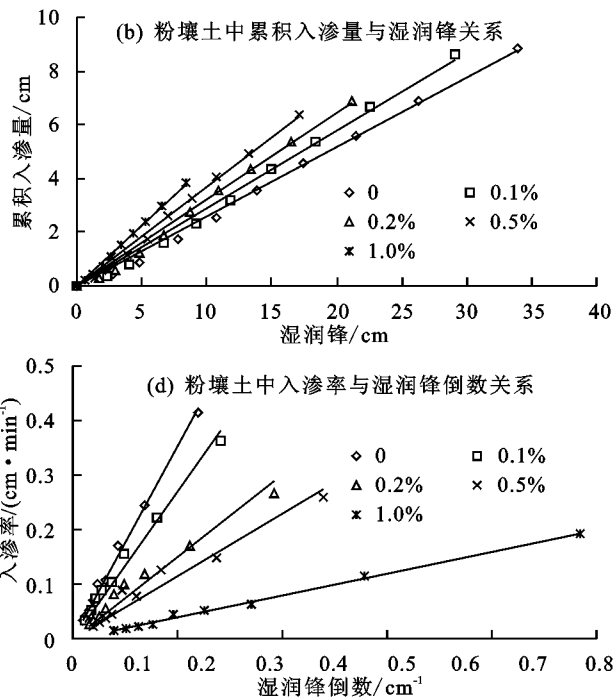


图 4 累积入渗量与湿润锋、入渗率与湿润锋倒数间线性回归拟合曲线

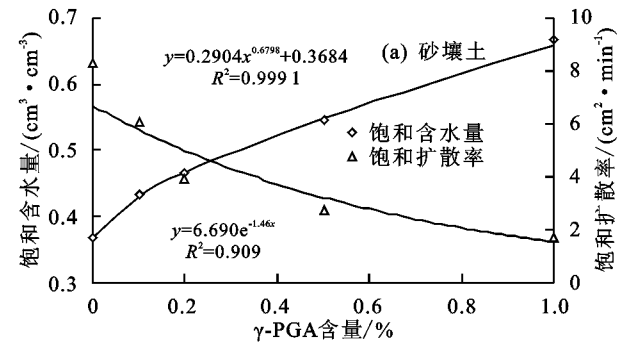
表 3 不同处理下线性回归参数

土壤质地	聚谷氨酸 含量/%	$l=aZ$		$i=b/Z$	
		a	R^2	b	R^2
砂壤土	0	0.1091	0.9895	1.9206	0.9508
	0.1	0.2705	0.9937	1.0537	0.9810
	0.2	0.2942	0.9938	0.7558	0.9896
	0.5	0.3426	0.9883	0.6576	0.9793
	1	0.4341	0.9917	0.4831	0.9739
粉壤土	0	0.2581	0.9752	1.1701	0.9936
	0.1	0.2897	0.9919	0.9031	0.9867
	0.2	0.3206	0.9910	0.4895	0.9532
	0.5	0.3689	0.9916	0.3855	0.9493
	1	0.4469	0.9760	0.1104	0.9954

利用环刀法所得饱和含水量与线性参数 a 、 b 代入公式(14)可得水平入渗法所得土壤饱和扩散率,其饱和含水量、饱和扩散率与 γ -PGA 含量关系见图 5。饱和含水量与 γ -PGA 含量呈幂函数关系,土壤中 γ -PGA 含量越高,其持水量越大;随着 γ -PGA 含量的增加,水分在土壤中饱和扩散度呈指数函数负相关,相关系数均大于显著性水平 0.05 下临界值 $r_{0.05}=0.8783$ 。

VG 模型参数与渗透仪所得饱和导水率实测值也可计算各处理下土壤饱和和扩散率(公式(8)),将其

与水平入渗法所求饱和和扩散率相比较;将水分特征曲线 VG 模型中所拟合饱和含水量与环刀法所测得饱和含水量实测值相比较(表 4)。分析不同 γ -PGA 含量下水分运动参数发现饱和导水率与饱和扩散率均与 γ -PGA 含量呈负相关关系,相同 γ -PGA 含量梯度下砂壤土饱和导水率与饱和扩散率均大于粉壤土;相反,当 γ -PGA 含量添加至 1% 时,砂壤土与粉壤土饱和含水量分别增加了 30.06%,27.12%,与 γ -PGA 含量呈正相关关系,说明粉粒含量较高的粉壤土中,土壤颗粒间表面积较大,水分吸附能力提高,所以粉壤



