

# 黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分物理性质研究

易 扬, 信忠保, 覃云斌, 肖玉玲, 赵 瑞

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

**摘 要:**在黄土高原丘陵沟壑区第三副区典型流域选取林地、耕地、果园、撂荒地和草地 5 种土地利用方式, 进行土壤水分物理性质的对比研究。结果表明: 林地、耕地和撂荒地的土壤含水量显著大于果园和草地。耕地和果园的饱和持水量显著大于草地。各土地利用类型下土壤水分物理因子基本具有一致性, 其变异系数均属于中等变异。水平方向上各个土壤水分物理性质较为均一, 土壤饱和导水率和土壤含水量平均为 0.84 mm/min 和 19.18%, 土壤容重平均为 1.34 g/cm<sup>3</sup>, 但毛管孔隙度均在 10% 以下, 表层土壤通气透水性较差。近年来虽大面积新修梯田、发展经济林, 表土水分物理性质得到改良, 但从整体性能上来看, 还是较差, 今后需进一步改善土壤环境。

**关键词:**黄土高原; 土地利用; 水分物理性质; 饱和导水率

**中图分类号:** S152.7; S151.9<sup>+</sup>2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2013)05-0045-05

## Study on Physical Characteristics of Soil Water in Different Land Uses in Loess Hilly Region

YI Yang, XIN Zhong-bao, QIN Yun-bin, XIAO Yu-ling, ZHAO Rui

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** This paper selected six kinds of land uses (woodland, farmland, orchards, abandoned land, grass, road) in typical watershed of the third sub-region on the Loess Plateau to make a comparative study on the physical properties of surface soil moisture. The results demonstrated that the levels of soil moisture in woodland, farmland and abandoned land were significantly greater than those in the orchard and grassland, and the saturation moisture capacities of farmland and orchard were significantly greater than that in the grassland. Physical factors of soil moisture under different land use types were basic coordination. The coefficient of variation was the moderate variability. It indicated physical properties of the surface soil moisture were uniform in the horizontal direction. The average saturated hydraulic conductivity and soil water content were 0.84 mm/min and 19.18%, respectively. The average soil bulk density was 1.34 g/cm<sup>3</sup>. Capillary porosity in all of the land use types was below 10%, indicating the surface soil aeration performance of permeability was poor. Although a large area of new terracing and development of economic forest improved topsoil moisture physical properties in recent years, the overall performance was still poor. It will need to further improve the soil environment.

**Key words:** Loess Plateau; land uses; physical characteristics of soil water; saturated hydraulic conductivity

土壤水分物理性质是土壤的物理性质和与其相适应的土壤中水分动态的特征, 反映了土壤的结构状况、养分状况、持水性能、保水能力及渗透能力, 是评价土壤质量的重要指标, 也是研究土壤水分传输的前提和基础<sup>[1]</sup>。良好的土壤水分物理性质对涵养水源、保持水土、增强土壤抗蚀、抗冲性能有重要的意义<sup>[2]</sup>。

土地利用方式是影响土壤水分物理特性的重要因素。不同的土地利用方式下, 土壤水分物理性质有所差异, 特别是受人为干扰较大时, 土壤水分物理性质差异更为明显<sup>[3-4]</sup>。目前国内关于不同土地利用下的土壤水分物理性质已有较多报道<sup>[5-6]</sup>。黄土丘陵区近 10 a 来, 生态建设力度大, 经历了剧烈的土地利用变

收稿日期: 2013-03-08

修回日期: 2013-05-02

资助项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41001362); 水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室开放课题基金资助项目(201301)

作者简介: 易扬(1990—), 女, 贵州贵阳人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: shuibaoqiyang@163.com

通信作者: 信忠保(1978—), 男, 山东临沂人, 副教授, 主要从事生态水文学研究。E-mail: xinzhongbao@126.com

化,不同土地利用方式作用下,其土壤水文物理参数和生态水文特性受到了影响,土地资源利用方式也呈现多种结构,但目前缺乏系统认识。充分认识不同土地利用方式下土壤水分物理特性的差异,是合理利用土地资源、改进土地利用方式、发展持续农业的前提<sup>[7]</sup>。

