

不同人工造林树种及其配置方式对 土壤理化性质影响分析

杨亚辉^{1,3}, 吕渡², 张晓萍^{1,2}, 木热提江·阿不拉²,
赵文慧², 蔺鹏飞^{1,3}, 于艺鹏²

(1. 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;
2. 西北农林科技大学 水土保持科学研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:人工造林是黄土高原改善生态环境,减少水土流失的重要手段。不同树种及其配置方式下地表植被的生长、土壤理化性质的差异影响着生态水文功能的强弱。以长武王东沟流域8种造林树种和不同配置径流小区为研究对象,采用样方法进行造林地及林下地表植被调查,分层采样测定0—40 cm土层土壤容重、孔隙度、有机质含量,分析不同人工造林模式下土壤理化性质,并初步分析了植被特征与土壤理化性质间的关系。结果表明:不同造林方式小区内林下草本层虽然覆盖度区别很大,但物种丰富度、多样性、均匀度指数差异不显著。0—20 cm表层土壤理化性质变异性小于20—40 cm土层。不同人工造林方式间土壤容重差异显著,且对20—40 cm层土壤的毛管孔隙度、总孔隙度有显著性影响。不同造林方式下草本层丰富度、多样性指数与林下土壤毛管孔隙度相关性显著。草本层丰富度、多样性与0—20 cm表层土壤的保水作用存在良好的对应关系。相比较而言,0—40 cm土壤剖面上,草地和侧柏刺槐混交林地下的土壤孔隙度和有机质等理化性质,以及相关的蓄水性 and 入渗性等生态水文功能要好于其他造林林种。

关键词:黄土高原; 人工造林; 造林方式; 林下草被; 土壤理化性质

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)06-0238-05

Impacts of Vegetation Types on Soil Physicochemical Properties

YANG Yahui^{1,3}, LÜ Du², ZHANG Xiaoping^{1,2}, Mureti Jiang Abula²,
ZHAO Wenhui², LIN Pengfei^{1,3}, YU Yipeng²

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The ecological environment in Loess Plateau is fragile and the soil erosion is sever. Afforestation is the important means to improve the ecological environment. Different plantation species and configuration modes affect physicochemical properties of soil and soil erosion. Eight runoff plots with various afforestation species and different configurations in Wangdonggou watershed located in Changwu were selected in this research, and quadrat method was used in understory vegetation ecological investigation. Soil bulk density, porosity, organic matter content in soil layer were measured; physicochemical properties were also analyzed under different artificial afforestation models. The results showed that the richness, diversity and evenness index of herb layer under different types of understory vegetation showed non-significant difference, and physical and chemical property difference in 20—40 cm soil layer was greater than that in the surface layer. The soil bulk densities in plots with various plantations were significantly different, and the vegetation cover had the significant effect on soil capillary porosity and total porosity in 20—40 cm layer. The capillary porosity had a markedly relation with the richness, diversity index of herb layer, so did total porosity and organic matter. In the 0—40 cm soil profile, grasses have a good ability to increase the water storage and infiltration. Herbaceous species richness and species diversity indices were passively correlated with water storage in topsoil.

收稿日期: 2017-01-06

修回日期: 2017-01-20

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“气候变化背景下黄土高原土地利用影响径流的空间尺度效应”(41230852); 国家自然科学基金项目“黄土高原典型流域水沙行为对土地利用/覆被变化响应规律研究”(41440012)

第一作者: 杨亚辉(1990—), 男, 河南开封人, 硕士研究生, 研究方向为植被恢复水分效应分析。E-mail: yyhnewsuaf@163.com

通信作者: 张晓萍(1971—), 女, 河南焦作人, 博士, 研究员, 主要从事区域水土流失规律和水土保持等研究。E-mail: zhangxp@ms.iswc.ac.cn

Keywords: Loess Plateau; different afforestation species; understory vegetation; soil physical and chemical properties

