自然恢复序列梯度上退耕地土壤容重变化及其蓄水性能效应

焦梦妍[1]，从怀军[2]，姚 静[2]，杜好田[2]

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院，陕西 杨凌 712100；2.西北农林科技大学水土保持研究所，陕西 杨凌 712100)

摘要：为了探索黄土丘陵区退耕地植被自然恢复对土壤水分环境的影响，以延安市安塞区 5 个植被自然恢复阶段(10，20，30，40，50 年)退耕地为研究对象，采用空间代替时间法研究不同演替阶段土壤理性特征的变化、土壤蓄水性能及其影响。结果表明：陕北黄土丘陵区弃耕地在植被自然恢复过程中，同一演替阶段不同土层，其表层(0—20 cm)土壤容重均小于下层(20—40 cm)土壤容重。不同演替阶段表层土壤容重总体表现为先减少后增加的趋势，其土壤容重在 30 年的植被自然恢复期降到最低值，说明植被恢复导致表层土壤容重变小，表层土壤总毛管孔隙度、非毛管孔隙度均呈现先增大后减小的趋势，且在 30 年自然恢复期达到峰值，而土壤毛管孔隙度变化趋势为先减小后增大再减小再增大。不同演替阶段表层土壤饱和蓄水量、滞留蓄水量均表现为先增大后减小的趋势，且在 30 年自然恢复期其蓄水量达到峰值。土壤物理特征的变化趋势为土壤容重大，土壤粗砂粒含量增加，毛管孔隙度增大，非毛管孔隙度减小，土壤蓄水量降低；土壤容重减小，土壤细砂粒、粉黏粒含量增加，毛管孔隙度减小，非毛管孔隙度增大，土壤蓄水量增大。

关键词：黄土丘陵区；自然恢复；退耕地；土壤容重；土壤蓄水性能

中图分类号：S714.7 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2018)05-0128-06

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.05.021

Soil Bulk Density Changes and Its Water-storage Capacity of Abandoned Farmland in Natural Restoration Series Gradient of Loess Hilly-gully Region

JIAO Mengyan[1], CONG Huaijun[2], YAO Jing[2], DU Haotian[2]

(1. *College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100; 2. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100)

Abstract: For exploring the effect of natural vegetation restoration of abandoned farmland in the loess hilly region on soil water environment, this paper took five natural vegetation restoration (10, 20, 30, 40 and 50 years) abandoned farmlands as the research object in Ansai County, Yanan. And the changes of soil characteristic in different natural restoration stages and its effects on soil water-storage capacity were studied using the method of substituting temporal serial with spatial serial. The results showed that: In the process of natural vegetation restoration of abandoned farmland, the soil bulk density of the surface layer (0—20 cm) was lower than that of the lower layer (20—40 cm) in different soil layers at the same natural recovery stage. At different stages of natural restoration, the soil bulk density of surface soil decreased first and then increased with a minimum at 30 years of natural restoration, indicating that natural vegetation restoration could lead to decrease soil bulk density of surface soil. Reaching the maximum at 30 years, the total capillary porosity and non-capillary porosity of surface soil increased first and then decreased, while capillary porosity decreased initially and increased afterwards. Reaching the maximum at 30 years, soil total water-storage capacity and non-capillary water-storage capacity increased first and then decreased at different stages of natural restoration. The changing trends of soil physical characteristic showed that with the increase of soil bulk, soil gravel content and capillary porosity, and with the decrease of non-capillary porosity, the soil water-storage capacity was reduced, and vice versa.

Keywords: loess hilly region; natural restoration; abandoned farmland; soil bulk density; soil water-storage capacity

收稿日期：2017-10-30

资助项目：国家自然科学基金项目(41271043，31370455)；国家重点研发计划项目(2016YFA0600801)

