

东北典型黑土区坡耕地涝渍地土壤持水性和导水性研究

马富亮¹, 符素华^{1,2}, 罗广惠³

(1. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所
黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 北京市一六五中学, 北京 100010)

摘要: 中国东北典型黑土区是我国重要的商品粮生产基地, 对我国粮食安全和国民经济的稳定起到举足轻重的作用。作为土壤退化的一种特殊形式, 涝渍地严重影响着垦区的农业生产。在东北典型黑土区坡面涝渍地及其周围正常耕地中布设采样点, 测定了土壤剖面质地分布情况及土壤水分特征曲线, 以揭示东北黑土区坡面涝渍地土壤水分过大的根本原因。结果表明, 涝渍地土壤剖面中细质地土壤类型所占比例为 90%, 质地较粘重。涝渍地土壤具有较高的进气值, 水吸力较大, 保持在中小孔隙中的水分只有在较大吸力范围内才能缓慢释出, 这造成涝渍地土壤具有极强的持水能力, 不容易失水, 再加上极弱的导水能力, 水分饱和但不会被释放。以上这些土壤特性导致了涝渍地土壤长期处于湿度过大的状态。本研究结果可为涝渍地治理提供依据。

关键词: 黑土; 坡耕地; 涝渍地; 土壤水分特征曲线

中图分类号: S152.7⁺1; S152.3⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)06-0222-05

Properties of Soil Water Retention and Hydraulic Conductivity in the Waterlogged Land over Slope Cropland in Typical Black Soil Region of Northeast China

MA Fuliang¹, FU Suhua^{1,2}, LUO Guanghui³

(1. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Beijing No. 165 High School, Beijing 100010, China)

Abstract: The typical black soil zone in northeast China is an important commodity grain production base in China and plays crucial roles in the national food security and economic stability. As a special form of soil degradation, waterlogged lands severely affect the agricultural production in reclamation regions. The objective of this study was to analyze the soil water retention characteristics and hydraulic conductivity of waterlogged land and try to find the cause of waterlogged land. The sampling points were set in and around the waterlogged land over the slope cropland in typical black soil region of northeast China. The soil texture distribution along the soil profiles and soil water retention characteristics were measured. The results showed that the fine soil texture accounted for 90% in the soil profile in waterlogged land. It resulted in a very adhesive soil texture. The waterlogged soil had higher air intake value and the larger water suction than the non-waterlogged soil. Therefore, the water in waterlogged soil pore could be released under the much larger water suction. In addition, the waterlogged soil has the strong water holding capacity and the weak soil hydraulic conductivity, which indicated that the water in the saturated soil can not be released and that the soil keeps high soil moisture. The above soil properties are the important reasons that the waterlogged soil remains a wet condition for a long time. These results could provide the technique supports for the control for waterlogged lands.

Keywords: black soil; slope cropland; waterlogged land; water retention characteristics

中国东北典型黑土区是我国重要的商品粮生产基地,对我国粮食安全和国民经济的稳定起到举足轻重的作用^[1]。作为土壤退化的一种特殊形式,涝渍地严重影响着垦区的农业生产。我国共有 3 207 万 hm^2 涝渍地^[2-3],仅黑龙江省黑河市嫩江县鹤山农场鹤北小流域中的涝渍地面积就占整个流域面积的 4% 左右^[4]。黑土区涝渍土壤由于湿度过大阻碍了农机耕作的连续性,严重降低了土地利用效率^[5-6]。因此,针对我国人口众多、粮食安全压力巨大的现状,研究黑土区涝渍地湿度过大的根本原因,提出和实施有效的治理措施,挖掘单位耕地面积的生产力潜力显得尤为重要。

涝渍地土壤湿度过大的原因主要包括外因(地形地貌、气候水文等)和内因(土壤质地、持水性、导水性等)^[7-11]。前人对外因的研究已相当成熟^[12-17],而对内因方面的研究相对欠缺。乔樵等和郭大本等对三江平原涝渍地的水物理性质研究发现,其土壤剖面上松下紧,表层为草根层,比重、容重小,饱和含水量、持水量大,土壤水分不易流出^[18-19]。姚章村等对三江平原涝渍地的土壤性质进行了研究,发现该区域涝渍地 90% 的表层土壤为质地粘重、透水性差的白浆土和黑黏土,母质层存在不透水的黏土层或者亚黏土层,且土壤机械组成黏粒含量较高,因而形成上层滞水、地表积水严重^[5],再加上生长季内土壤蒸发缓慢,使得水分长期保存在上层土壤中,造成土壤表层过度湿润的状况。