土壤水分物理因子包括土壤含水量、饱和导水率、各种持水量、土壤容重和孔隙度等,这些因子的空间变化会对区域土壤的水分、养分等特性产生重要影响<sup>[8]</sup>。同时,它们也是评价生态工程效果的重要依据和开展各种生态、水文研究与规划的基础。本文在充分考虑流域地形地貌和各土地利用比例分布的基础上,选取适当样地,以流域内 5 种地类作为研究对象,通过实测分析不同地类的土壤水分物理特性,揭示流域表土水分物理特性差异及其内在联系。以期为该水土流失的综合治理、区域土地结构调整及土地的持续利用提供理论依据,更可为深入研究流域水循环和生态植被建设提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

甘肃省天水市北部的罗玉沟流域(105°30′—105°45′E,34°34′—34°40′N),属黄河中游黄土丘陵沟壑区第三副区,是渭河的二级支流<sup>[9]</sup>。该流域 1983 年被黄河水利委员会列为试点小流域,是黄河水利委员会天水水土保持科学试验站的主要观测流域。流域面积 72.79 km<sup>2</sup>,呈狭长形,羽状沟系,平均宽度 3.37 km,主沟长 21.63 km,海拔 1 165~1 895 m。罗玉沟地貌属于黄土梁状地貌,沟深坡陡,平均坡度为 19°<sup>[10]</sup>。流域属于典型的大陆性季风气候,年平均降水量 531.1 mm,年平均气温 10.7℃。由于受季风影响,降水的季节分配很不均匀,冬春干旱少雨,秋夏降水集中,虽具有水热同季的特点,有利于农作物的生长,但因各月降水的年际变率大,容易发生旱、涝现象,且夏秋多局地性高强度大雨或暴雨,常导致严重的水土流失,侵蚀模数高达 3 000~8 000 t/(km<sup>2</sup>·a),给农业生产带来灾害。流域内共 5 个乡 43 个自然村,以传统农业为主,近年来大面积栽种樱桃、苹果和梨树,发展果园采摘业<sup>[11]</sup>。

### 1.2 调查方法

根据土地利用、地形和土壤等特性,采用全面覆盖、突出重点的原则,参考 2008 年 SPOT 遥感影像数据,于 2012 年在甘肃天水罗玉沟选取具有代表性样点 101 个,分别为林地(28 个)、耕地(38 个)、果园(17 个)、草地(8 个)、撂荒地(10 个)。采样利用 GPS

定位导航寻找设定样地,记录其经纬度、高程,土地利用方式等信息,得到采样点空间分布图(图 1)。每块样地采集 3 个环刀土样及对应铝盒土样。为防止野外土样蒸发,影响土壤水分测量精度,野外用便携电子秤(精确到 0.01)测定铝盒土样重,采样及测定均于一个月内完成。

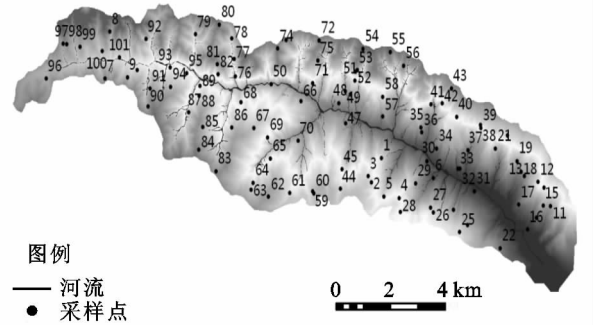


图 1 罗玉沟采样点空间分布

### 1.3 土壤物理性质测定

用环刀法测定总孔隙度、毛管孔隙度和饱和导水率,用烘干法测得土壤容重和土壤含水量,取 3 次实测数据平均值作为实验结果。

土壤各种持水量指标采用以下公式:

$$W_t = 10000 P_t h \quad (1)$$

$$W_o = 10000 P_o h \quad (2)$$

$$W_c = 10000 P_c h \quad (3)$$

式中: $W_t$ ——土壤饱和持水量(t/hm<sup>2</sup>); $W_o$ ——土壤贮水能力(t/hm<sup>2</sup>); $W_c$ ——毛管持水量(t/hm<sup>2</sup>); $h$ ——土层厚度(m),文中均为 5 cm; $P_t$ ——土壤总孔隙度(%); $P_o$ ——土壤非毛管孔隙度(%); $P_c$ ——土壤毛管孔隙度。