第一作者：焦梦妍(1994—)，女，陕西杨凌人，硕士研究生，主要从事农业水土资源利用与保护研究。E-mail：402474135@qq.com

通信作者：从怀军(1965—)，男，陕西杨凌人，工程师，主要从事水土保持工程实验技术研究。E-mail：hjcong@ms.iswc.ac.cn

黄土丘陵区是我国水土流失最严重的地区之一,生态环境十分脆弱。近年来随着耕地弃耕等有关工程的实施,水土流失得以遏制,土壤对地表径流的渗透能力增加,水土流失造成的生态压力有所缓解[1]。土壤蓄水性能对区域生态环境、农林业生产有很大影响,是土壤水资源管理和土壤—植物—大气连续体研究必不可少的资料[2]。在土壤—植被系统中,土壤和植被相互作用,土壤提供给植物生长随需要的水分和养分,其含量决定着植物个体发育和群落演替过程,特别是在黄土高原,土壤持、保水性能差,土壤水分是植被恢复与建设的主要限制因子,而植被自然恢复措施能明显改善土壤结构状况,土壤孔隙度随着植被自然恢复演替逐渐增大,土壤蓄水及持水能力逐步也得到逐步提高[3-9]。

土壤容重和土壤孔隙度是反映土壤物理性质的主要指标[10],植被恢复显著影响土壤容重,并促进退化土壤理化性质的恢复[11]。土壤是水分贮蓄的主要场所,土壤孔隙的大小、数量及分布决定着土壤水分贮蓄量和贮蓄方式[12-13]。在土层厚度一定时,群落的水源涵养性能主要取决于土壤的孔隙特性,土壤总孔隙度与最大持水量有关,土壤毛管孔隙度与土壤有效持水量有关[14-15]。已有研究[16-17]表明,土壤自身理化性质影响土壤蓄水性能是通过影响孔隙状况与比表面积来实现的,因此对土壤孔隙度有直接影响的土壤容重必然会对其水分蓄持能力产生一定影响。一般认为,土壤容重越小,非毛管孔隙度、毛管孔隙度和总孔隙度越大,土壤的滞留贮水量、吸持贮水量和饱和贮水量越大[18]。近年来,关于黄土丘陵区土壤水分及其蓄水性能的研究已经取得了一定的研究成果,但针对其不同自然恢复梯度下土壤容重及其蓄水能力变化的研究相对较少。土壤蓄水性能是植被水文效应的重要研究方向,为了寻求黄土丘陵区退耕地植被自然恢复对土壤水分环境的影响,本文采用空间代替时间法,通过对黄土丘陵区不同恢复序列梯度下退耕样地土壤蓄水特征参数(土壤容重、土壤土壤孔隙度等)的测定和植被群落特征的调查分析,了解植被自然恢复过程中土壤的蓄水能力,以期为黄土丘陵区的植被恢复和生态建设提供依据。

1　研究方法

1.1　研究区概况

研究区设在延安市安塞区(108°05′44″—109°26′18″E,36°30′45″—37°19′31″ N),延安市安塞区属于陕北黄土高原丘陵沟壑区,海拔 997～1 731 m,属中温带大陆性半干旱季风气候,年均气温 8.8 ℃,1 月平均气温－6.7 ℃,7 月平均气温 22.9 ℃,年日照时间 2 472 h。年平均降水量 505.3 mm,降水量年际变化大,降水分布不均匀。夏季雨水多且多出现暴雨,年内 57％的降雨多集中在 7—9 月。土壤以黄绵土为主,其有机质含量低,土质疏松,夏季水土流失严重。黄绵土耕层容重为 1.0～1.2 g/cm^3,总孔隙率 50％～65％,通气孔隙最高可达 40％。植被地带为森林草原带,以人工林为主,该区域人工林以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinustabulae formis*)、柠条(*Caragana korshinskii*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)为主,灌木以蔷薇(*Rosa multiflora*)等居多,草本以蒿类(*Artemisia*)和胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等为主[19]。

1.2　研究方法和样地设计

采用空间代替时间的方法,在研究过程中,通过访谈、查证资料等确定每块样地不同的植被自然恢复年限,选择退耕 10,20,30,40,50 年等每个时间序列立地条件相近的 5 块样地作为重复,并进行植物群落特征调查,并统计样方内植物的种类,数量和盖度等,并选择 5 块坡耕地作为对照(表 1)。采样时间为 2015 年 8 月中旬。

群落地上生物量($BM_{地上}$,g/m^2)测定:每块样地选取 1 m×1 m 的样方,每块样地 3 个重复,将样方内所有植物地上部分从茎基部剪下装入信封,按物种标记,75 ℃烘箱中烘至恒重,称重。每个样方内所有植物地上部分干重总和为该样方地上生物量。