综上所述,前人对黑土区涝渍地的研究主要集中在地势相对低平和低洼、地下水位高且排水条件较差的三江平原,对分布于坡面、居于坡中位置的涝渍地研究较少。由于研究区域间存在较大差异,针对前人得出的结论,我们只能借鉴,不能照搬照用。并且,前人在研究涝渍地土壤性质时,大部分是针对涝渍地表层土壤性质的定性描述,而很少研究涝渍地土壤剖面质地分布的详细信息,更少从土壤水分特征曲线的角度定量分析涝渍地土壤湿度过大的原因。为此,本文在东北黑土区坡面涝渍地及其周围正常耕地中布设采样点,测定土壤剖面质地分布情况及土壤水分特征曲线,比较分析涝渍地和非涝渍地土壤剖面质地差异,定量评价涝渍地与非涝渍地土壤持水性、导水性差异,最终为阐明东北黑土区坡面涝渍地的形成机理服务。

1 材料方法

1.1 研究区概况

研究区选在黑龙江省九三农垦分局鹤山农场境内的鹤北小流域。鹤北小流域位于鹤山农场场部东北方向,地理位置为 $48^{\circ}59'3.37''-49^{\circ}02'35.7''\text{N}$, $125^{\circ}15'45.71''-125^{\circ}20'46.79''\text{E}$ 。整个流域又被 9

条支沟分为 9 个次级小流域,其中主沟道以西有 4 条支沟,由南至北将次一级小流域依次编号为 1, 2, 3, 4 号小流域;主沟道以东有 5 条支沟,由北至南依次编号为 5, 6, 7, 8, 9 号小流域(图 1)。

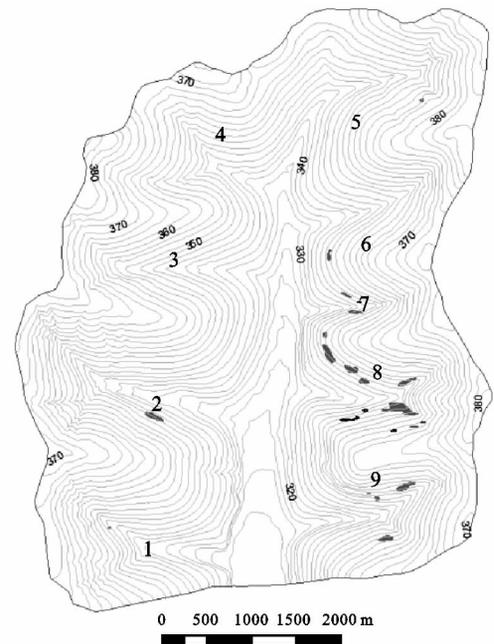


图 1 鹤北小流域

研究区所属大兴安岭南麓,海拔 150~383 m。坡岗平缓,坡长较长,被当地人称为“漫川漫岗”,属于典型黑土区。研究区为寒温带大陆性季风气候,冬夏气温相差比较悬殊。因受季风和高纬度影响,全年冷热、干湿季节划分明显,春季干燥少雨,夏秋两季湿润多雨且昼夜温差较大,冬季寒冷漫长。年平均气温 $-1.5\sim 0.4^{\circ}\text{C}$,年内温差变化大,夏季最热月份为 7 月,平均气温为 20.8°C ,冬季最冷月份为 1 月,平均气温为 -22.5°C 。年日照时间为 2 550~2 700 h,全年无霜期为 115 d 左右。年均降雨量约为 470 mm,多集中于 6—9 月。该区土壤沉积物主要为第三纪和第四纪的砂粒及黏土层,一般呈黄色或红色。主要土壤类型为黑土,在黑土开垦以前,其自然植被为草原化草甸植物。试验地选在 8 号流域,其表层土壤部分理化性状见表 1。

