

文章编号: 1001-1498(2006)05-0547-08

六盘山北侧叠叠沟小流域土壤物理性质 空间变异的研究

杜阿朋^{1,2}, 于澎涛^{1*}, 王彦辉¹, 袁玉欣², 郭明春¹, 何常清², 管伟¹

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 2. 河北农业大学林学院, 河北 保定 071000)

摘要: 2005年6—10月,在宁夏六盘山北侧叠叠沟小流域的不同坡面设置了93个调查样点,研究了土壤物理性质随土层深度、坡向、坡位及植被类型的变化。结果表明:(1)随土深增加,土壤密度和石砾含量逐渐增大,而土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、土壤饱和持水量、毛管持水量和田间持水量却逐渐减小,但非毛管孔隙度在100 cm以下土层时因石砾含量加大却随土深增加而增大;(2)各项土壤水文物理性质基本上均是阴坡优于半阴半阳坡和阳坡,半阴半阳坡与阳坡差别不大;(3)随着坡位下降,土壤厚度、土壤密度、石砾含量、非毛管孔隙度逐渐增大,总孔隙度和毛管孔隙度逐渐减小,各种持水量指标基本上也是程度不同地减小,但上坡的持水量指标大于阴坡坡顶;(4)4种植被类型0~30 cm土层的土壤密度为天然灌丛 <天然草地 <乔木林地 <退耕地;石砾含量为退耕地最低,其它3种植被类型差别不大;总孔隙度、毛管孔隙度、饱和持水量、毛管持水量和田间持水量均是天然灌丛 >天然草地 >乔木林地 >退耕地;非毛管孔隙度则是退耕地 >乔木林地 >天然灌丛 >天然草地。其次,还建立了土壤物理性质与海拔、坡向、坡度、坡位、土壤深度、地表植被覆盖度等之间的回归方程。

关键词: 六盘山;土壤物理性质;土壤密度;土壤孔隙度;持水能力

中图分类号: S714.2 **文献标识码:** A

The Soil Physical Characteristics in the Small Watershed of Diediegou Located on the North Side of Liupan Mountains

DU A-peng¹, YU Peng-tao¹, WANG Yan-hui¹, YUAN Yu-xin², GUO Ming-chun¹, HE Chang-qing², GUAN Wei¹

(1. Research Institute of Forestry Ecology, Environment and Protection, CAF, Beijing 100091, China;

2. College of Forestry Science, Agriculture University of Hebei, Baoding 071000, Hebei, China)

Abstract: Based on field investigations, the variation of soil physical characteristics with soil depth, slope aspect, slope position, and vegetation types within the small watershed Diediegou located on the north side of Liupan Mountains, Ningxia, China was studied. The result shows: (1) The soil density and stone content increased with increasing soil depth; while total porosity, capillary porosity, non-capillary porosity, saturated water content, capillary soil water content, and field capacity of soil decreased with increasing soil depth. But the non-capillary porosity increased with soil depth in the range of deeper than 100 cm, since the stone content was getting higher in deeper soil layer. (2) All the soil physical properties measured in this study were basically better on the south slope than on the north slope and all other half-sunny slopes. There was very less difference between south slope and all other half-sunny slopes in term of research soil physical properties. (3) With lowering slope position, the soil thick-

收稿日期: 2006-01-24

基金项目: 国家重大基础研究项目(2002CB111501)、国家自然科学基金重点项目(30230290)、国家林业局引进国际先进技术项目(2003-4-43)、科技部社会公益研究专项(2004D B3J102)和国家林业局森林生态环境重点实验室联合资助

作者简介: 杜阿朋(1979—),男,河北定州人,在读博士; E-mail: dapzj@163.com

*通讯作者: 于澎涛, Tel: 010-62889562; E-mail: yupt@forestry.ac.cn

ness, soil density, stone content, and non-capillary porosity were gradually increasing; while the total porosity, capillary porosity, and all water-holding capacity indicators gradually decreasing, with an exception that the water-holding capacity on the up-slope was higher than that on the slope top. (4) By comparing the averaged soil physical properties of upper soil layer (0 ~ 30 cm) among four main vegetation types, the soil density in abandoned farmland was the highest, the woodland the second, the grassland the third, and the shrub land the lowest. The stone content of soil in the abandoned farmland was the least, and there was less difference among all other land types. For the total porosity, capillary porosity, saturated soil water content, capillary soil water content, and field capacity, their order from high to low was shrub land, grassland, woodland, and abandoned farmland. For the non-capillary porosity, its order from high to low was abandoned farmland, woodland, shrub land, and grassland. Finally, the regression equations between the researched soil physical properties and altitude, soil aspect, slope gradient, slope position, soil depth, and ground vegetation coverage were established.