群落地下生物量($BM_{地下}$,g/m^2)测定:每块样方内采用土钻(内径 90 mm)法取样,按 0—20,20—40 cm 分层钻取,编号入袋,每块样地 3 个重复。室内用筛孔为 0.1 mm 筛子在流水中冲洗,75 ℃烘箱中烘至恒重,用电子天平获取样品干重。计算公式为:

地下生物量(g/m^2)＝平均每根土芯根系干量(g)/[π×(0.09(m)/2)^2]　　(1)

土壤孔隙和蓄水量计算:土壤容重(BD,g/cm^3)、土壤总孔隙度(P_t,％)、土壤毛管孔隙度(P_c,％)和土壤非毛管孔隙度(P_{nc},％)采用环刀法[20-21]按照 0—20,20—40 cm 分层测定。土壤饱和蓄水量(W_t,t/hm^2)、毛管蓄水量(W_c,t/hm^2)和非毛管持水量(W_{nc},t/hm^2)等土壤蓄水性能计算公式为[22]:

$$W_t = 10000 P_t h \quad (2)$$

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

$$W_{nc} = 10000 P_{nc} h \quad (4)$$

式中:h 为土层厚度(m)。

1.3　数据分析

使用 Excel 2007 进行数据统计与计算,使用 SPSS 11.0 软件对不同自然恢复年限的试验数据进行处理、方差分析(ANOVA)和相关性分析。

表 1 自然恢复序列梯度上样地概况

恢复年限/a	样本数量 N	坡度/坡向	海拔/m	盖度	优势物种
坡耕地	5	2°～22°/阳坡或半阳坡	1076～1508	0.20～0.45	黑豆＋谷子＋糜子
10	5	6°～29°/阳坡或半阳坡	1392～1567	0.35～0.60	赖草＋猪毛蒿 ＋长芒草
20	5	5°～35°/阳坡或半阳坡	1108～1587	0.65～0.85	铁杆蒿＋达乌里胡枝子＋白羊草
30	5	20°～35°/阳坡或半阳坡	1205～1369	0.75～0.85	白羊草＋长芒草＋达乌里胡枝子
40	5	22°～27°/阳坡或半阳坡	1108～1587	0.80～0.90	长芒草＋大针茅＋狼牙刺
50	5	28°～35°/阳坡或半阳坡	1205～1369	0.85～0.90	大针茅＋白羊草＋狼牙刺

注：自然恢复年限近似取 10 的倍数。

2 结果与分析

2.1 自然恢复序列梯度上植被群落生物量及盖度变化

由图 1 可知，在自然恢复 50 年内，随着恢复年限的增加，植物群落地上生物量呈稳步上升趋势，其中在自然恢复 20 年时，群落地上生物量为 117.5 g/m^2，比自然恢复初期(83.46 g/m^2)增加了 40.79%；到自然恢复 50 年时，群落地上生物量达到 156.2 g/m^2，比自然恢复初期增加了 1.87 倍，增长幅度明显。在自然恢复 50 年内，群落地下生物量呈波动式上升趋势，其中在自然恢复 1～20 年间呈显著增长趋势，群落地下生物量 724.0 g/m^2，比自然恢复初期(246.6 g/m^2)增加了 2.94 倍；在自然恢复 20～30 年间有所下降，之后开始回升，到自然恢复 50 年时，群落地下生物量达到 1 487 g/m^2，比自然恢复初期增加了 6 倍多，涨幅非常显著。在自然恢复 20 年内，随着恢复年限的增加，群落覆盖度呈显著上升趋势，到自然恢复 20 年时群落覆盖度达 0.75，比自然恢复初期(0.32)增加了 2.34 倍；在自然恢复 20～50 年间处于稳步增长趋势，到自然恢复 50 年时，群落覆盖度为 0.88，比自然恢复 20 年时增加了 17.3%，增长幅度趋缓。