土持水能力较强,水分传导能力较弱。饱和含水量实测值与拟合值相比较,除粉壤土中 γ -PGA 含量为 0.2% 时两者相对误差为 11.94%,其他处理间相对误差值均小于 10%;水平吸渗法与 VG 模型所计算饱和和扩散率相比较,粉壤土中相对偏差在(-9.64%)~9.29% 内,计算较为精确,砂壤土中两计算方法间偏差较高,适用性较低。 γ -PGA 对水分运动参数的影响较为显著,其减缓了水分于土壤中的入渗, γ -PGA 的添加导致土壤中土壤颗粒对水分吸渗能力的减弱, γ -PGA 遇水后形成水凝胶增加了水分的黏滞性。

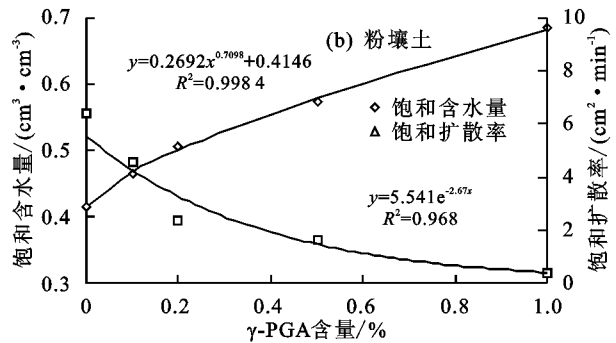


图 5 饱和含水量、饱和扩散率与 γ -PGA 含量间关系

表 4 不同计算方法下水分运动参数比较

土壤质地	聚谷氨酸 含量/%	饱和导水率/ ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	饱和含水量/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)			饱和扩散率/($\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$)		
			实测值	拟合值	相对误差/%	水平吸渗法	VG 模型计算值	相对误差/%
砂壤土	0	0.0286	0.3670	0.3556	-3.11	8.3285	7.9053	-5.08
	0.1	0.0236	0.4319	0.4523	4.72	6.0510	5.3597	-11.42
	0.2	0.0201	0.4671	0.4984	6.70	3.9533	3.9177	-0.90
	0.5	0.0145	0.5446	0.5412	-0.62	2.7769	3.5712	28.60
	1	0.0104	0.6676	0.6271	-6.07	1.7377	2.0357	17.15
粉壤土	0	0.0127	0.4142	0.4222	1.93	6.4242	5.9565	-7.28
	0.1	0.0098	0.4650	0.4861	4.54	4.5911	4.8494	5.63
	0.2	0.0071	0.5066	0.5671	11.94	2.3229	2.0989	-9.64
	0.5	0.0047	0.5741	0.5955	3.73	1.6108	1.7605	9.29
	1	0.0017	0.6854	0.6864	0.15	0.3875	0.3546	-8.48

2.4 γ -PGA 对土壤持水能力的影响

土壤水分常数标志着土壤水分处于某一形态与性质的特征值,根据上述土壤水分常数测定法得不同处理下水分常数(表 5)。经方差分析可得 γ -PGA 对调

萎系数影响无显著差异($P=0.097,0.075>0.05$),对其余土壤水分常数存在显著影响,随 γ -PGA 含量增大而递增。不同质地相同 γ -PGA 含量下砂壤土水分常数大于粉壤土值。

表 5 不同 γ -PGA 含量下土壤水分常数的差异显著性

土壤质地	聚谷氨酸 含量/%	吸湿系数/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	凋萎系数/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	最大分子持水量/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	毛管断裂含水量/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	田间持水量/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	饱和含水量/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)
砂壤土	0	0.0208±0.0021c	0.0360±0.0027b	0.0434±0.0012d	0.0920±0.0121d	0.1435±0.0128e	0.3670±0.0077d
	0.1	0.0226±0.0012c	0.0454±0.0055a	0.0554±0.0076d	0.1137±0.0101d	0.1782±0.0033d	0.4319±0.0322c
	0.2	0.0243±0.0021bc	0.0412±0.0027a	0.0746±0.0051c	0.1424±0.0062c	0.2177±0.0176c	0.4671±0.0208c
	0.5	0.0271±0.0026ab	0.0406±0.0078a	0.1155±0.0156b	0.2084±0.0168b	0.2971±0.0023b	0.5446±0.0277b
	1	0.0296±0.0019a	0.0475±0.0025a	0.2010±0.0042a	0.3056±0.0162a	0.4222±0.0255a	0.6676±0.0139a
粉壤土	0	0.0428±0.0006b	0.0729±0.0046a	0.0859±0.0111e	0.1594±0.0015d	0.2287±0.0256e	0.4142±0.0233e
	0.1	0.0451±0.0037b	0.0871±0.0098a	0.1033±0.0044d	0.1941±0.0055c	0.2767±0.0124d	0.4650±0.0151d
	0.2	0.0474±0.0016ab	0.0784±0.0096a	0.1228±0.0071c	0.2101±0.0114c	0.3250±0.0082c	0.5066±0.0072c
	0.5	0.0517±0.0024a	0.0648±0.0053b	0.1851±0.0048b	0.2866±0.0091b	0.4178±0.0058b	0.5741±0.0097b
	1	0.0525±0.0044a	0.0835±0.0049a	0.2587±0.0036a	0.3615±0.0194a	0.5278±0.0161a	0.6854±0.0051a