1.2 观测方法

1.2.1 土壤机械组成及质地 鉴于土壤水分特征曲线受土壤质地的影响,布设样点需根据研究区域的剖面土壤特性来确定。试验布置前对研究区域 2 m 内的剖面土壤特性进行了调查,根据土壤发生学理论,研究区域的剖面土壤类型自上而下可分为耕层(A层)的黑土、过渡层(AB)的黑黏土、淀积层(B)的砂质土、母质层(C)的黄黏土和砂质黏土。布设样点的剖面结构要涵盖上述所有的剖面土壤类型,即沿坡面方

向,坡上、坡中和坡下位置各布 1 个点,坡中样点位于涝渍地内,坡上坡下样点位于非涝渍地内,于每个样点的 200 cm 土壤剖面上,每 20 cm 一层用土钻采样,计 10 层,3 个样点的样品总数共计 30 个。将土壤样

品带回实验室,经处理,风干、研磨、过筛后用于测定土壤机械组成。土壤机械组成采用吸管法测定,测定方法根据土壤农业化学分析方法^[20]以及北京师范大学分析测试中心资料进行。

表 1 研究区耕层土壤部分理化性状

土层深度	砂粒 (0.05~2 mm) / %	粉粒 (0.002~0.05 mm) / %	黏粒 (<0.002 mm) / %	质地 类型	pH 值	有机质 / %
0—20 cm	20.20	37.14	42.66	黏土	5.67	5.04

利用测定的土壤机械组成的数据,通过美国农业部(United States Department of Agriculture) Soil Texture Calculator 计算得出土壤剖面每层的土壤质地类型。

1.2.2 土壤容重 土壤容重是土壤质量含水量和土壤容积含水量之间关系转换的参数。根据 1.2.1 中测定的 3 个样点不同土壤质地的具体分布深度,用体积为 100 cm³ 的环刀采集原状土壤样品,每个土壤质地类型 3 个重复,利用环刀法测定土壤容重。

1.2.3 土壤水分特征曲线 根据 1.2.1 的测定结果,将 3 个样点中同一土壤质地的土样分别取出一小部分均匀混合后磨细过筛,把土样放入水分提取器,采用压力膜仪法测定土壤水分特征曲线,分别测定土壤吸力在 0.3 bar, 0.5 bar, 1 bar, 3 bar, 5 bar, 10 bar, 15 bar 下的土壤含水量,每个吸力 6 个重复,共计 168 个样品。

1.3 RETC 软件模拟方法

采用 RETC 软件中 Van Genuchten 模型进行模拟,该模型关于土壤水分特征曲线($\theta-h$ 曲线)的函数表达式为:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|h|)^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$K(h) = \begin{cases} K_s S_e^L [1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})]^2 & h < 0 \\ K_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (4)$$

式中: θ 为体积含水量 (cm³/cm³); h 为压力水头 (cmH₂O); S_e 为饱和度,无量纲; θ_s 为饱和含水量 (cm³/cm³); θ_r 为残余含水量 (cm³/cm³); K_s 为饱和水力传导率 (cm/min); α 进气吸力 (1/cm); n, L 为形状系数,且 $n > 1$ 。

1.4 数据分析方法

应用统计软件(Excel, SPSS 等)、RETC 和 Origin 软件对测定的土壤理化性质数据进行数据处理、统计分析和图表制作。

2 结果与分析

涝渍地与非涝渍地不同土层深度的土壤质地差异明显(图 2),非涝渍地土壤剖面中存在 4 种土壤质地类型,并且较粗质地的砂壤土和砂土分布于剖面底部,所占比例较大,约为 50%~70%,而较细质地的粉粘壤和粘壤分布于剖面顶部,所占比例约为 30%~50%。与非涝渍地相比,涝渍地土壤剖面中的土壤质地类型缺少砂土,并且较粗质地的砂壤土分布于剖面最底部,所占比例仅为 10%,剖面中 90% 的质地类型属于较细质地的粉粘壤和粘壤。由此可以得知,相比非涝渍地,涝渍地土壤剖面中较细质地的粉粘壤和粘壤占主导地位,故质地更粘重。