Key words: Lupan Mountains; soil physical properties; soil density; soil porosity; water-holding capacity

土壤是 SPAC (土壤—植被—大气连续体) 系统的重要组成部分, 由于母岩、气候、地形、植被等众多成土过程影响因素的时空异质性, 不但土壤类型分布是丰富多样的, 在相同土壤类型区内土壤理化性质也有巨大的空间变化^[1], 即使在面积有限的小流域内也是如此^[2]。随着信息技术、模型模拟技术等相关科技的快速发展, 土壤物理性质的空间异质性及其重要性越来越受到重视, 并日益广泛地在森林水文、土壤侵蚀、土地利用规划等领域开始了研究和应用。地处半干旱地区南缘的六盘山北侧山地, 是以干旱缺水而著名的宁夏南部地区的重要水源区, 为了解该地区土壤水文物理性质的变化规律, 给山地小流域的植被建设、水文功能、水文过程研究提供基础数据, 本文在六盘山北侧叠叠沟小流域进行了土壤物理性质的研究。

1 试验区概况

叠叠沟小流域隶属宁夏回族自治区固原市 (106°09' ~ 106°30' E, 35°15' ~ 35°41' N) 原州区叠叠沟林场, 面积 25.4 km², 属于六盘山背风坡土石山区与黄土高原的交界地带, 海拔 1 975 ~ 2 615 m, 年平均气温 5.8℃, 年无霜期为 90 ~ 130 d, 年降水量为 380 ~ 650 mm, 且主要集中在夏秋季, 多年平均潜在蒸发量为 1 420 mm, 气候属温带大陆性气候^[3]。

该流域呈南北走向, 形状系数 1.58。据土壤特点将小流域分成两大区域, 上游地形较缓, 坡度主要在 20°以内, 面积 7.2 km², 属黄土高原的黄土区, 土壤类型主要为黄绵土和红黏土; 而中、下游较陡, 坡度依次主要为 10°~35°和 20°~40°, 面积分别为 11.3

、6.9 km², 属六盘山的土石山区, 土壤类型主要为灰褐土。

该流域地处森林草原过渡带, 地带性植被为草甸, 流域内草地面积最大, 占流域总面积的 58.7%, 在各种地形均有分布, 其它植被镶嵌其中。流域阳坡主要生长有本氏针茅 (*Stipa bungeana* Trin.) 和白羊草 (*Bothriochloa ischaemum* Keng) 群落; 阴坡为细叶苔草 (*Carex rigescens* Franch. V. Krecz) 和铁杆蒿 (*Artemisia sacronum* Ledeb.) 群落, 虎榛子 (*Ostryopsis davidiana* Decne.) 灌丛、沙棘 (*Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* Rousi) 灌丛成岛状分布, 阴坡还点缀着三裂绣线菊 (*Spiraea trilobata* L.)、灰栒子 (*Cotoneaster acutifolius* Turcz.)、扁刺蔷薇 (*Rosa sweginzowii* Koehne)、二色胡枝子 (*Lespedeza bicolor* Turcz.) 等灌丛, 还有 18 年生的华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii* Mayr.) 和北京杨 (*Populus ×beijingensis* W. Y. Hsu) 人工林。

2 研究方法

2.1 样点布设与环境因子测定

2005 年 6—10 月在叠叠沟小流域内, 根据地形以及植被类型的不同, 选定了 18 个坡面, 并沿坡面在不同坡位设置了 93 个土壤物理性质调查样点。各点土壤剖面分层取样 (表 1)。为揭示土壤物理性质随土壤深度、坡向和坡位的变化规律, 选择占测点比例最大和在小流域占面积最多的天然草地 (47 个样点) 土壤物理性质进行统计分析。

将该小流域的土地利用类型分为 4 类即: 天然草地、天然灌丛 (沙棘、虎榛子)、乔木林地 (18 年生华北落叶松) 和 2000 年的退耕还林地。采用手持罗

盘确定每个样点的坡向和坡度,采用 GPS 测定海拔。

2.2 土壤取样与分析方法

利用体积为 100 cm^3 环刀(高 5 cm ;直径 5 cm)在各个样点分层取原状土,每个测点 3 个重复,测定土壤密度、孔隙度(总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度)、持水量(最大持水量、毛管持水量、田间持水量)等土壤水文物理性质^[4]。

土壤中石砾质量采用天平称量,再利用以下公式进行推算:

石砾含量 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) = 石砾质量 (g) / 原状土体积 (cm^3)

2.3 统计方法与数据处理

利用 EXCEL 和 SPSS 数据分析软件分析土壤物理性质并对叠叠沟小流域内 93 个样点 757 组土壤物理性质数据,用 SPSS 软件进行多元逐步回归分析。因变量包括土层厚度 (cm)、石砾含量 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、土壤密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、总孔隙度 (%)、毛管孔隙度 (%)、非毛管孔隙度 (%)、饱和持水量 (%)、毛管持水量 (%) 和田间持水量 (%) 这些重要的土

壤物理性质特征。自变量包括坡向、坡度(度,正切值)、坡位、相对海拔 (m)、测点深度 (cm)、地表植被总覆盖度 (%),其中,坡向为偏离正北方向的角度(即变化在 $0 \sim 180^\circ$;如东坡和西坡均取值为 90°),并取二分之一坡向角度的余弦值 $\text{Cos}(\text{坡向}/2)$,以使坡向的赋值为 $0 \sim 1$ 变化;相对海拔 (m) 为测点实际海拔与流域出口海拔 ($2\ 000\text{ m}$) 的差值^[5,6]。坡位赋值时采用坡顶为 1,其余各坡位的赋值分别为其所在坡位平均土厚与坡顶平均土厚的比值,坡顶、上坡、中上坡、中坡、下坡的赋值分别为 1.00、2.57、2.61、3.55、5.34。测点深度取值为取原状土时环刀中心位置所处的深度。