黄土高原位于半干旱半湿润地区,生态环境脆弱,暴雨集中,植被稀疏,土壤侵蚀剧烈^[1]。不科学的土地利用方式是造成该区水土流失严重的根本原因^[2]。植被是陆地生态系统的重要组成部分,植被的生长恢复是遏制黄土高原水土流失的关键因素和有效途径^[3]。土壤是生态系统中生态过程发生的场所,随植被生长演替其理化性质在不断发生变化^[4]。秦伟等^[5]将陕北黄土丘陵退耕封育区的植被演替过程分为 4 个时期,表明大约 20 a 后植被各项多样性指数趋于稳定。柴晓虹等^[6]分析了石羊河中下游不同退耕年限次生草地的土壤理化性质,认为随着退耕年限的增加,土壤含水量、有机碳等呈上升趋势;黄宇等^[7]评价了 3 种不同人工林系统的对土壤质量的影响,结果表明杉阔混交林相对于两者的纯林对土壤质量的改善作用更明显;蒋红梅等^[8]在祁连山东段研究了不同植被下土壤养分状况,认为乔木林的表聚效应强于灌丛和草地,随覆被从草地到灌木到乔木的变化,土壤有机碳等呈增加趋势;杨亚辉等^[9]研究了王东沟流域不同造林树种下的土壤容重、持水性能、有机质等性质,发现草本植物相对于乔木纯林和混交林的保水持水性能更好。人工造林是黄土高原改善生态环境,减少水土流失的重要手段,地表植被作为群落结构的重要组成部分,其盖度、物种多样性、丰富度等都在一定程度上决定着降雨截留、入渗等性质,从而影响产流产沙^[10]。尽管已有很多学者对黄土高原不同覆被及不同演替阶段下群落组成、物种多样性、土壤容重、孔隙度、团聚体、有机质等的变化做了大量研究^[11-15],但对不同人工林类型覆盖下草本群落组成与土壤理化性质等响应关系的报道较少。

本文以王东沟流域 8 个小区内不同人工林植被为研究对象,对各试验小区草本层进行盖度,多样性等调查,分析林下不同层次土壤理化性质,深入探讨不同人工造林方式对林下草本生长以及土壤性质的影响,深入理解不同人工造林树种及其配置方式下生态水文过程和功能差异,为区域生态环境建设提供科学依据。

1 研究区概况

王东沟流域隶属于陕西省长武县洪家镇王东村。位于黄土高原中南部,经纬度为 35°14'N,107°41'E,海拔 940~1 220 m。属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水 584 mm,年均气温 9.1℃,无霜期 171 d,地下水埋深 50~80 m。地带性土壤以黑垆土为

主,侵蚀作用下沟道中土壤是直接发育于黄土母质上的黄绵土,而地表 0—40 cm 深土壤质地以砂质壤土为主^[16]。于 2004 年,在流域内西南坡向海拔 1 150 m 的自然坡面修建 9 个试验小区,本文选取其中刺槐、油松、侧柏 3 种乔木纯林,油松和沙棘、侧柏和刺槐、油松和刺槐 3 种乔木混交林,以及沙棘灌木林 1 种,共 7 种覆盖类型和配置方式开展研究。同时草地小区作为对照。沙棘 (*Hippophae rhamnoides* Linn),刺槐 (*Robinia pseudoacacia*),油松 (*Pinus abuliformis* Carr.),侧柏 (*Platycladus orientalis* (L.) Franco) 等均为黄土高原常见退耕还林树种^[17-18]。小区垂直投影面积 100 m² (20 m×5 m),坡度 35°。各小区地表主要草种类型有:白羊草 (*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng),野古草 (*Arundinella anomala* Steud.),异叶败酱 (*Patrinia heterophylla*),翻白草 (*Potentilla discolor* Bge.),艾蒿 (*Ser. Abrotanum*),赖草 (*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvel.) 等。各个径流小区的基本资料统计见表 1。

表 1 各小区植被覆盖特征统计

植被类型	林龄/ a	株行距/ (m×m)	平均 株高/cm	郁闭 度	覆盖 度/%
草地	—	—	45	—	70
沙棘	10	1×1	190	—	74
油松	10	1×1	244	0.624	65
油松×刺槐	10	1×1	289	0.766	55
油松×沙棘	10	1×1	317	0.820	40
刺槐	10	1×1	339	0.150	77
侧柏×刺槐	10	1×1	282	0.400	23
侧柏	10	1×1	438	0.780	30