### 1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 整理数据后,利用 SPSS 14.0 软件对各因子进行相关性和单因素方差(one-way ANOVA)分析,并采用变异系数来量化土壤水分物理性质的空间变异程度。变异系数 CV 可定义为:

$$CV = S/\bar{X}$$

式中: $S$ ——标准偏差; $\bar{X}$ ——均值。根据变异程度分级, $CV \leq 0.1$  属于弱变异性, $0.1 < CV < 1$  属于中等变异性, $CV \geq 1$  属于强变异性<sup>[12]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 基本概况

罗玉沟流域表土土壤含水量平均为 19.18%。土壤毛管持水量、土壤贮水能力和饱和持水量平均为 220.1, 12.5, 231.8 t/hm<sup>2</sup>。饱和导水率平均为 0.84

mm/min,总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度平均为 46.35%,44.01%,2.50%,表层土壤容重介于 1.29~1.62 g/cm<sup>3</sup>,平均为 1.34 g/cm<sup>3</sup>(表 1)。使用变异系数量化 118 个土壤水分物理性质水平分布的变化程度,表现为饱和导水率(0.78)>非毛管孔隙度

(0.63)=土壤贮水能力(0.63)>土壤含水量(0.20)>土壤饱和持水量(0.12)=总孔隙度(0.12)>毛管孔隙度(0.11)=毛管持水量(0.11)=土壤容重(0.11)。都属于中等变异,表明研究区水平表土水分物理性质总体变异并不大,土壤质地较为均一。

表 1 不同土地利用下的土壤水分物理特性

项目	土壤含水量/%	土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	饱和导水率/(mm·min <sup>-1</sup> )	毛管孔隙度/%	总孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	毛管持水量/(t·hm <sup>-2</sup> )	土壤贮水能力/(t·hm <sup>-2</sup> )	土壤饱和持水量/(t·hm <sup>-2</sup> )	毛管/饱和持水量
林地	20.68a	1.38abc	0.54b	41.68a	44.26ab	2.58a	208.4bc	12.9a	221.3ab	0.94
果园	16.07c	1.32bc	0.83ab	46.20a	48.31a	2.11a	231.0a	10.6a	241.6a	0.96
草地	17.02c	1.44a	0.52b	40.65a	42.17b	1.53a	203.2cd	7.6a	210.9bc	0.96
耕地	19.51ab	1.29c	1.07a	45.39a	48.17a	2.78a	227.0ab	13.9a	240.9a	0.94
撂荒地	19.21ab	1.41ab	0.82ab	43.58a	45.76ab	2.18a	217.9abc	10.9a	228.8ab	0.96
均值	19.18	1.34	0.84	44.01	46.35	2.50	220.1	12.5	231.8	—
最大值	29.98	1.62	2.15	58.59	60.03	7.92	293.0	39.6	300.2	—
最小值	10.88	1.29	0.02	29.26	30.00	0.45	146.3	2.3	150.0	—
SD	3.75	0.13	0.66	4.92	5.64	1.57	24.6	7.8	28.2	—
CV	0.20	0.11	0.78	0.11	0.12	0.63	0.11	0.63	0.12	—