3 结果与分析

3.1 天然草地土壤物理性质随土壤深度的变化

从表 1 可以看出,土壤密度随土壤深度的增加而增大。在 $0 \sim 5\text{ cm}$ 土层土壤密度平均为 $0.79\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $15 \sim 20\text{ cm}$ 土层增到 $0.90\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $50 \sim 55\text{ cm}$ 土层达到 $1.01\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $130 \sim 135\text{ cm}$ 土层增到 $1.11\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,而增幅基本上是减小的。

表 1 叠叠沟小流域天然草地的土壤物理性质随土壤深度的变化

土层深度 / cm	样本数 / 个	土壤密度	石砾含量	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	饱和持水量	毛管持水量	田间持水量
		$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$					%		
0~5	47	0.79	0.067 2	69.49	62.02	7.47	91.87	82.00	80.00
5~10	45	0.85	0.078 2	67.71	60.02	7.69	83.81	74.29	72.57
10~15	46	0.88	0.067 9	66.89	60.40	6.49	78.73	71.05	69.05
15~20	40	0.90	0.071 6	65.83	57.82	8.01	74.82	65.90	63.90
20~25	38	0.93	0.083 5	65.32	57.99	7.34	70.85	62.97	60.22
30~35	34	0.96	0.072 6	64.16	57.36	6.80	67.74	60.52	58.58
40~45	25	0.97	0.102 2	63.08	56.67	6.40	66.29	59.75	57.86
50~55	28	1.01	0.152 1	60.83	54.63	6.20	60.79	54.65	52.91
60~65	18	1.07	0.189 8	58.83	53.09	5.74	55.44	49.99	48.05
70~75	19	1.08	0.235 8	58.51	51.75	6.76	54.59	48.48	46.38
80~85	13	1.09	0.277 4	59.56	54.59	4.97	55.22	50.95	49.74
90~95	10	1.09	0.302 4	60.85	55.67	5.18	57.14	52.56	51.39
110~115	9	1.08	0.329 0	59.60	49.91	9.69	56.11	47.36	43.20
130~135	6	1.11	0.379 8	59.05	45.48	13.57	53.91	41.95	41.54

注:表中孔隙度为体积百分比;持水量为重量百分比。

六盘山土壤表现出强烈的粗骨土特征,石砾含量较高并随土层加深而增加。在 $0 \sim 5\text{ cm}$ 土层土壤的石砾含量平均为 $0.067\ 2\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $15 \sim 20$ 、 $40 \sim 45$ 、 $130 \sim 135\text{ cm}$ 土层分别增加到 $0.071\ 6$ 、 $0.102\ 2$ 、

$0.379\ 8\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,而且,石砾含量的增幅随着土层的加深而增大。

土壤总孔隙度在 $0 \sim 80\text{ cm}$ 随土层加深而减小。 $0 \sim 5\text{ cm}$ 土层的总孔隙度为 69.49% ,在 $40 \sim 45\text{ cm}$

土层减至 63.08%, 在 70 ~ 75 cm 土层减至 58.51%; 80 ~ 135 cm 土层总孔隙度随着土层深度的加深呈先增大后减小的趋势, 变幅为 59.05% ~ 60.85%, 在 130 ~ 135 cm 土层时为 59.05%。石砾含量可能对土壤总孔隙度变化有一定影响。土壤毛管孔隙度在 0 ~ 80 cm 随着土层的加深而减小, 0 ~ 5 cm 土层的毛管孔隙度为 62.02%, 40 ~ 45 cm 土层减小至 56.67%, 70 ~ 75 cm 减至 51.75%; 80 ~ 135 cm 土层毛管孔隙度随土层深度的增加先增大后减小, 变幅为 45.48% ~ 55.67%, 130 ~ 135 cm 土层仅为 45.48%。土壤非毛管孔隙度随土壤深度变化的情况比较复杂, 在 0 ~ 15 cm 土层, 非毛管孔隙度的变化没有规律; 15 ~ 65 cm 土层, 非毛管孔隙度随着土层深度的增加逐渐减小; 70 ~ 135 cm 非毛管孔隙度随着土层深度的增加先减小后增大, 130 ~ 135 cm 增至 13.57%。

土壤饱和持水量、毛管持水量、田间持水量均是在 0 ~ 80 cm 随着土层深度的增加而减小的, 80 ~ 135 cm 各持水量指标随着土层深度的增加先增大后减小。

3.2 天然草地土壤物理性质随坡向和坡位的变化

根据叠叠沟小流域内不同立地的土壤水分、光照、土层厚度等条件的不同, 将坡向分为阳坡、半阴半阳坡、阴坡 3 个类型。将坡位自山顶向下分为坡顶、上坡、中上坡、中坡和下坡 5 个坡位类型 (图 1)。