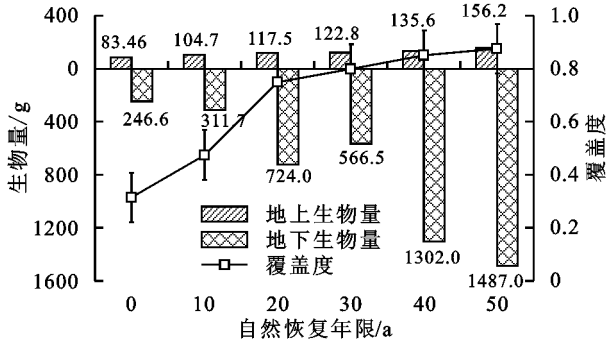
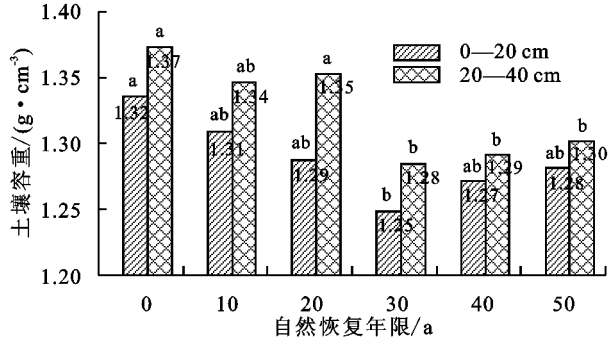


图 1 自然恢复序列梯度上退耕地植被群落生物量及覆盖度变化

2.2 自然恢复序列梯度上土壤容重变化

由图 2 可知，在自然恢复序列梯度上退耕地表层(0—20 cm 土层)土壤容重均小于下层(20—40 cm 土层)，其中在自然恢复初期(耕地)达到显著水平($P<0.05$)。不同自然恢复序列梯度上退耕地土壤容重表现为：在自然恢复 0～30 年期间土壤容重逐步降到谷底，自然恢复 30 年时其表层和下层土壤容重(1.25，1.28 g/cm^3)比自然恢复初期(1.33，1.37 g/cm^3)分别减小了 6.02%和 6.60%；其后表现为随自然恢复时间呈逐步增长趋势，在自然恢复 50 年时表层和下层土壤容重分别为 1.28，1.30 g/cm^3，已经恢复到自然恢复初期的 96.24%和 94.89%。总体来说，退耕地同一土层土壤容重在不同自然恢复序列梯度上差异显著($P<0.05$)，土壤容重随自然恢复序列表现先降低后增加的趋势；20—40 cm 土层土壤容重随自然恢复序列变化与 0—20 cm 土层略有差异，但其变化趋势基本一致；同一土层土壤容重在自然恢复序列 50 年(1.28，1.30 g/cm^3)与 40 年时(1.27，1.29 g/cm^3)差异已经不显著($P>0.05$)，说明退耕地各土层土壤容重在自然恢复 40 年后呈现逐步稳定趋势。



注：不同小写字母表示自然恢复序列梯度间差异呈显著水平($P<0.05$)。下同。

图 2 自然恢复序列梯度上退耕地土壤容重变化

2.3 自然恢复序列梯度上退耕地土壤孔隙变化

由表 2 可知，同一自然恢复序列梯度上下层土壤总孔隙度均低于表层，但除了退耕初期，其差异并不显著($P>0.05$)。自然恢复序列梯度上表层土壤总孔隙度在自然恢复 0～30 年期间土壤总孔隙度逐步升高，并在 30 年时达到峰值 52.94%，比自然恢复初期(49.68%)增加了 6.56%；其后呈逐步减小趋势。方差分析表明，在自然恢复 40 年与 50 年时土壤总孔隙度差异不显著($P>0.05$)，表明其呈现逐步稳定趋势。下层土壤总孔隙度变化与表层略有差异，但其变化趋势基本一致。

自然恢复序列梯度上土壤非毛管孔隙度变化呈现先增大后减小的趋势：在自然恢复 0～30 年期间逐

步升高,并在 30 年时达到峰值 29.37%,比自然恢复初期(7.81%)增加了 3.76 倍;其后呈逐步减小趋势,但 50 年时仍是自然恢复初期 2.78 倍。下层土壤总孔隙度变化与表层略有差异,但其变化趋势基本一致。同一自然恢复序列梯度上土壤非毛管孔隙度均表现为表层高于下层,其在自然恢复 0～20 年期间差异表现显著($P<0.05$),而在 20～50 年期间差异不显著($P>0.05$)。说明自然恢复前期对土壤非毛管孔隙度影响较大,自然恢复 30 年后其影响逐渐趋稳。自然恢复序列梯度上土壤非毛管孔隙度与土壤总孔隙度变化趋势基本一致。