注:同列不同小写字母表示差异在 0.05 水平显著;SD 为标准差;CV 为变异系数。

2.2 不同土地利用类型土壤含水量

土壤含水量是表征土壤水分状况的一个指标,是重要的土壤肥力要素<sup>[13]</sup>。研究区不同土地利用方式下土壤表层含水量如图 2a 所示。罗玉沟的林地多分布在梁顶或沟底,主要以刺槐为主,冠幅郁闭度高,林间气温较低,能阻挡部分土壤水分蒸发流失,较其它土地利用方式而言,土壤含水量最高,平均为 20.68%。耕地(19.51%)和撂荒地(19.21%)表土根系发达,与有林地的含水量较为接近,相差均在 1.5%以内。这说明林地、撂荒地和耕地土壤蓄积水源功能强,上层土壤保持了较高的水分,可较好地维系植被根系利用。草地(17.02%)与撂荒地(19.21%)植被类型及覆盖度相差不大,但草地含水量却低于撂荒地,虽然空间异质性对土壤含水量有一定影响,研究区内草地多分布于地势陡峭的山梁地区阴坡面,水分物理性质一定程度上受到地形和气候等因素的影响,但撂荒地也多分布在山梁等人类不方便耕种的地方,草地与撂荒地平均海拔相差在 50 m 以内,所以其含水量之间的差异主要取决于不同的土地利用方式,撂荒地趋于耕地向草地演替的阶段,且普遍撂荒年限不长,表层土壤质地较疏松,含水量接近耕地,而草地表土质地粘重,比撂荒地下降了 11.4%。果园(16.07%)土地裸露部分较多,表层土壤水分易蒸腾,且日常管理践踏对其表土造成了一定影响。经检验,林地、耕地和撂荒地之间无显著性差异,果园和草地之间无显著性差异,但含水量较高的前三种土地利用类型和含水量较低的后两种土地利用类型之间存在

显著性差异( $P<0.05$ ,表 1)。可见,不同土地利用方式对土壤含水量有较大的影响,耕地和果园同样作为农用地,含水量却存在显著差异,耕地大部分属于水平梯田,具有良好的蓄水保土、截流水源能力,而果园植被单一,果树生长快,需要的养分多,果树下植物稀少,凋落物量小,出现部分红黏土分布,地表有机质积累少,造成上层土壤出现板结现象,对其含水量造成一定影响。

2.3 不同土地利用类型土壤持水特性

土壤持水特性是用来评价不同森林类型林地土壤涵养水源及调节水分循环的一个重要指标<sup>[14]</sup>。流域内果园(231.0 t/hm<sup>2</sup>)、耕地(227.0 t/hm<sup>2</sup>)的表层土壤毛管持水量显著大于草地(203.2 t/hm<sup>2</sup>),见图 2b。研究区毛管持水量与饱和持水量表现具有一致性,究其原因,是由于流域各地类贮水能力较小,所以饱和持水量主要取决于毛管持水量。草地的土壤饱和持水量最低,为 210.9 t/hm<sup>2</sup>,与耕地(240.9 t/hm<sup>2</sup>)和果园(241.6 t/hm<sup>2</sup>)的土壤饱和持水量存在显著性差异。果园与林地、果园与草地两两之间毛管持水量呈显著性差异( $P<0.05$ ,表 1),表明草地与果园之间的水源涵养与调节能力差异明显。经检验,不同土地利用类型下土壤贮水能力不存在显著性差异,主要原因是土壤这种由非毛管孔隙充水来体现的贮水,只是土壤水分达到饱和时的瞬时水量,受重力作用的影响,会不断向土壤深层渗透,因而这种贮水能力实际上是暂时的。毛管持水量/土壤饱和持水量的比值是

衡量土壤水分供应状况的重要指标,其比值与土壤供水能力成反比,与土壤保水能力成正比<sup>[15]</sup>。流域表土此比值表现为耕地和林地最低,说明它们的土壤供水能力较好,而草地、果园和撂荒地最大,则说明它们的保水能力较好。

2.4 不同土地利用类型饱和导水率

土壤饱和导水率是计算土壤剖面中水的通量和设计灌溉、排水系统工程的一个重要土壤参数<sup>[16]</sup>。研究区耕地的饱和导水率最大为 1.07 mm/min,施肥和翻种改善了耕地土壤的物理性状,减小了土壤密度、增加了土壤孔隙度,而孔隙度的增加不仅有利于水分纵向渗透,而且有利于水分横向渗透,缩短了土壤水分的渗透时间。撂荒地果园的饱导水率相差不大,分别为 0.82 mm/min 和 0.83 mm/min,撂荒地属于