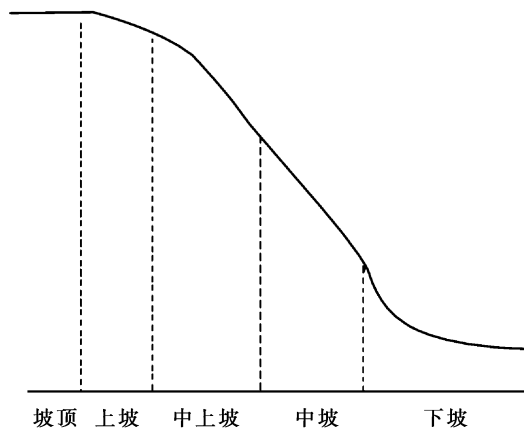


图 1 坡位示意图

从表 2 中可看出, 所有坡向的土层厚度都是从坡顶向下逐渐增加, 坡顶土层最薄, 上坡、中上坡、中坡、下坡的土厚分别是坡顶的 2.0 ~ 2.9、1.9 ~ 3.4、2.6 ~ 4.1 和 5.1 ~ 6.1 倍。坡位相同时, 半阴半阳坡土层厚度为阳坡的 1.0 ~ 1.6 倍,

阴坡的土层厚度为阳坡的 1.4 ~ 1.7 倍。坡向和坡位决定的水分条件差异, 充分反映在植被总覆盖度方面, 如阴坡平均达 87%, 半阴半阳坡平均为 86%, 阳坡仅 72%。

对于土壤密度, 所有坡向均是自坡顶至坡下逐渐增大, 其原因一是水土流失使上部细土粒冲至下部, 二是过去多年放牧利用时坡中下部遭到更多牲畜践踏导致其土壤更加密实一些; 不同坡位的土壤密度平均值在不同坡向的排序为: 阳坡 ($0.890 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) > 半阴半阳坡 ($0.888 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) > 阴坡 ($0.816 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), 阳坡和半阴半阳坡的差别很小。

所有坡向的土壤总孔隙度基本上都是自坡顶随坡位的下降逐渐减小, 不同坡位的土壤总孔隙度平均值为半阴半阳坡 (64.68%) < 阳坡 (66.52%) < 阴坡 (70.35%); 毛管孔隙度随坡位的变化规律与总孔隙度一样, 不同坡位的毛管孔隙度平均值为半阴半阳坡 (56.94%) < 阳坡 (61.14%) < 阴坡 (60.78%); 非毛管孔隙度一般随坡位下降而增大, 阴坡的增幅远大于阳坡和半阴半阳坡, 这主要是由于土壤动物和植物根系活动的缘故。不同坡位的非毛管孔隙度平均值为阳坡 (5.37%) < 半阴半阳坡 (7.74%) < 阴坡 (9.57%)。

阳坡和半阴半阳坡的饱和持水量基本上随着坡位下降而减小, 其原因与土壤密度随坡位下降而增大是相同的。阴坡的饱和持水量自坡顶 (93.34%) 到上坡 (110.86%) 逐渐增至最大, 而后到下坡降至最低 (70.18%), 这是因为阴坡水分条件相对较好, 随坡位下降植被条件也越来越好, 土壤物理性质改善比较明显, 但由于中坡和下坡过去受到多年的人为干扰, 反不如上坡好。不同坡位饱和持水量的平均值为半阴半阳坡 (74.53%) < 阳坡 (76.46%) < 阴坡 (92.08%)。阳坡和半阴半阳坡的毛管持水量都基本随坡位的下降而减小, 在阴坡则和饱和持水量一样, 从坡顶的 87.72% 增加到上坡的 99.86% 后随坡位下降, 到下坡时仅为 57.94%。不同坡位的毛管持水量平均值为半阴半阳坡 (65.57%) < 阳坡 (70.21%) < 阴坡 (80.26%)。所有坡向的田间持水量随不同坡位的变化规律都与毛管持水量相同。不同坡位的毛管持水量平均值为半阴半阳坡 (63.56%) < 阳坡 (68.29%) < 阴坡 (77.44%)。