自然恢复序列梯度上表层土壤毛管孔隙度变化呈现先减小后增大趋势:退耕初期土壤毛管孔隙度最大(41.87%),自然恢复 0～30 年序列土壤毛管孔隙度逐步减小,并在 30 年时达到低谷(23.57%),其值比自然恢复初期减小了 43.71%;其后呈逐步增加趋势。方差分析表明,在自然恢复 40 年与 50 年时土壤毛管孔隙度差异不显著($P>0.05$),表明其呈现逐步稳定趋势。下层毛管孔隙度变化与表层略有差异,但其变化趋势基本一致。同一自然恢复序列梯度上下层毛管孔隙度均高于表层,但其差异并不显著($P>0.05$)。土壤毛管孔隙度/总孔隙度与土壤毛管孔隙度变化趋势相一致,与土壤非毛管孔隙度和土壤总孔隙度变化趋势相反。

表 2　自然恢复序列梯度上退耕地土壤孔隙特征

恢复年限/a	土层深度/cm	指标			
		P_t/%	P_c/%	P_{nc}/%	P_c/P_t
0	0－20	49.68b	41.87a	7.81b	84.27a
	20－40	48.30b	43.02a	4.29b	89.07a
10	0－20	50.68ab	32.90ab	17.78ab	64.91ab
	20－40	49.28ab	33.83ab	15.45ab	68.65ab
20	0－20	51.47ab	29.64ab	21.83ab	57.59ab
	20－40	49.06b	31.12ab	16.50ab	63.43ab
30	0－20	52.94a	23.57b	29.37a	44.53b
	20－40	51.59a	24.25b	27.34a	47.00b
40	0－20	52.08ab	30.58ab	20.12ab	58.72ab
	20－40	51.32a	31.06ab	20.26ab	60.53ab
50	0－20	51.70ab	29.99ab	21.71ab	58.01ab
	20－40	50.94a	30.46ab	20.48ab	59.79ab

注:不同小写字母表示自然恢复序列梯度间差异的显著水平($P<0.05$)。下同。

2.4　自然恢复序列梯度上土壤蓄水性能变化

由表 3 可知,自然恢复序列梯度上表层土壤饱和蓄水量在自然恢复 0～30 年内土壤饱和蓄水量逐步升高,从恢复初期的 993.6 t/hm^2 升高到 30 年时的 1 059 t/hm^2,其后呈逐步减小趋势,在 50 年时降低到 1 034 t/hm^2。方差分析表明,在自然恢复 40 年与 50 年时土壤饱和蓄水量差异不显著($P>0.05$),表明其呈现逐步稳定趋势。下层土壤饱和蓄水量变化与表层略有差异,但其变化趋势基本一致。同一自然恢复序列梯度上下层土壤饱和蓄水量均低于上层,其差异并不显著($P>0.05$)。

表 3　自然恢复序列梯度上土壤蓄水性能

恢复年限/a	土层深度/cm	指标			
		W_t/(t·hm^{-2})	W_c/(t·hm^{-2})	W_{nc}/(t·hm^{-2})	W_c/W_t
0	0－20	993.6b	837.4a	156.2b	84.3a
	20－40	966.0b	860.4a	85.8b	89.1a
10	0－20	1014.0ab	657.9ab	355.7ab	64.9b
	20－40	985.6ab	676.6ab	309.0ab	68.7b
20	0－20	1029.0ab	592.8ab	436.6ab	57.6d
	20－40	952.4b	622.4ab	330.1ab	65.4c
30	0－20	1059.0a	471.4b	587.4a	44.5e
	20－40	1032.0a	484.9b	546.9a	47.0e
40	0－20	1014.0ab	611.6ab	402.4ab	60.3c
	20－40	1026.0ab	621.3ab	405.1ab	60.5d
50	0－20	1034.0ab	599.8ab	434.2ab	58.0d
	20－40	1019.0ab	609.2ab	409.6ab	59.8d

自然恢复序列梯度上表层土壤毛管蓄水量变化呈现先减小后增大趋势:退耕初期土壤毛管蓄水量最大(837.4 t/hm^2),自然恢复 0～30 年序列土壤毛管孔隙度逐步减小,并在 30 年时达到低谷(471.4 t/hm^2);其后呈逐步增加趋势。方差分析表明,在自然恢复 40 年与 50 年时土壤毛管蓄水量差异不显著($P>0.05$),表明其呈现逐步稳定趋势。下层毛管蓄水量变化与表层略有差异,但其变化趋势基本一致。同一自然恢复序列梯度上下层毛管蓄水量均高于表层,但其差异并不显著($P>0.05$)。