由耕地向草地演化的过程,而果园属于退耕还经济林,它们的饱和导水率介于林草地与耕地之间,逐渐接近于林草地,这说明退耕还林工程改变了土地利用类型,从而影响了表土的导水性能。林地和草地饱和导水率分别为 0.54 mm/min 和 0.52 mm/min。不同土地利用类型下的土壤饱和导水率大小依次表现为耕地>果园>撂荒地>林地>草地(图 2c)。草地(林地)、耕地之间的饱和导水率呈显著性差异( $P<0.05$ ,表 1),其中林地和草地为自然植被景观,耕地受人为影响严重,它们之间的显著差异,说明在空间变异较小的小尺度流域内,人为干扰下的土地利用对土壤饱和导水率有显著影响。与其他黄土高原相关研究比较,流域总体饱和导水率普遍偏低<sup>[17]</sup>,表层土壤通气导水性能不佳,不能有效地延缓地表径流的发生。

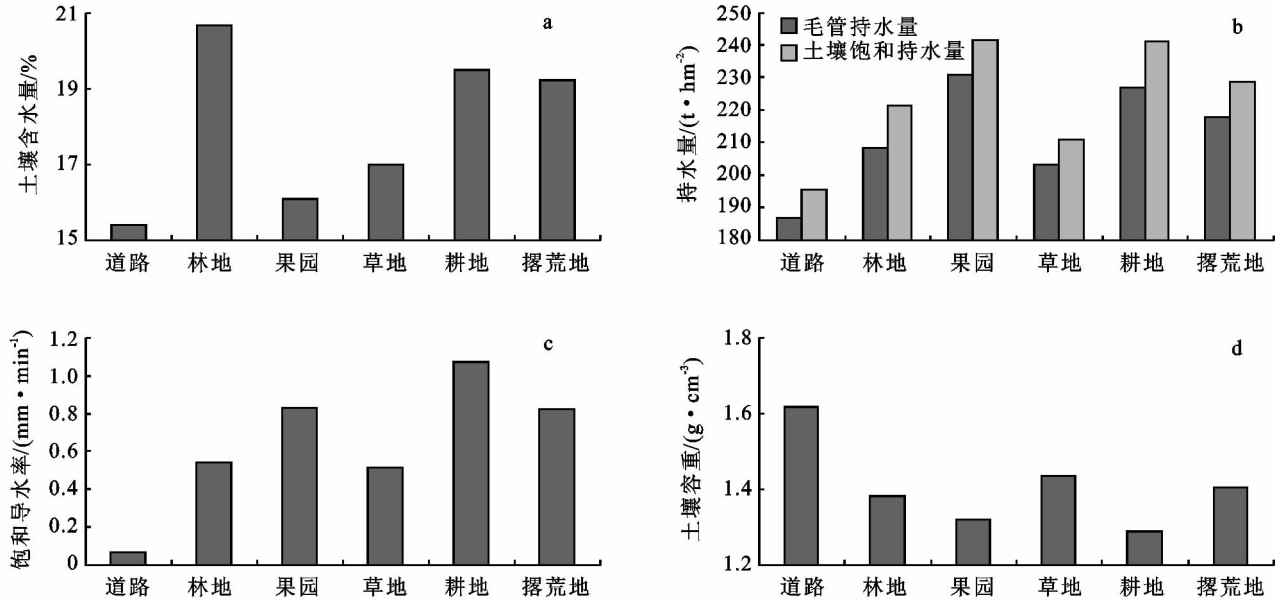


图 2 研究区表土水分物理性质

2.5 不同土地利用类型土壤容重与孔隙度

土壤容重是指单位原状土壤体积内干土的重量。容重能综合反映土壤结构、松紧度、孔隙度和土内生物的活动<sup>[18]</sup>。研究区耕地多属于水平梯田,果园在水平阶上,土壤疏松,容重较小分别为 1.29 g/cm<sup>3</sup> 和 1.32 g/cm<sup>3</sup>,水分的保持和渗透能力较强,利于植被生长。林地容重为 1.38 g/cm<sup>3</sup>,介于耕地与草地之间。其中,林地、撂荒地、草地与果园、耕地之间存在显著性差异( $P<0.01$ ,表 1)。草地容重最大为 1.44 g/cm<sup>3</sup>,总孔隙度为 42.17%,流域的不同土壤物理性质基本表现为容重越大(图 2d),总孔隙度越小(图 2b)。在这几种土地利用方式中耕地和果园总孔隙度大于其它土地利用类型,果园平均为 48.31%,耕地平均为 48.17%。与果园相比较,撂荒地、林地和草地总孔隙度分别减少 9.2%,2.6%,6.1%。

2.6 土壤水分物理性质的关系

土壤水分物理性质作为评定土壤性质的指标之一,其相关性至关重要。经检验( $P<0.01$ ,表 2),饱和导水率与容重呈显著负相关关系,相关系数为 -0.80,因为土壤容重越大,土体越密实,孔隙度越小,渗水越慢。饱和导水率与毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度均成显著正相关,与土壤含水量关系并不显著,因为当达到饱和导水率时,测定的土壤含水量已经饱和,消除了土壤含水量对入渗速率的影响。土壤饱和持水量和毛管持水量直接反映了土壤的通气透水性,两者均与饱和导水率相关性较高,其中土壤饱和持水量与饱和导水率相关系数为 0.68。容重与土壤饱和持水量相关性系数为 -0.86,土壤容重决定了土壤的紧实程度和透水能力。土壤总孔隙、毛管孔隙与容重呈显著负相关,直接决定于土壤容