表 2 叠叠沟小流域天然草地 0~30 cm 土层的土壤物理性质随坡向和坡位的变化

坡向	坡位	样本数 / 个	土层厚度 / cm	总覆盖度 / %	土壤密度	石砾含量	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	饱和持水量	毛管持水量	田间持水量
阳坡	坡顶	20	19	65	0.85	0.061 0	68.59	64.88	3.71	82.48	77.92	76.59
	上坡	25	55	80	0.88	0.069 7	67.47	61.53	5.94	79.45	72.19	70.09
	中上坡	25	54	70	0.85	0.178 1	66.18	63.41	2.78	78.44	75.25	71.94
	中坡	25	77	70	0.94	0.097 6	65.15	59.42	5.73	70.34	63.96	62.58
	下坡	22	108	75	0.93	0.096 6	65.19	56.48	8.71	71.61	61.71	60.24
半阴坡	坡顶	19	30	80	0.85	0.041 8	68.13	60.57	7.56	81.66	72.22	70.93
	上坡	18	60	85	0.85	0.049 7	66.66	57.84	8.81	80.67	70.22	67.73
	中上坡	10	56	90	0.92	0.049 9	61.89	54.74	7.16	68.57	60.41	58.78
	中坡	19	79	90	0.89	0.038 9	63.98	57.95	6.02	74.05	66.96	63.92
	下坡	19	153	85	0.93	0.059 8	62.74	53.59	9.15	67.70	58.06	56.45
阴坡	坡顶	21	27	75	0.84	0.052 5	70.24	66.45	3.79	93.34	87.72	86.30
	上坡	21	75	90	0.69	0.029 8	74.88	66.88	8.01	110.86	99.86	96.34
	中上坡	10	91	90	0.75	0.081 3	74.75	61.43	13.32	101.04	84.28	81.15
	中坡	21	109	90	0.83	0.041 0	68.45	57.38	11.07	84.98	71.48	68.47
	下坡	21	166	90	0.97	0.120 7	63.42	51.74	11.68	70.18	57.94	54.95

注:表中孔隙度为体积百分比;持水量为重量百分比。

3.3 不同植被类型下土壤物理性质的变化

从表 3 可以看出,退耕地 0~30 cm 土壤密度的平均值最大(0.94 $g \cdot cm^{-3}$),其它植被类型的土壤密度从大到小依次是乔木林地、天然草地、天然灌丛。退耕地的土壤密度最大的原因可能和耕地土壤质地更细一些、以前农业耕作犁地的压实作用、退耕

还林年限还很短有关,如 10~20 cm 土层的土壤密度达到 1.01 $g \cdot cm^{-3}$,而在 20~30 cm 土层又减小为 0.96 $g \cdot cm^{-3}$ 。天然灌丛的植被覆盖最好,受过去放牧践踏的影响最小,所以其土壤密度最小。乔木林地和草地一样受过去放牧践踏的影响,土壤密度居于天然灌丛和退耕地之间。

表 3 叠叠沟小流域不同植被类型条件下 0~30 cm 土层的土壤物理性质

土层深度 / cm	植被类型	样本数 / 个	土壤密度	石砾含量	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	饱和持水量	毛管持水量	田间持水量
0~10	天然草地	56	0.87	0.074 5	68.30	60.95	7.35	86.94	77.48	75.62
	天然灌丛	24	0.79	0.071 0	69.60	61.09	8.51	89.99	78.99	76.79
	乔木林地	8	0.85	0.063 4	69.47	57.62	11.85	83.38	68.78	67.40
	退耕地	5	0.85	0.029 8	69.40	55.16	14.24	82.98	65.27	64.67
10~20	天然草地	45	0.89	0.071 0	66.46	59.51	6.96	77.47	69.49	67.58
	天然灌丛	21	0.88	0.083 9	67.13	58.83	8.30	78.03	68.45	65.81
	乔木林地	7	0.92	0.063 0	65.84	54.99	10.85	72.36	60.49	59.05
	退耕地	3	1.01	0.040 7	65.07	52.88	12.19	65.05	52.74	51.91
20~30	天然草地	43	0.94	0.085 4	65.02	57.78	7.25	70.28	62.47	59.78
	天然灌丛	22	0.92	0.074 8	66.43	59.15	7.28	73.45	65.35	64.43
	乔木林地	8	0.95	0.074 5	63.45	54.61	8.84	66.28	57.18	56.32
	退耕地	5	0.96	0.027 0	65.78	52.92	12.86	68.83	55.45	54.55

注:表中孔隙度为体积百分比,持水量为重量百分比,乔木林地均为华北落叶松和北京杨人工林地。

在叠叠沟小流域内,目前的人工林地和天然灌丛大都位于中坡和下坡,母质为坡积母质,土层较深厚;草地在小流域内分布较广,主要位于中坡和上坡,母质为残积母质,土层较薄;退耕地土层深厚、坡

度平缓,石砾含量最少,各土层的石砾含量为 0.027 0~0.040 7 $g \cdot cm^{-3}$ 。与退耕地相比,其它植被类型的土壤石砾含量明显增大,为 0.063 0~0.085 4 $g \cdot cm^{-3}$ 。天然草地、天然灌丛、乔木林地、

退耕地 0~30 cm 土层的石砾含量平均值分别为 0.077 0、0.076 6、0.067 0、0.032 5 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

在 4 种植被类型 0~30 cm 土层的总孔隙度差别较小, 0~10、10~20、20~30 cm 土层的总孔隙度分别为 68.30%~69.60%、65.07%~67.13%、63.45%~66.43%, 天然草地、天然灌丛、乔木林地、退耕地 0~30 cm 土层的总孔隙度平均值分别为 66.59%、67.72%、66.25%、66.75%, 天然灌丛的土壤总孔隙度稍微高一些。天然灌丛和天然草地的毛管孔隙度明显大于乔木林地和退耕地, 天然草地、天然灌丛、乔木林地、退耕地 0~30 cm 土层的毛管孔隙度平均值分别为 59.41%、59.69%、55.74%、53.65%; 但是天然灌丛和天然草地的非毛管孔隙度明显小于乔木林地和退耕地, 天然草地、天然灌丛、乔木林地、退耕地 0~30 cm 土层的非毛管孔隙度平均值分别为 7.19%、8.03%、10.51%、13.10%, 这可能与退耕地以前经常翻耕、林地的大根系影响有关, 翻耕和大根系活动导致了较多的大孔隙。