土壤非毛管蓄水量呈现先增大后减小的趋势,与土壤饱和蓄水量变化趋势基本保持一致,但其表层与下层在自然恢复 0～20 年期间差异表现显著($P<0.05$),在 20～50 年期间差异不显著($P>0.05$),说明自然恢复前期对土壤非毛管蓄水量影响更加突出,自然恢复 30 年后其影响逐渐趋稳。而土壤毛管蓄水量/土壤非毛管蓄水量在自然恢复初期表现的比较显著,在自然恢复 20 年后急剧降低,并在 20 年后保持在 1.4 和 1.5 左右而趋于稳定。

3　讨 论

3.1　自然恢复对土壤容重的影响

土壤容重是土壤物理性质中随着撂荒演替年限的变化较为敏感的指标。土壤容重的大小反映了不同植物群落对土壤水文物理性质(孔隙状况与涵蓄水能力)改善程度的高低[23],植被恢复通过增加地表凋落物和地下有机物(细根及根系分泌物)输入,从而显著降低土壤容重[24]。研究表明[25-26],植被恢复(自然或人工恢复)可以显著降低土壤容重,本研究中,黄土

丘陵区退耕地在自然恢复 0～30 年期间，土壤容重随着植被恢复显著减小，其变化说明植被恢复对降低土壤容重尤其是表层土壤容重作用显著；植被恢复对土壤容重的降低方式主要通过增加地表凋落物和地下有机物（细根及根系分泌物）输入[27]和增加土壤有机质。土壤蓄水性能与植被群落生物量相关性分析（表 4）表明，土壤容重与植被群落地上生物量呈显著正相关关系（$P<0.01$），而与群落地下生物量和植被覆盖度呈显著负相关关系（$P<0.01$），因群落地下生物量远远大于地上生物量，土壤容重与群落总生物量也呈显著负相关关系（$P<0.01$）。在自然恢复 30～50 年间，土壤容重增大并趋向稳定，可能是因为随着恢复年限的增加，其植被恢复到达瓶颈期，多年生植被趋于稳定，土壤有机质含量降低[11]。

表 4 土壤蓄水性能与植被群落生物量相关性分析（双尾检验）

指标	BD	P_t	P_c	P_{nc}	W_t	W_c	W_{nc}	$BM_{地上}$	$BM_{地下}$	$BM_{总}$	Cov.
BD	1.00										
P_t	−1.00**	1.00									
P_c	0.93**	−0.95**	1.00								
P_{nc}	−0.92**	0.95**	−1.00**	1.00							
W_t	−0.85*	0.87*	−0.93**	0.95**	1.00						
W_c	0.93**	−0.95**	1.00**	−1.00**	−0.93**	1.00					
W_{nc}	−0.92**	0.95**	−1.00**	1.00**	0.95**	−1.00**	1.00				
$BM_{地上}$	1.00**	−1.00**	0.95**	−0.95**	−0.87**	0.95**	−0.95**	1.00			
$BM_{地下}$	−1.00**	1.00**	−0.95**	0.95**	0.87*	−0.95**	0.95**	−1.00**	1.00		
$BM_{总}$	−0.88**	0.90**	−0.96**	0.97**	1.00**	−0.96**	0.97**	−0.90**	0.90**	1.00	
Cov.	−0.88**	0.88**	−0.82*	0.81*	0.7100	−0.82*	0.81*	−0.88**	0.88**	0.7400	1.00