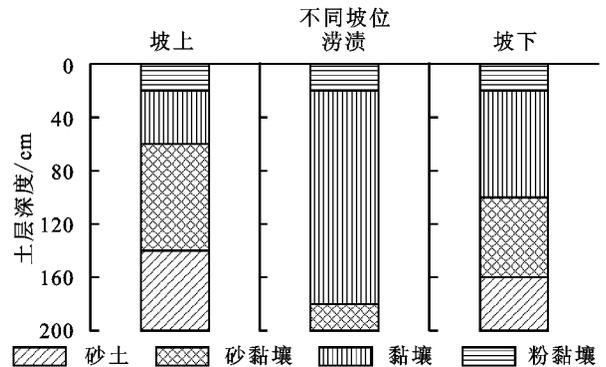


图 2 涝渍地与非涝渍土壤质地剖面分布

土壤水分特征曲线是土壤质地、结构和孔隙等物理性质综合作用的结果,是土壤物理特性的表征^[21,22]。4 种质地的土壤水分特征曲线基本变化趋势均是随含水量的减小,土壤基质势下降(图 3)。在低吸力段($<4\ 000$ cmH₂O),水分特征曲线变化陡直,即吸力稍微增加或减少,均会引起含水量较大的变化;在中高吸力段($>4\ 000$ cmH₂O),曲线变化平缓,即吸力有较大的变化,相应含水量变化不大。这种变化趋势以砂土的最明显,这是因为在低吸力范围内,主要是毛管力起作用,土壤所能保持和释放出的水量取决于土壤中较大孔隙分布,在 4 种质地的土壤中砂土含有大孔隙量最多,因此,在低吸力段砂土水分特征曲线变化的最陡直;在中高吸力段主要是土壤颗粒的表面起吸附作用,主要取决于土壤质地。这与

赵雅琼等^[21]、Yang 等^[23]和高惠嫣和杨路华^[24]的研究结果基本一致,即质地越细,土壤的持水能力越强、不容易失水,质地越粗,土壤的持水能力越弱、很容易失水。结合图 2 可以得出,与非涝渍地相比,由于涝渍地土壤剖面质地更加粘重,所以涝渍地土壤的持水能力更强,更不容易失水。

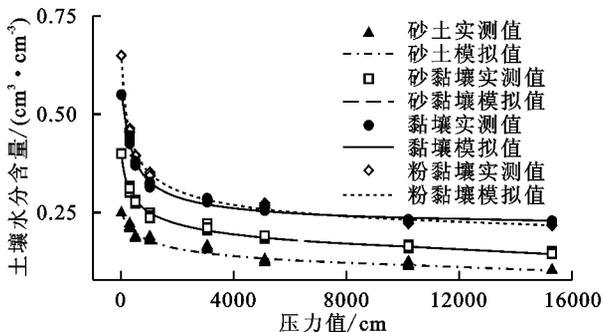


图 3 不同质地土壤水分特征曲线

表 2 RETC 软件对土壤水利参数模拟结果

质地	θ_r	θ_s	α	n	$K_s /$ ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)	L
粉黏壤	0.1323	0.658	1.243	1.3439	15.96	0.5
黏壤	0.1019	0.552	0.567	1.5692	5.53	0.5
砂黏壤	0.0613	0.406	1.263	1.8168	9.69	0.5
砂壤	0.0504	0.250	1.517	1.9118	109.35	0.5

饱和含水率 θ_s 为土壤水吸力等于 0 时的含水率,拟合得到的粉壤土、黏壤土、砂壤土和砂土的饱和含水率分别为 0.658,0.552,0.406,0.250(表 2)。残余含水率 θ_r 为土壤水分特征曲线导数等于 0 时的土壤含水率。一般情况下残余含水率大于零,粉壤土、黏壤土、砂壤土和砂土的残余含水率分别为:0.132,0.102,0.061,0.050(表 2)。饱和含水量和残余含水量的差值越大代表该质地类型的土壤持水能力越强^[25]。粉壤土、黏壤土、砂壤土和砂土 4 种土壤质地各自的饱和含水量和残余含水量的差值分别为 0.526,0.450,0.345,0.200。所以,4 种质地土壤持水能力大小顺序依次为:粉壤土>黏壤土>砂壤土>砂土,故涝渍地土壤的持水能力大于非涝渍土壤。