2 研究方法

2.1 试验小区草本植被调查及多样性测定

样地调查和采样时间为 2014 年 8 月 14—19 号。将小区分为上、中、下 3 部分,调查乔木及灌木的郁闭度、株高等,并分别随机选取 1 m×1 m 草地样方,记录样方内的草本种类以及每个种类的个体数、高度,调查其盖度等,见表 1。

采用重要值(IV)测定群落物种组成,重要值是对物种在群落中的功能地位进行综合量度的数量指标。

IV=RHI+RCO+RFE (1)

式中:RHI 为相对高度;RCO 为相对盖度;RFE 为相对频度。

$$RHI = \frac{H_i}{\sum_{i=1}^n H_i} \times 100 \quad (2)$$

式中： H_i 为样方中第 i 个物种的平均高度；RCO 与 RFE 的计算方法与此类似。

物种丰富度表示物种总数与样本含量的关系，选取 Margalef 指数 (D_{ma})：

$$D_{ma}=\frac{S-1}{\ln N} \tag{3}$$

式中： S 为样方内物种数目； N 为样方内所有物种的个体总数。

物种多样性是反映丰富度与均匀度的综合指标，选取 Simpson 指数 (D)、Shannon-Wiener 指数 (H)：

$$D=1-\sum_{i=1}^SP_i^2 \tag{4}$$

$$H=-\sum_{i=1}^SP_i\ln P_i \tag{5}$$

物种均匀度反应样方内物种的分布均匀情况，选取 Pielou 指数 (J_{sw})、Alatalo 指数 (E_a)：

$$J_{sw}=\frac{-\sum P_i\ln P_i}{\ln S} \tag{6}$$

$$E_a=\frac{\frac{1}{\sum P_i^2}-1}{\exp(-\sum P_i\ln P_i)-1} \tag{7}$$

$$P_i=\frac{N_i}{N} \tag{8}$$

式中： N_i 表示样方中第 i 个物种的个体数。

2.2 土壤理化性质测定

土壤容重和孔隙度等土壤物理特性，影响着土壤的透气、入渗和持水性能^[19]选择土壤容重、毛管孔隙度、总孔隙度和土壤有机质含量等指标来进行土壤理化性质的测定。。土壤有机质是衡量土壤肥力的重要指标^[20]，它直接影响土壤团聚体的形成过程，由此显著影响土壤的松紧程度和抗蚀抗冲性^[21]。

2.2.1 样品采集 于径流小区中部按 0—20, 20—40 cm 两个层次用环刀(高 5 cm, 直径 5 cm)取土, 各 10 个重复。随机取 5 次重复测定毛管持水量, 其他 5 组重复测定饱和持水量。另分别于两个层次取散状土用于测定土壤含水量和土壤有机质含量(均为 3 次

重复)。
2.2.2 测定方法 土壤容重、毛管孔隙度、总孔隙度和土壤有机质等土壤性质测量采用环刀法^[22]。土壤有机质含量测定采用重铬酸钾—外加热法。

3 结果与分析

3.1 不同造林树种与林下草本植被群落特征关系
分析不同覆被下郁闭度与覆盖度的关系如下：郁闭度与覆盖度基本呈现出负相关关系($y=-0.33x+67.61, R^2=0.17$)，即郁闭度越大，覆盖度越小。表明，人工造林条件下，受造林地树种冠幅及郁闭作用的影响，对林下阳光和雨水的遮蔽作用，林下草本不易生长。由表 2 可以看出，从组间看，地表草本层 5 项指标统计 8 个不同试验小区之间无显著性差异($p>0.05$)。林下草本的丰富度 Margalef 指数油松沙棘混交林地最大，侧柏刺槐混交林地最小，这两者组间具有显著性差异($p<0.05$)。多样性指数 Simpson 和 Shannon-wiener 指数表现一致，均为刺槐林地最大，侧柏刺槐混交林最小，油松刺槐混交林次之。均匀度指标 Pielou 指数和 Alatalo 指数表现为油松刺槐混交林最大，草地最小。趋势上：丰富度指数表现出混交林地<沙棘灌木林地<乔木林地<草地的趋势；多样性指数表现为混交林地<草地<沙棘灌木林地<乔木林地的趋势；均匀度指数表现出草地<沙棘灌木林地<混交林地=乔木林地的趋势。