注:表中数据为平均值±标准误差;不同小写字母表示同一质地不同 γ -PGA 含量下土壤水分常数的差异显著性($P<0.05$)。

利用土壤水分常数按照土壤水受作用力类型及对植物有效性划分土壤水分类型,对添加 γ -PGA

后各土壤水分类型所占比例分析得出(图 6):从土壤水所受作用力划分土壤水分类型发现,当 γ -PGA 含量添加至 1% 时吸湿水所占比例略为下降。薄膜水与毛管水比例提高,薄膜水比例增长幅度较大,砂壤土与粉壤土增幅分别为 19.50%,19.68%,当 γ -PGA 含量增至 0.5% 时,毛管水所占比例随 γ -PGA 含量增加停止递增。重力水下降趋势较为显著,添加 γ -PGA 所导致的重力水比例的减少有利于土壤空气的供应,对植物的生长有利。对比不同土壤质地中土壤水分类型比例可知,粉壤土中吸湿水、薄膜水、毛

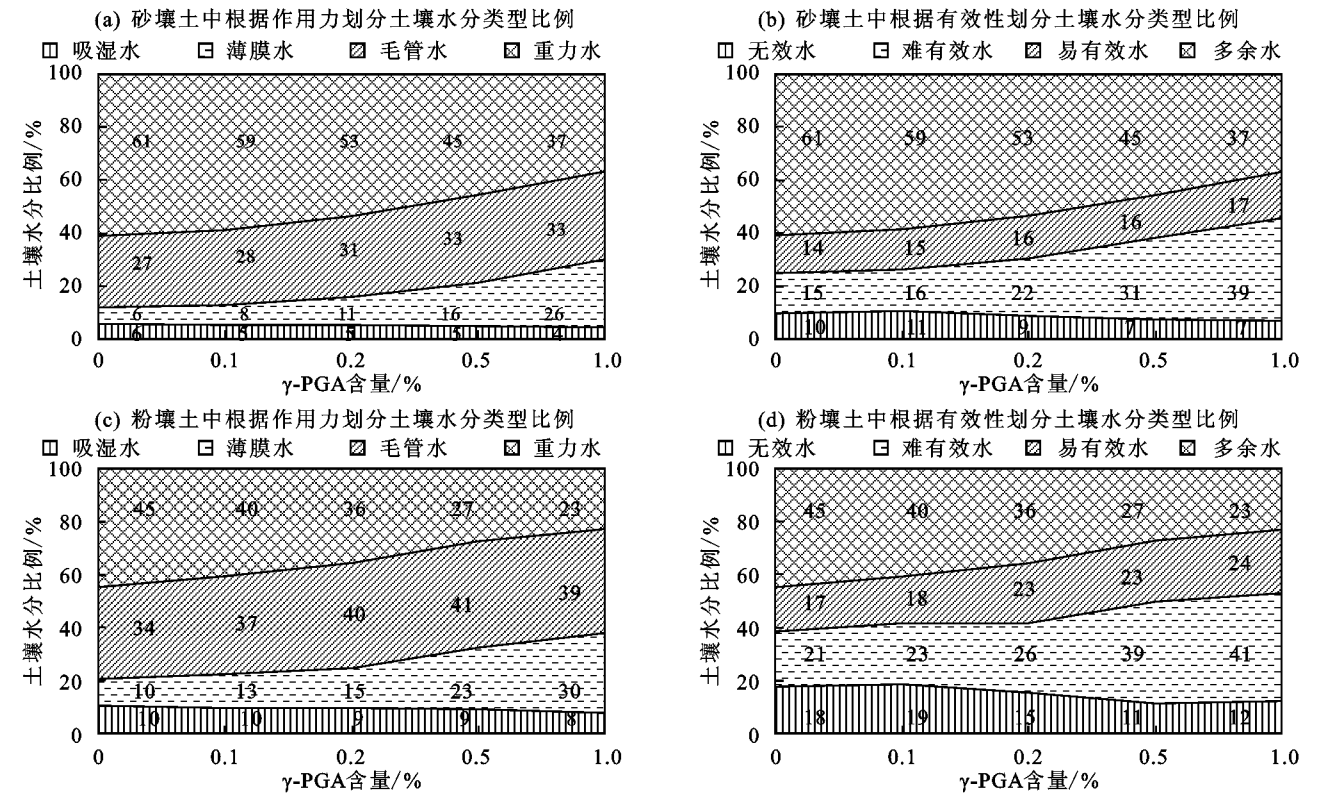


图 6 不同 γ -PGA 含量下不同土壤水分类型所占比例

3 结论

(1)添加 γ -PGA 后,土壤水分特征曲线向右偏移,各吸力段间持水容量增加。水分特征曲线 VG 模型中参数 θ_r 递增,残余含水量 θ_r 无显著变化, α 值均高于未添加 γ -PGA 处理, n 随 γ -PGA 增加递减。表明使用 γ -PGA 后增强了土壤持水能力,同等 γ -PGA 含量梯度下,粉壤土持水能力较砂壤土强。

(2)添加 γ -PGA 后,土壤容重随 γ -PGA 含量增加呈指数函数递减趋势,孔隙度递增,对粉壤土物理特性影响大于砂壤土。 γ -PGA 主要降低了毛管孔隙比例,提高无效孔隙比例,同时增加粉壤土中通气孔隙含量,对砂壤土中影响程度较低。

(3)土壤饱和含水量与 γ -PGA 含量呈幂函数递增趋势,与饱和扩散率呈指数函数递减;VG 模型中饱和含水量拟合值与实测值间相对误差较低,运用 VG 模型参数所得饱和和扩散率与水平吸渗法所得值在粉壤土中相