重,张希彪等研究表明非毛管孔隙也决定于容重,而罗玉沟内非毛管孔隙与容重相关性不高,这可能由于研究区内土壤空气不足,非毛管孔隙普遍较小引起

的<sup>[19]</sup>。大部分土壤水分物理因子相关性密切,作为土壤物理水分特性相应评价的指标具有可行性和协同性。

表 2 各因子相关性

指标	容重	饱和 导水率	毛管 孔隙度	总孔隙度	非毛管 孔隙度	含水量	毛管持 水量	土壤贮 水量	土壤饱和持 水量
容重	1								
饱和导水率	-0.80**	1							
毛管孔隙	-0.79**	0.57**	1						
总孔隙	-0.86**	0.68**	0.93**	1					
非毛管孔隙	-0.36**	0.40**	0.15	0.41**	1				
含水量	-0.23*	-0.01	0.25**	0.21**	0.02**	1			
毛管持水量	-0.79**	0.55**	1.00	0.93**	0.14	0.24**	1		
土壤贮水量	-0.37**	0.40**	0.14	0.42**	1.00	0.02	0.15	1	
土壤饱和持水量	-0.86**	0.68**	0.93**	1.00	0.41**	0.20*	0.93**	0.41**	1

注:\*.在 0.05 水平(双侧)上显著相关;\* \*.在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

3 结 论

(1) 流域平均容重、饱和导水率、土壤含水量、土壤饱和持水量和总孔隙度分别为 1.34 g/cm<sup>3</sup>,0.84 mm/min,19.18%,231.8 t/hm<sup>2</sup>,46.35%。不同土地利用类型下的表土各土壤水分物理因子变异系数均属于中等变异,水平方向上土壤水分物理性质较为均一,但其非毛管孔隙均在 10%以下,表层土壤通气性较差。

(2) 大面积新修梯田、栽植经济林后,流域耕地、果园各水分物理性质得到提高,耕地具有较强的供水能力,果园具有较强的保水能力,它们的饱和导水率分别为 1.07 mm/min 和 0.83 mm/min,显著大于林地和草地( $P<0.05$ )。同时它们较其它土地利用类型而言,具有较好的土壤饱和持水量和毛管持水量,果园和耕地的饱和持水量分别为 241.6 t/hm<sup>2</sup> 和 240.9 t/hm<sup>2</sup>,毛管持水量为 231.0 t/hm<sup>2</sup> 和 227.0 t/hm<sup>2</sup>。