4 种植被类型 0~30 cm 土层的饱和持水量有较大的差别(表 3), 0~10、10~20、20~30 cm 土层饱和持水量分别为 82.98%~89.99%、65.05%~78.03%、66.28%~73.45%, 以 10~20 cm 土层的变幅最大(12.98%)。天然草地、天然灌丛、乔木林地、退耕地 0~30 cm 土层的饱和持水量的平均值分别为 78.23%、80.49%、74.01%、72.29%, 这说明天然灌丛的土壤饱和持水量最高, 退耕地最小。

4 种植被类型的毛管持水量差别较大: 天然灌丛是 0~10、20~30 cm 土层的毛管持水量最大, 分

别为 78.99%、65.35%; 退耕地最小, 分别为 65.27%、55.45%; 但天然草地是 10~20 cm 土层的最大(69.49%), 退耕地最小(52.74%)。这是因为天然灌丛植被总覆盖度高, 枯落物丰富, 所以 0~10 cm 土层的毛管持水量最大, 在 10~20 cm 主要是植物根系起作用, 天然草地的草本植物根系主要集中在这一层, 而灌木根系分布的更深一些; 但从 0~30 cm 土层的毛管持水量的平均值看: 天然草地、天然灌丛、乔木林地和退耕地分别为 69.81%、70.93%、62.15%、57.82%, 显然天然灌丛的土壤毛管持水量还是高一些。

4 种植被类型田间持水量的变化规律与毛管持水量相同。天然草地、天然灌丛、乔木林地和退耕地 0~30 cm 土层的田间持水量的平均值分别为 67.66%、69.01%、60.92%、57.04%。总的来说, 还是天然灌丛的田间持水量最高。

3.4 石砾含量与其它土壤物理性质的关系

从表 4 可以看出, 土壤密度与石砾含量呈显著正相关, 相关系数为 0.418, 表明石砾含量增高会导致土壤密度增大; 石砾含量与总孔隙度、毛管孔隙度、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量均呈显著负相关关系, 相关系数分别为 -0.351、-0.318、-0.349、-0.347、-0.347, 表明石砾含量增大导致总孔隙度、毛管孔隙度、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量的降低; 但石砾含量与非毛管孔隙度呈正相关关系, 表明石砾含量增大时导致非毛管孔隙度增大, 因为六盘山区的岩石主要是极易风化的松散页岩。

表 4 石砾含量与其它土壤物理性质的相关性

项目	土壤密度	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	饱和持水量	毛管持水量	田间持水量
石砾含量	0.418**	-0.351**	-0.318**	0.083	-0.349**	-0.347**	-0.347**

注: 样本数 $n=757$; **表示: $P<0.01$ 检验; *表示: $P<0.05$ 检验。

3.5 叠叠沟小流域土壤物理性质与环境因子的回归分析

从表 5 中可以看出, 土层厚度与相对海拔和 tg (坡度) 呈显著负相关, 相关系数分别为 -0.430 0、-0.211 7; 与坡度呈显著正相关, 相关系数为 0.699 7。土壤密度与坡位和测点深度呈显著正相关, 相关系数分别为 0.395 9、0.602 1; 与相对海拔和 Cos (坡向/2) 呈负相关, 相关系数分别为 -0.379 9 和 -0.221 3。石砾含量与坡位、测点深度呈显著正相关, 相关系数分别为 0.277 2、0.478 8;

与相对海拔呈显著负相关, 相关系数为 -0.287 9。

总孔隙度与坡位、测点深度呈显著负相关, 相关系数分别为 -0.308 5、-0.423 0; 与相对海拔、 Cos (坡向/2) 呈显著正相关, 相关系数分别为 0.387 8、0.187 1。毛管孔隙度与坡位、测点深度呈显著负相关, 相关系数分别为 -0.271 4、-0.253 0; 与相对海拔呈显著正相关, 相关系数为 0.335 7。非毛管孔隙度与 Cos (坡向/2)、植被总覆盖度呈显著正相关, 相关系数分别为 0.230 2、0.112 8。