管水所占比例均大于砂壤土,仅重力水所含比例低于砂壤土。根据土壤水分被作物吸收的难易程度,分析 γ -PGA 对土壤水分类型所占比例可看出,添加 0.1% 含量的 γ -PGA 时无效水所占比例增长比例小于 1.2%,随 γ -PGA 含量增加无效水所占比例有所降低。难有效水比例增长速率较大。粉壤土中易有效水增长比例为 7.54%,砂壤土中仅为 3.44%。多余水下降比例转移至难、易有效水。粉壤土饱和含水量与有效水比例均大于砂壤土,表明粉壤土中作物可利用水含量大于砂壤土。

对误差值均低于 10%,砂壤土中相对偏差较高。

(4) γ -PGA 添加对凋萎系数无明显作用,其他水分特征常数随 γ -PGA 含量递增。 γ -PGA 含量提高,薄膜水比例递增趋势明显,毛管水比例在 γ -PGA 含量增至 0.5% 时停止增长,重力水比例逐步递减。根据土壤水分有效性原理得, γ -PGA 提高土壤有效水含量,降低无效水及多余水比例,粉壤土中有效水含量高于砂壤土。

参考文献:

[1] Muroga Y, Nakaya A, Inoue A, et al. Conformation of poly(γ -glutamic acid) in aqueous solution [J]. Biopolymers, 2016, 105(4): 191-198.

[2] 张文. γ -聚谷氨酸制备及其农用效果[D]. 北京:中国农业科学院,2014:1-12.

[3] Peng Z P, She Y Q, Lei C. Synthesis of poly(glutamic acid)-tyramine hydrogel by enzyme-mediated gelation for