草地小区无乔灌木的影响，生长稠密(盖度大)，丰富度高，由于繁殖方式多为分根茎法，导致其物种分布均匀性差，表现为 Pieloe 和 Alatalo 指数最低，最终是多样性指数较小；乔灌林地可能由于枯枝落叶以及灌层的遮挡作用，使草本种类较少，丰富度地，均匀度相对提高^[23]。可见不同造林树种林下草本层虽然盖度不同(表 1)，但与草地小区比，其基本群落性质和分布状态基本一致，不同人工造林树种下的生境差异，导致林下草本植被生长的差异。

表 2 不同覆被草本物种丰富度、多样性和均匀度指数

植被类型	Margalef(D_{ma})	Simpson(D)	Shannon-Wiener(H)	Pielou(J_{sw})	Alatalo(E_a)
草地	1.57(0.12)	0.59(0.10)	1.33(0.19)	0.61(0.12)	0.54(0.09)
沙棘	1.32(0.32)	0.71(0.05)	1.39(0.14)	0.83(0.07)	0.82(0.06)
油松	1.42(0.25)	0.73(0.06)	1.49(0.18)	0.83(0.03)	0.79(0.04)
油松×刺槐	1.13(0.08)	0.66(0.07)	1.31(0.15)	0.78(0.04)	0.72(0.08)
油松×沙棘	1.69(0.57)	0.73(0.05)	1.47(0.20)	0.89(0.07)	0.84(0.06)
刺槐	1.49(0.21)	0.75(0.07)	1.59(0.23)	0.80(0.10)	0.81(0.09)
侧柏×刺槐	0.89(0.21)	0.54(0.27)	1.02(0.49)	0.72(0.25)	0.74(0.20)
侧柏	1.23(0.75)	0.64(0.25)	1.37(0.63)	0.76(0.20)	0.75(0.21)
ANOVA 显著性	0.28	0.58	0.59	0.34	0.13

注：括号内数值为标准差，下同。

3.2 不同植被覆盖下土壤理化性质

从表 3 可知,8 种不同覆被下土壤容重变化范围为 1.31~1.17 g/cm³,为弱变异(CV<10%)。不同土层各小区容重组间具有显著性差异($p<0.05$)。0—20 cm 和 20—40 cm 土层最大土壤容重均出现在油松刺槐混交林地,为 1.31 g/cm³,显著高于其他覆被小区。草地、沙棘、和侧柏 3 个试验小区 20—40 cm 土壤容重与 0—20 cm 相比明显增大,草地与沙棘小区由于地表覆被茂密,根系集中于表层,影响了剖面土壤容重的分布^[12],侧柏小区则可能由于化感作用导致禾本科植被数量少,表层土壤受其他扰动影响较大。从方差分析看,随着深度的加深,不同覆被小区土壤容重变异系数减小,统计上土壤容重性质趋于一致。这与随着土层的加深,外在扰动减弱相对应。

土壤毛管孔隙度和总孔隙度均为中等变异(0.1<CV<1)。毛管孔隙度变化范围为 41.1%~50.3%,最大值出现在刺槐地和油松刺槐混交林地的 20—40 cm 土层,见表 3。总孔隙度变化范围在 47.4%~58.0%,表层略高于 20—40 cm 土层,这与李裕元等^[24]在神木的研究一致。草地小区在 0~20 cm,20~40 cm 的剖面上均表现出最大的总孔隙度。单因素分析得到:毛管孔隙度及总孔隙度在 0—20 cm 土层,不同小区间差异性不显著($p>0.05$),而在 20—40 cm 土层,不同小区间表现出显著性差异($p<0.05$)。外在环境的扰动作用减弱了植被对孔隙度的

影响作用。0—40 cm 的土层上,沙棘表现出最大的毛管孔隙度 48.5%,小区内沙棘枝杈分布密集,株高接近 2 m,树下草被覆盖度高达 74%。草被根系主要集中在地表 20 cm^[25]。另据党晓宏等^[26]研究,沙棘为深根植物,根系可以达地下 137 cm。根系的分布使沙棘小区剖面上毛管孔隙度较高。草地表现出最大的总孔隙度为 57.0%。