参数 n 的大小决定着土壤水分特征曲线的坡度,当 n 大时,曲线较陡;当 n 小时,曲线较缓。 n 取值一般为 1.1~3.5,当 $m=1 \sim 1/n$ 时, $n > 1$ ^[26]。粉壤土、黏壤土、砂壤土和砂土的 n 值分别为 1.343 9,1.569 2,1.816 8,1.911 8(表 2),所以砂土的水分特征曲线坡度最陡,其次是砂壤土,粉壤土最缓,并且,一般重质黏性土壤 n 值较小,轻质土壤 n 值较大。参数 α 是进气值 $h\alpha$ 的倒数。不同质地的土壤进气值不同,一般重质黏性土壤进气值较大,轻质土或结构良好的土壤进气值较小,或没有明显的进气值^[25]。所

以,粘壤的 α 值最小,进气值最大,砂土的 α 值最大,进气值最小。以上这些事实都说明,涝渍地土壤的持水性大于非涝渍土壤。

导水率是反映土壤导水性的指标,主要受土壤质地的影响。粉壤土、黏壤土、砂壤土和砂土的饱和导水率差异较大,砂土的饱和导水率分别是粉壤土、黏壤土、砂壤土的 6.85,19.77,11.28 倍。土壤处于非饱和状态时,导水率与土壤含水量呈非线性关系(图 4),且粉壤土、黏壤土、砂壤土和砂土的非饱和导水率随水分变化差异较大,砂土的导水率随水分变化的曲线较陡直,其他质地的曲线较缓,当水分增大时,砂土迅速达到饱和状态,此时砂土的导水率值即为饱和导水率,而粉壤土、黏壤土、砂壤土还未达到饱和状态,导水率值即为对应水分下的非饱和导水率。也就是说,不管是饱和状态还是非饱和状态,质地越粗导水性越强,质地越细,导水性越差。所以,相比非涝渍地,涝渍地土壤的导水性更差。

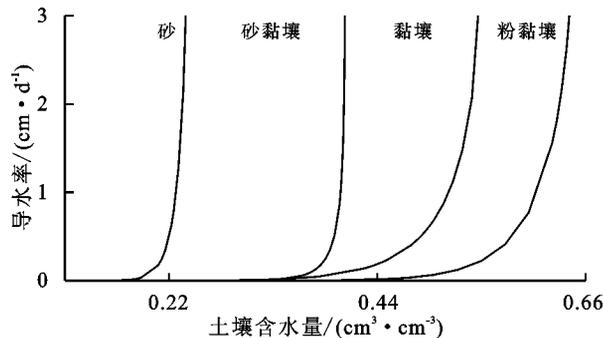


图 4 不同质地土壤导水率随水分变化

3 结论

涝渍地土壤剖面中细质地土壤类型所占比例为 90%,质地较粘重。涝渍地土壤具有较高的进气值,水吸力较大,持水能力极强,导水能力极弱,这些土壤特性最终导致了涝渍地土壤长期处于湿度过大的状态。本研究结果对于涝渍地改良具有重要意义。

参考文献:

[1] 陆继龙. 我国黑土的退化问题及可持续农业[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 53-55.
 [2] 魏水霞, 康百赢, 刘学金. 黑龙江垦区渍涝治理途径探索[J]. 水利科技与经济, 2005, 3(2): 83-85.
 [3] 朱建强, 黄智敏, 臧波, 等. 江汉平原的涝渍地及其开发利用[J]. 湖北农学院学报, 2005, 24(4): 248-252.
 [4] 秦续娟. 东北北部黑土坡耕地涝渍成因研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2006.
 [5] 姚章村, 刘宗建. 三江平原渍涝分类和不同治理阶段研讨[J]. 现代化农业, 1993(4): 004.
 [6] 刘兵, 朱广石, 王平, 等. 东北农田涝渍成因和治理研究