- controlled release of proteins [J]. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 2015, 26(2): 111-127.
- [4] Pereira A S, Sandoval-herrera I E, Zavala-betancourt S A, et al. γ -Polyglutamic acid/chitosan nanoparticles for the plant growth regulator gibberellic acid: Characterization and evaluation of biological activity [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 157: 1862-1873.
- [5] 朱安婷, 蒋友武, 谢国生, 等. 外源聚 γ -谷氨酸对水稻幼苗耐旱性和渗透调节的影响[J]. *核农学报*, 2010, 24(6): 1269-1273.
- [6] Yamamoto S, Yoshida H, Ohkubo T, et al. Evaluation of environmental change in the mouth with the use of spray-type oral moisturizer containing γ -PGA [J]. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, Medicine*, 2016, 28(5): 446-449.
- [7] Xu Z Q, Peng L, Feng X H, et al. Effect of poly(γ -glutamic acid) on microbial community and Nitrogen pools of soil [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science*, 2013, 63(8): 657-668.
- [8] 郭非凡, 张秦, 孙振钧, 等. 聚丙烯酰胺对蚯蚓的毒性效应[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(增刊 1): 224-229.
- [9] 牛文全, 薛万来. 矿化度对微润灌土壤入渗特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(4): 163-172.
- [10] Gonzales D, Fan K, Sevoian M. Synthesis and swelling characterizations of a poly- γ -glutamic acid hydrogel [J]. *Journal of Polymer Science Part A Polymer Chemistry*, 2015, 34(10): 2019-2027.
- [11] 王传海, 何都良, 郑有飞, 等. 保水剂新材料 γ -聚谷氨酸的吸水性能和生物学效应的初步研究[J]. *中国农业气象*, 2004, 25(2): 20-23.
- [12] 李俊艳, 胡红青, 李荣纪, 等. 改性磷矿粉对油菜幼苗生长和土壤性质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(2): 441-446.
- [13] 孙顶国, 邹德龙, 王美华, 等. γ -聚谷氨酸在冬小麦生产中的应用及肥效研究[J]. *化肥工业*, 2014, 41(6): 74-76.
- [14] 史文娟, 梁嘉平, 陶汪海, 等. 添加 γ -聚谷氨酸减少土壤水分深层渗漏提高持水能力[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(23): 94-100.
- [15] Doran J W, Zeiss M R, Zeiss M R. Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality [J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15(1): 3-11.
- [16] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 93-95.
- [17] 龚振平. 土壤学与农作学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 66-75.
- [18] 程东娟. 土壤物理实验指导[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012: 50-51.
- [19] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 37-42.
- [20] 杨文治. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 74-75.
- [21] Genuchten M V. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(4): 892-898.
- [22] 王全九, 邵明安, 郑纪勇. 土壤中水分运动与溶质运移[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 53-55.

(上接第 216 页)

- [10] 石玉龙, 周晨霓, 邱英强, 等. 西藏色季拉山不同海拔梯度急尖长苞冷杉林土壤水源涵养功能研究[J]. *西部林业科学*, 2016, 45(4): 147-154.
- [11] 贾晓燕, 王晓江, 牛建明, 等. 赛罕乌拉国家级自然保护区不同植被类型水源涵养服务特征[J]. *干旱区研究*, 2014, 31(3): 495-501.
- [12] 苗武, 史正涛, 陈骏, 等. 松华坝水源地不同植被土壤特性及水源涵养功能[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(4): 131-134, 140.
- [13] 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.
- [14] 满苏尔·沙比提, 娜斯曼·那斯尔丁, 艾萨迪拉·玉苏甫. 天山托木尔峰国家级自然保护区生态系统服务价值评估[J]. *山地学报*, 2016, 34(5): 599-605.
- [15] 田龙. 台兰河流域水文要素变化分析及新安江模型的改进与应用研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014.
- [16] 满苏尔·沙比提, 玉苏甫·买买提, 娜斯曼·那斯尔丁. 天山托木尔峰国家级自然保护区垂直自然带景观特征分析[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(5): 1425-1431.
- [17] 孙浩, 杨民益, 余杨春, 等. 宁夏六盘山几种典型水源涵养林分结构与水文功能的关系[J]. *中国水土保持科学*, 2014, 12(1): 10-18.
- [18] 刘璐璐, 曹巍, 邵全琴. 南北盘江森林生态系统水源涵养功能评价[J]. *地理科学*, 2016, 36(4): 603-611.
- [19] 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研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 147-153.
- [20] 周祥, 赵一鹤, 张洪江, 等. 云南高原典型林分林下枯落物持水特征研究[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(2): 248-252.
- [21] 吴庆贵, 邹利娟, 吴福忠, 等. 涪江流域丘陵区不同植被类型水源涵养功能[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(6): 254-258.
- [22] 刘贤德, 张学龙, 赵维俊, 等. 祁连山西水林区亚高山灌丛水文功能的综合评价[J]. *干旱区地理*, 2016, 39(1): 86-94.
- [23] 王会京, 王红霞, 谢宇光. 太行山不同林型枯落物持水性及生态水文效应研究[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(6): 135-139.