(3) 相关性分析( $P<0.01$ )表明,流域内饱和导水率与容重呈显著负相关关系,相关系数为-0.80,容重与土壤饱和持水量相关性系数为-0.86。流域内大部分土壤水分物理因子相关性密切,作为土壤物理水分性质相应评价的指标具有可行性。

(4) 本文对进一步研究黄土高原水文生态响应有一定参考价值,同时建议增加将土壤母质考虑在内的空间尺度、时间尺度的研究对比,土壤水分物理特性除了受到土地利用的影响外,还与土地的空间异质性和土壤母质关系密切,空间分布一定意义上制约了土地利用类型,而母质从本质上影响和决定了土壤水分物理性质。此外,不同季节的测定也对其有一定影响。罗玉沟的土壤类型较为复杂,大致为山地褐色土类、山地灰褐土类和冲积土类。目前国内关于时间尺

度和母质对土壤水分物理性质影响的研究较少,这也是该区今后该加强研究的方向之一。

参考文献:

[1] 张光灿,夏江宝,王贵霞,等. 鲁中花岗岩山区人工林土壤水分物理性质[J]. 水土保持学报,2005,19(6):44-48.

[2] Qiu Y, Fu B J, Wang J, et al. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semiarid gully catchment of the Loess Plateau, China [J]. Journal of Arid Environments, 2001, 49(4): 723-750.

[3] 代海燕,张秋良,魏强,等. 大青山不同植被土壤物理特征及有效水的研究[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(12):149-153.

[4] 王红胜,刘苑秋,郭圣茂,等. 退化石灰岩红壤重建森林的土壤水分物理性质与水源涵养能力的研究[J]. 江西农业大学学报,2008,30(3):490-493.

[5] 向仰州,徐大平,杨曾奖. 海南省两种人工林林下物种多样性与水分物理性质的关系[J]. 水土保持研究,2012,19(1):37-41.

[6] 李奕,曼秀玲,蔡体久,等. 大兴安岭山地樟子松天然林地土壤水分物理性质及水源涵养功能研究[J]. 水土保持学报,2011,25(2):87-96.

[7] 信忠保,余新晓,张满良,等. 黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用的土壤养分特征[J]. 干旱区研究,2012,29(3): 379-384.

[8] Price K, Jackson C R, Parker A J. Variation of surficial soil hydraulic properties across land uses in the southern Blue Ridge Mountains, North Carolina, USA[J]. Journal of Hydrology,2010,383(3/4):256-268.

[9] 李庆云,余新晓,信忠保,等. 黄土高原典型流域不同土地利用类型土壤物理性质分析[J]. 水土保持研究,2010,17(6):106-114.