注：* 表示 $P<0.05$；* * 表示 $P<0.01$；样本 $n=11$。

3.2 自然恢复对土壤孔隙特征的影响

土壤孔隙的大小、数量及分布是评价土壤结构特征的重要指标，其决定着土壤水分贮蓄量和贮蓄方式[12-13]。研究（表 4）表明，土壤容重与土壤总孔隙度呈极显著的负相关（$P<0.01$），土壤总孔隙、毛管孔隙、非毛管孔隙直接决定于土壤容重，间接受土壤有机质的影响[25]，土壤有机质对土壤容重影响很大[12]，间接地增加土壤总孔隙和非毛管孔隙度的含量。不同植被恢复阶段，表层土壤总毛管孔隙度和非毛管孔隙度的变化极其显著，土壤总孔隙和非毛管孔隙与植被群落地下生物量、总生物量和盖度之间呈显著正相关关系（$P<0.01$），与植被群落地上生物量呈显著负相关关系（$P<0.01$），说明伴随植被恢复，土壤毛管孔隙和非毛管孔隙度增加作用明显，其增加的原因在于植被自然恢复过程中，土壤有机质含量增加[26]，非毛管孔隙较粗大，一方面可以反映土壤的通气状况；另一方面在下雨时通气孔发达的土壤可以大量吸收降水，减少地表径流[12]，可以看出在植被自然恢复期间，土壤环境在一定程度上可以得到改善，非毛管孔隙度对地表径流的吸收也可以缓解该地区的水土流失。植被自然恢复对表层土壤毛管孔隙度的降低作用也极其显著，毛管孔隙中水的毛管传导率大，易于被植被吸收利用[12]，这也能在一定程度上改善了土壤生态环境，增加土壤蓄水量。

3.3 自然恢复对土壤蓄水性能的影响

土壤蓄水能力决定于土壤总孔隙大小[12]，研究表明，土壤蓄水性能主要决定于土壤容重、土壤孔隙度，土壤容重大，非毛管孔隙度减小，土壤蓄水量低；土壤容重小，非毛管孔隙度大，土壤蓄水量高[28]。黄土丘陵区表层土壤饱和蓄水量和非毛管蓄水量随恢复年限的增大含量增加，土壤容重与植被群落生物量相关性分析（表 4）表明，研究区的土壤容重随着植被恢复年限的增大而减小，土壤非毛管孔隙度和总孔隙度随植被恢复年限的增大而增大，这与以往的研究结果是一致的，即群落生物量增加，土壤容重减小，非毛管孔隙度增大，土壤蓄水量高；群落生物量减小，土壤容重增加，非毛管孔隙度减小，土壤蓄水量低。研究表明，黄土丘陵区通过多年的植被自然恢复能够提高土壤的蓄水能力，改善土壤的物理性质，缓解水土流失。

4 结 论

（1）黄土丘陵区退耕地植被自然恢复同一演替阶段不同土层之间表层土壤容重均小于下层土壤容重。各演替阶段表层土壤容重变化显著，退耕初期土壤容重有最大值，随后逐年下降在 30 年的自然恢复期降到最低值，表层到自然恢复中期土壤容重显著降低，而在自然恢复 30～50 年间，土壤容重逐步增大并趋向稳定。

（2）自然恢复过程中表层土壤总毛管孔隙度和非毛管孔隙度显著增大，且均在 30 年的自然植被恢复期达到峰值，说明退耕地自然植被恢复对总毛管孔隙度和非毛管孔隙度影响显著（$P<0.05$），且能显著提高表层总毛管孔隙度和非毛管孔隙度。自然恢复前

期对土壤非毛管孔隙度影响较大,自然恢复 30 年后其影响逐渐趋稳。

(3)不同自然恢复序列上土壤饱和蓄水量和非毛管蓄水量的变化显著,随退耕地植被自然恢复,饱和蓄水量和非毛管蓄水量增加明显,并且均在 30 年的自然植被恢复期达到峰值,而表层土壤毛管蓄水量在 30 年植被自然恢复期显著低于($P<0.05$)退耕初期土壤毛管蓄水量。自然恢复前期对土壤非毛管蓄水量影响显著,自然恢复 30 年后其影响逐渐趋稳。

(4)土壤容重和蓄水性能与植被恢复之间是一种相互依赖和制约的关系,二者的相互关系随着自然恢复序列的变化而变化。退耕初期,土壤容重和蓄水性能对植被的恢复和群落的演替作用大于植被对土壤容重和蓄水性能的作用,随着植被群落演替的进行,植被对环境的适应能力不断增强,它们之间的作用关系在改变,这种相互作用使植被群落以自己的方式在改变着土壤容重和蓄水性能,并使其逐步达到稳定。

参考文献:

[1] Dang X H, Liu G B, Xue S. Models of soil and water conservation and ecological restoration in the Loess hilly region of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(9): 72-80.