- 概况[J]. 广东农业科学, 2010(11):276-278.
- [7] 郎惠卿, 祖文辰, 金树仁. 中国沼泽[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1983.
- [8] McFarlane D J, George R J, Farrington P. Changes in the Hydrologic Cycle[M]// Hobbs R J, Saunders D A. Reintegrating Fragmented Landscapes. New York: Springer, 1993.
- [9] Cox J W, McFarlane D J. The causes of waterlogging in shallow soils and their drainage in southwestern Australia[J]. Journal of Hydrology, 1995, 167(1/4):175-194.
- [10] 孙广友. 沼泽湿地的形成演化[J]. 国土与自然资源研究, 1998(4):33-35.
- [11] Hatton T J, Nulsen R A. Towards achieving functional ecosystem mimicry with respect to water cycling in southern Australian agriculture[J]. Agroforestry Systems, 1999, 45(1/3):203-214.
- [12] 牛焕光, 宋海远. 三江平原地区沼泽成因及泥炭分布规律[J]. 地理科学, 1990, 10(3):246-256.
- [13] 田守成, 王于洋. 黑龙江省涝渍灾害分析[J]. 东北水利水电, 1996(7):32-35.
- [14] 吕宪国. 湿地科学研究进展及研究方向[J]. 中国科学院院刊, 2002(3):170-172.
- [15] 李红艳, 刘庆华, 魏永霞. 三江平原涝渍灾害成因及治理过程的思考[J]. 水利科技与经济, 2003, 9(3):218-219.
- [16] 黄丽, 何平, 孙群晶. 2004年与历年三江平原成灾雨型分析[J]. 黑龙江水专学报, 2005, 32(1):1-3.
- [17] 朱建强. 易涝易渍农田排水应用基础研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [18] 乔樵, 沈善敏. 周绍权东北北部黑土水分状况之研究. I: 黑土水分状况的基本特征及其与成土过程的关系[J]. 土壤学报, 1963, 11(2):143-158.
- [19] 郭大本, 王清. 三江平原沼泽湿地开垦前后下垫面水理性质变化研究[J]. 黑龙江水专学报, 1995, 02(1):1-8, 18.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [21] 赵雅琼, 王周锋, 王文科, 等. 不同粒径下土壤水分特征曲线的测定与拟合模型的研究[J]. 中国科技论文, 2015(3):287-290.
- [22] 伊盼盼, 牛圣宽, 韦昌富. 干密度和初始含水率对非饱和和重塑粉土土水特征曲线的影响[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(1):42-46.
- [23] Yang C, Sheng D, Carter J P. Effect of hydraulic hysteresis on seepage analysis for unsaturated soils[J]. Comput. Geotech, 2012, 41:36-56.
- [24] 高惠嫣, 杨路华. 不同质地土壤的水分特征曲线参数分析[J]. 河北农业大学学报, 2012, 35(5):129-132.
- [25] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [26] 史海滨, 田军仓, 刘庆华. 灌溉排水工程学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006:16-17.

~~~~~

(上接第221页)

- [6] 张祎, 李鹏, 刘晓君, 等. 黄土丘陵区不同植被类型枯落物持水效能研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5):100-105.
- [7] 鲁绍伟, 陈波, 潘青华, 等. 北京山地不同密度侧柏人工林枯落物及土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1):224-229.
- [8] 张宁, 郭宾良, 张楠, 等. 滦河典型林分枯落物层与土壤层的水文效应[J]. 水土保持通报, 2015, 35(3):43-48.
- [9] 陈波, 杨新兵, 赵心苗, 等. 冀北山地6种天然纯林枯落物及土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2):196-202.
- [10] 徐娟, 余新晓, 席彩云. 北京十三陵不同林分枯落物层和土壤层水文效应研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3):189-193.
- [11] 王海东, 李明桂, 张丽玮, 等. 冀北山地油松林枯落物的持水特性研究[J]. 河北林果研究, 2014, 29(3):263-266.
- [12] 常月梅, 王春风, 启东, 等. 滦河上游水源涵养林枯落物层水文效应研究[J]. 河北林果研究, 2014, 29(4):359-363.
- [13] 郭成久, 孙景刚, 苏芳莉, 等. 土壤容重对草甸土坡面养分流失特征的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6):27-30.
- [14] 田大伦, 陈书军. 樟树人工林土壤水文—物理性质特征分析[J]. 中南林学院学报, 2005, 25(4):1-6.
- [15] 郭砾, 夏北成, 倪国祥. 不同森林类型的土壤持水能力及其环境效应研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2005, 44(S):327-330.
- [16] 吴强, 楚聪颖, 张鹏, 等. 滦河上游7种典型林分类型水土保持功能[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5):40-44.
- [17] 张社奇, 王国栋, 时新玲, 等. 黄土高原油松人工林地土壤水分物理性质研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1):60-64.