表 5 土壤物理性质与诸环境因子的相关系数

土壤物理性质	相对海拔	坡位	Cos(坡向 /2)	tg(坡度)	测点深度	地表植被总覆盖度
土层厚度	- 0.430 0**	0.699 7**	- 0.072 8	- 0.211 7**		- 0.316 2**
土壤密度	- 0.379 9**	0.395 9**	- 0.221 3**	0.026 5	0.602 1**	- 0.246 2**
石砾含量	- 0.287 9**	0.277 2**	- 0.065 7	- 0.059 9	0.478 8**	0.044 3
总孔隙度	0.387 8**	- 0.308 5**	0.187 1**	- 0.045 8	- 0.423 0**	0.071 8
毛管孔隙度	0.335 7**	- 0.271 4**	- 0.028 5	- 0.055 5	- 0.253 0**	- 0.027 8
非毛管孔隙度	- 0.072 8	0.061 9	0.230 2**	0.028 3	- 0.081 3	0.112 8*
饱和持水量	0.382 1**	- 0.375 0**	0.229 8**	- 0.059 7	- 0.506 1**	0.182 5**
毛管持水量	0.393 7**	- 0.377 8**	0.130 8*	- 0.071 2	- 0.442 4**	0.127 7*
田间持水量	0.391 9**	- 0.370 8**	0.132 2*	- 0.071 9	- 0.440 7**	0.120 3*

注:样本数 $n=757$; **表示: $P < 0.01$ 检验; *表示: $P < 0.05$ 检验;表中的空是因为测点深度不属于土层厚度的环境因子。

饱和持水量、毛管持水量、田间持水量与坡位、测点深度均呈显著负相关,相关系数分别为 - 0.375 0、- 0.506 1、- 0.377 8、- 0.442 4、- 0.370 8、- 0.440 7;而饱和持水量、毛管持水量、田间持水量却与相对海拔、Cos(坡向 /2)和植被总覆盖度均呈显著正相关,相关系数分别为 0.382 1、0.229 8、0.182 5、0.393 7、0.130 8、0.127 7、0.391 9、0.132 2、0.120 3。

进一步利用 SPSS 软件进行因变量与自变量的多元逐步回归分析,得到诸土壤物理性质的多元回归方程(表 6),利用这些方程可以比较方便地计算在不同地点和植被覆盖度情况下的土壤物理性质,是继续进行小流域内土壤物理性质空间分布研究的基础。

从表 6 中可以看出:土层厚度随坡位下降而增大,随坡度变陡而变薄;土壤密度随测点深度加深而增大,随海拔的升高而降低。土壤总孔隙度随坡位下降逐渐减小,阴坡总孔隙度大于阳坡,随坡度变陡而下降(可能是水土流失的结果),随植被覆盖度加大而升高。毛管孔隙度随坡位下降和坡度增加而减小。非毛管孔隙度受环境、生物、土地利用历史、成土过程等众多因素的影响,非常复杂,但是阴坡的非毛管孔隙度明显大于阳坡。

增加植被覆盖度具有提高土壤持水能力的作用,阴坡的水分条件和植被覆盖状况优于阳坡和半阴半阳坡,其土壤持水指标均高于其它坡向。缓坡立地的土壤持水能力普遍高于陡坡。

表 6 土壤物理性质与诸环境因子的多元逐步回归系数

项目	土层厚度	土壤密度	石砾含量	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	饱和持水量	毛管持水量	田间持水量
常数项	106.700 3	1.081 3	0.013 9	0.608 4	0.549 8	0.047 0	0.567 2	0.500 9	0.553 7
相对海拔		- 0.000 5	- 0.000 2	0.000 2	0.000 3		0.000 7	0.000 7	0.000 6
坡位	24.642 0				0.000 3				
Cos(坡 /2)	10.860 2	- 0.057 5	- 0.045 8	0.035 0	- 0.007 6	0.044 9	0.099 7	0.044 9	0.062 8
tg(坡度)	- 25.870 7	0.035 7		- 0.017 9	- 0.031 8		- 0.065 7	- 0.076 7	- 0.074 9
测点深度		0.002 0	0.001 8	- 0.000 6	- 0.000 5		- 0.002 2	- 0.001 8	- 0.001 8
植被盖度	- 109.005 0	- 0.123 2	0.137 7		- 0.002 5		0.083 6	0.087 0	
相关系数	0.781	0.694	0.528	0.551	0.388	0.230	0.623	0.559	0.554

注:样本数 $n=757$,表中的空表示多元逐步回归时因相关系数不高而被 SPSS 剔除掉的项。

4 结论与讨论

(1)随着土层加深,土壤密度和石砾含量都逐渐增大,到 130~135 cm 增至最大(土壤密度为 $1.11 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;石砾含量为 $0.379 8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。土壤密度

的增幅随土层深度增加而减小;石砾含量的增幅却是逐渐增大,这与越来越接近母质有关。总孔隙度、毛管孔隙度、饱和持水量、毛管持水量和田间持水量的总体趋势均为随土层深度的增加而减小。土壤非毛管孔隙度随土壤深度变化的情况是复杂的,这与

土层中植物根系分布状况和土壤中石砾含量的多少有很大关系。

(2)不同坡向中,阴坡 0~30 cm 的土壤密度最小,这与田大伦等人^[7]的研究结果一致,平均为 $0.816 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、饱和持水量、毛管持水量和田间持水量都最大,平均值分别为:70.35%、60.78%、9.57%、92.08%、80.26%和 77.44%。阳坡与半阴半阳坡差别不太大,阳坡的土壤密度、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、饱和持水量、毛管持水量和田间持水量分别为: $0.890 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、66.52%、61.14%、5.37%、76.46%、70.21%和 68.29%;半阴半阳坡的土壤密度、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、饱和持水量、毛管持水量和田间持水量分别为: $0.888 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、64.68%、56.94%、7.74%、74.53%、65.57%和 63.56%。