[2] 张保华,何毓蓉,程根伟. 贡嘎山东坡林地土壤低吸力段持水特性及其影响因素分析[J]. 西部林业科学,2006,35(1):49-51.

[3] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式[M]. 北京:中国水利水电出版社,1997.

[4] 蔡进军,蒋齐,张源润,等. 宁南山区典型旱作农耕地土壤特性分析[J]. 西北农业学报,2007,16(2):77-80.

[5] 马祥华,焦菊英,白文娟,等. 黄土丘陵沟壑区退耕地土壤养分因子对植被恢复的贡献[J]. 西北植物学报,2005,25(2):328-335.

[6] 张雷明,上官周平. 黄土高原土壤水分与植被生产力的关系[J]. 干旱区研究,2002,19(4):59-63.

[7] 郭忠升,邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J]. 生态学报,2003,23(8):1640-1647.

[8] 张雷明,上官周平,史俊通. 黄土区坡面水肥条件与植被建设[J]. 干旱区资源与环境,2001,15(4):68-74.

[9] 赵世伟,赵勇钢,吴金水. 黄土高原植被演替下土壤孔隙的定量分析[J]. 中国科学,2010,40(2):223-231.

[10] 李红,范素芳,张光灿,等. 黄土丘陵区退耕还林后不同林地土壤孔隙与贮水特性[J]. 水土保持通报,2010,30(1):27-30.

[11] 李裕元,邵明安,陈洪松,等. 水蚀风蚀交错带植被恢复对土壤物理性质的影响[J]. 生态学报,2010,30(16):4306-4310.

[12] 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.

[13] 侯贤清,贾志宽,韩清芳,等. 不同轮耕模式对旱地土壤结构及入渗蓄水特性的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(5):85-95.

[14] 莫菲,李叙勇,贺淑霞,等. 东灵山林区不同森林植被水源涵养功能评价[J]. 生态学报,2011,31(17):5009-5016.

[15] 聂卫波,武世亮,马孝义,等. 田块尺度土壤入渗特性空间变异研究[J]. 农业工程学报,2014,30(9):76-83.

[16] Hillel D. Application of soil physics[M]. New York: Academic Press, 1980: 385-426.

[17] Willians J, Prebble R E. The influence of texture structure andclay mineralogy on the soil moisture characteristic [J]. Soil Research, 1983, 21: 15-32.

[18] 李卓,吴普特,冯浩,等. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. 土壤学报,2010,47(4):611-620.

[19] 杨丽霞,陈少峰,安娟娟,等. 陕北黄土丘陵区不同植被类型群落多样性与土壤有机质、全氮关系研究[J]. 草地学报,2014. 22(2):291-298.

[20] 徐孝庆,胡沐钦. 林地综合效益计量评价[M]. 北京:中国林业出版社,1992:32-93.

[21] 刘明. 凤凰山林场小流域试验场林地土壤涵养水源效益研究[J]. 林业资源管理,1998(6):51-54.

[22] 孙艳红,张洪江,程金花,等. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报,2006,20(2):106-110.

[23] Liu X, Zhang G C, Gary C, et al. Fractal features of soil particle-size distribution as affected by plant communities in the forested region of Mountain Yimeng, China [J]. Geoderma, 2009, 154(1/2): 123-130.

[24] Cao C Y, Jiang D M, Teng X H, et al. Soil chemical and microbiological properties along a chronosequence of *Caragana microphylla* Lam. plantations in the Horqin sandy land of Northeast China [J]. Applied Soil Ecology, 2008, 40(1): 78-85.

[25] 庞学勇,刘庆,刘世全,等. 人为干扰对川西亚高山针叶林土壤物理性质的影响[J]. 应用与环境生物学报,2002,8(6):583-587.

[26] 谢锦升,杨玉盛,解明曙,等. 植被恢复对退化红壤轻组有机质的影响[J]. 土壤学报,2008,45(1):170-175.

[27] 于东明,胡小兰,张光灿,等. 江子河小流域不同植被类型土壤粒径的多重分形特征[J]. 中国水土保持科学,2011,9(5):79-85.

[28] 廖超林,傅灵艺,盛浩,等. 紫色丘陵区旱地撂荒自然恢复提高土壤蓄水性能[J]. 农业工程学报,2014,30(21):111-119.