- [16] 张光科,刘东,方铎. 山区流域泥沙输移比计算公式[J]. 成都科技大学学报,1996,16(6):85-90.
- [17] 张光科,刘东,方铎. 山区流域坡面径流侵蚀和泥沙输移分析[J]. 四川联合大学学报:工程科学版,1997,1(6):12-20.
- [18] 牟金泽,孟庆枚. 论流域产沙量计算中的泥沙输移比[J]. 泥沙研究,1982(2):60-65.
- [19] 刘纪根,蔡强国,张平仓. 岔巴沟流域泥沙输移比时空分异特征及影响因素[J]. 水土保持通报,2007,27(5):6-10.
- [20] 曹文洪,张启舜,姜乃森. 黄土地区一次暴雨产沙数学模型的研究[J]. 泥沙研究,1993(1):1-13.
- [21] Leopold L B. Channel and hill slope processes in semi-arid area[J]. New Mexico: Unite states geological survey professional paper,1966,352G:193-253.
- [22] Trimble S W. A sediment budget for Coon Creek Basin in the Driftless area, Wisconsin, 1853—1977 [J]. American Journal of Science,1985,283(5):454-474.
- [23] 许炯心,孙季. 水土保持措施对流域泥沙输移比的影响[J]. 水科学进展,2004,15(1):29-34.
- [24] 花利忠. 基于 AnnAGNPS 模型的流域侵蚀产沙评价:以三峡库区大宁河流域为例[D]. 成都:中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,2007.
- [25] 张宪奎,许靖华,卢秀琴,等. 黑龙江省土壤流失方程的研究[J]. 水土保持通报,1992,12(4):1-9.
- [26] 杨晓晖,吴波. 大兴安岭东部林区森林水土保持功能初步评价[J]. 中国水土保持科学,2004,2(4):11-16.
- [27] 王禹,杨明义,刘普灵. 东北黑土区坡耕地水蚀与风蚀速率的定量区分[J]. 核农学报,2010,24(4):790-795.
- [28] 简金世. 松花江流域不同侵蚀类型区泥沙输移比的估算[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2011.
- [29] 章文波,付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学,2003,25(1):35-41.
- [30] 章文波,谢云,刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学,2002,22(6):705-711.
- [31] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A guide to conservation planning[C]. U. S. Dep. Agric. Agric. Handb.,1978,No. 537.
- [32] Foster G R, Meyer L D, Onstad C A. A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates[J]. Transactions of ASAE,1977,20(4):683-687.
- [33] McCool D K, Brown L C, Foster G R. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation [J]. Transactions of the ASAE,1987,30(5):1387-1396.
- [34] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transaction of American Society of Agriculture Engineers,1994,37(6):1835-1840.
- [35] 刘宝元,谢云,张科利. 土壤侵蚀预报模型[M]. 北京:中国科学出版社,2001.
- [36] 张树文,李颖. 东北地区土地利用/覆被时空特征分析[M]. 北京:北京科学出版社,2006.
- [37] 沈波,杨海军. 松辽流域水土流失及其防治对策[J]. 水土保持通报,1993,13(2):28-32.
- [38] 焦剑,赵登峰. 松花江流域侵蚀产沙演变特征分析[J]. 水土保持通报,2010,30(2):87-91.
- [39] 龚时旻,熊贵枢. 黄河泥沙来源和地区分布[J]. 人民黄河,1979,1(1):7-17.
- [40] 景可. 黄土高原泥沙输移比的研究[C]//黄河粗泥沙来源及侵蚀产沙机理研究文集. 北京:气象出版社,1989.
- [41] 许炯心. 三峡水库修建前长江宜昌—武汉段泥沙输移比及其影响因子[J]. 山地学报,2008,26(1):15-21.
- [42] 刘运河,陈礼耕,石长金,等. 大兴安岭地区的水土流失及其防治[J]. 中国水土保持,1992(10):1-3.

(上接第49页)

- [10] 谢媛媛. SWAT 模型在黄土丘陵区参数敏感度分析及率正研究[J]. 水土保持研究,2012,19(4):204-206.
- [11] 黄明,张学霞,张建军,等. 基于 CLUE-S 模型的罗玉沟流域多尺度土地利用变化模拟[J]. 资源科学,2012,34(4):769-776.
- [12] 廖凯华,徐绍辉,程桂福. 大沽河流域土壤饱和导水率空间变异特征[J]. 土壤,2009,41(1):147-151.
- [13] 邱洋,傅伯杰,王军,等. 黄土丘陵小流域土壤物理性质空间变异[J]. 地理学报,2002,57(5):588-594.
- [14] 丁新新,洪伟,陈建忠,等. 不同经营模式下毛竹土壤水分物理性质比较[J]. 水土保持研究,2009,16(3):74-83.
- [15] 王丽,梦丽,张金池,等. 不同植被恢复模式下矿区废弃地土壤水分物理性质研究[J]. 中国水土保持科学,2010,8(3):54-57.
- [16] 纳磊,张建军,朱金兆. 晋西黄土区不同土地利用类型坡面土壤饱和导水率研究[J]. 水土保持研究,2008,15(3):69-73.
- [17] 林代杰,郑子成,张锡洲,等. 不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素[J]. 水土保持学报,2010,24(1):33-36.
- [18] Liu Binhui, Xu Ming, Henderson M, et al. Taking China temperature daily range warming trends and regional variations[J]. Journal of Climate,2004,17:4453-4462.
- [19] 张希彪,上官周平. 人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响[J]. 生态学报,2006,26(11):3685-3695.