(3)在山地坡面上的不同坡位处,成土过程的差别会导致土壤特征的不同^[8,9]。一般认为,土壤密度沿坡面自坡顶向坡下递减,而其它土壤物理性质均递增^[8,10],但本研究结果却是自坡顶至坡下土壤密度逐渐增大,而总孔隙度、毛管孔隙度逐渐减小,这都是因为当地水土流失严重和长期放牧利用人畜践踏干扰共同作用的结果。非毛管孔隙度随坡位下降而增大,且不同坡位的平均值为阳坡(5.37%)<半阴半阳坡(7.74%)<阴坡(9.57%)。阴坡的饱和持水量、毛管持水量和田间持水量都最大。不同坡位的持水量是中坡或中上坡最大,下坡最小,这是由于多年的放牧利用干扰造成的。

(4)植被类型不同,植物对土壤的生物作用也不同^[11]。在 4 种植被类型中,退耕地 0~10、10~20、20~30 cm 土层的土壤密度最大,其它植被类型的土壤密度从大到小依次是乔木林地、土壤草地、天然灌丛,这是农业耕作的压实作用和植被状况好坏共同影响造成的,这与秦钟^[12]、邱扬^[5]、何福红^[10]等人研究的结果一致。天然草地、天然灌丛、乔木林地、退耕地 0~30 cm 的土壤总孔隙度平均值分别为 66.59%、67.72%、66.25%、66.75%,显然天然灌丛稍微好一些。天然灌丛和天然草地的非毛管孔隙度明显比乔木林地和退耕地的小,这是由于退耕地经常翻耕的缘故。天然灌丛植被总覆盖度高,所以其持水能力在 4 种植被类型中也最高,这一结果与田佳秋^[13]、徐燕等人^[14]的研究结果相同。

(5)有些研究者在进行坡向数值转换时将以北

为起点顺时针旋转的坡向角度同时取正弦(Sin(坡向))和余弦(Cos(坡向))值,生成 2 个坡向的亚变量,分别表示朝东和朝北的程度^[5,15],但本研究基于北坡水分条件最好和南坡水分条件最差的事实,采用以偏离正北方向的坡向角度(0~180°)一半数值的余弦值(Cos(坡向/2))能更好地体现不同坡向的差异。

(6)在回归方程中单一考虑一个因子或者独立分析多个因子时,虽然能反应出一些土壤物理性质的变化规律,但也存在许多问题。这说明土壤物理性质的空间变异性很大,影响因子很多,过程和机理很复杂,并且各影响因子间不是相互独立的。另外,试验中样本数目也可能还不足以更好的说明问题,因此,未来研究中除增加样本数目外,还应考虑怎样表述各影响因子的综合作用,并寻找本研究中未涉及到的其它可能的重要影响因子和过程。

参考文献:

- [1] 王政权,王庆成. 森林土壤物理性质的空间异质性研究[J]. 生态学报, 2000, 20(6): 945~950
- [2] 华孟,王坚. 土壤物理学[M]. 北京:北京农业大学出版社,1993
- [3] 宁夏六盘山自然保护区管理处. 六盘山自然保护区科学考察[M]. 银川:宁夏人民出版社,1989
- [4] 林业部科技司. 森林生态系统定位研究方法[M]. 北京:中国科学技术出版社,1994
- [5] 邱扬. 黄土丘陵小流域土地质量特征的时空变异及环境效应[D]. 北京:中国科学院生态环境研究中心,2001
- [6] 胡润田,靳洪生,李清林. 数字化地形信息及其在森林资源管理中的应用[J]. 东北林业大学学报,1994,22(2): 24~35
- [7] 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(2): 1~6
- [8] 高雪松,邓良基,张世熔. 不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析[J]. 水土保持学报,2005,19(2): 53~79
- [9] Mitsch W J, Gosselin K J. Wetlands[M]. New York: John Wiley & Sons,2000: 155~204
- [10] 何福红. 黄土高原沟壑区小流域水文性质的空间变异性[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2003
- [11] 庞学勇,包维楷,张咏梅,等. 岷江柏林下土壤物理性质及其地理空间差异[J]. 应用与环境生物学报,2004,10(5): 596~601
- [12] 秦钟,周兆德. 土壤物理性质变化简析[J]. 海南大学学报(自然科学版),2002,20(4): 379~385
- [13] 田佳秋,兰伟,李树森,等. 整地深度对土壤物理性质的影响[J]. 防护林科技,2005(3): 28~29
- [14] 徐燕,龙健. 贵州喀斯特山区土壤物理性质对土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报,2005,19(1): 157~159,175
- [15] 邱扬,傅伯杰,王军,等. 黄土丘陵小流域土壤物理性质的空间变异[J]. 地理学报,2002,57(5): 587~594