土壤大孔隙的多少表征了土壤水分入渗状况^[27]。土壤大孔隙越多,土壤水分及物质输移能力越强,同样有利于土壤呼吸作用以及根系的生长^[28]。CP/TP 值代表毛管孔隙度占总孔隙度的比例,同时也表现大孔隙的分布状况,CP/TP 越小,毛管孔隙占总孔隙的比例越小,大孔隙分布越多。表 3 显示 CP/TP 值与土壤容重呈现不明显的对应关系。0—40 cm 土壤剖面上,侧柏刺槐混交林地和草地有较小的 CP/TP 值。两个小区可能由于没有或者较少的乔灌层的存在,表层土壤直接蒸发作用较大,因此表现出较高的总孔隙度和 CP/TP 值,利于水分传入深层土壤。

0—20 cm 土层土壤有机质高于 20—40 cm,和有机碳在土壤剖面上的垂直变化相同^[29]。0—40 cm 土层上,不同试验小区覆被下,土壤有机质整体上差异不显著,但草地和沙棘小区有机质含量显著高于其他试验小区。由于禾本科植被数量多,根系浅而密集,以及枯枝落叶物较厚等因素,其生存有利于土壤有机碳的积累^[30]。

表 3 不同覆被下土壤理化性质测定

植被 类型	土壤容重/(g·cm ⁻³)		毛管孔隙度(CP)/%		总孔隙度(TP)/%		CP/TP/%		有机质含量/(g·kg ⁻¹)	
	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm
草地	1.17(0.05)c	1.21(0.06)b	46.0(2.4)	44.9(3.8)cd	58.0(3.6)	55.9(3.0)a	79.3	80.2	13.6	10.8
沙棘	1.18(0.09)c	1.23(0.04)b	47.5(4.1)	49.5(1.4)ab	54.2(6.9)	52.1(3.3)ab	87.5	95.0	10.7	9.0
油松	1.22(0.07)bc	1.22(0.06)b	47.4(3.4)	46.8(3.6)abc	50.0(3.0)	52.0(4.6)ab	95.0	90.1	10.8	6.6
油松×刺槐	1.31(0.04)a	1.31(0.04)a	44.3(5.2)	50.0(3.3)a	52.6(2.1)	50.6(3.0)bc	84.1	98.7	8.7	6.8
油松×沙棘	1.24(0.04)b	1.20(0.05)b	45.3(6.6)	42.9(4.0)cd	55.1(1.5)	53.4(5.0)ab	82.2	80.4	8.6	8.6
刺槐	1.23(0.07)bc	1.21(0.09)b	44.8(3.5)	50.3(3.1)a	54.8(5.6)	51.0(5.2)bc	81.9	98.7	10.2	7.7
侧柏×刺槐	1.21(0.06)bc	1.17(0.05)b	43.7(3.8)	41.1(1.7)d	53.2(3.3)	53.5(2.2)ab	81.8	76.8	11.2	8.7
侧柏	1.18(0.03)c	1.21(0.04)b	44.9(1.5)	45.7(1.5)bc	50.5(2.9)	47.4(2.2)c	89.0	96.7	8.3	8.4
ANOVA 显著性	0.000	0.000	0.750	0.000	0.070	0.011				
变异系数/%	3.69	3.28	11.6	11.1	12.3	14.1				

注:相同字母表示无显著性差异(Duncan 多重比较 $p<0.05$)。

3.3 植被与土壤理化性质各指标相关性分析

对各小区草本层植被与不同深度土壤各理化性质测定指标进行相关性分析,见表 4。在 0—20 cm 土层内,Margalef 指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数均只与毛管孔隙度呈显著性正相关关系,相关系数分别是 0.709,0.776,0.755。土壤容重、总孔隙度和有机质对植被群落特征和物种多样性的影响不显著,这与魏天兴

等^[31]在吴起的研究结果一致。在 20—40 cm 土层内,土壤的 4 个理化性质与 Margalef 指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数和 Alatalo 指数均不相关。土壤层次超过一定深度后,植被根系对于土壤性质的改善和提高的作用会受到一定程度的限制^[32],所以可能会导致植被指数与土壤性质之间的关联性降低。而草本植被的生长增加了地表凋落物和土壤有机物质,根

系的活动也会对土壤的孔隙结构产生影响,可以明显的改善土壤的持水能力和入渗特性,因此,草本植被丰富度、多样性指数越高,土壤毛管孔隙度越多,越有利于土壤对水分的保存及供给作用。

表 4 草本植被与土壤理化性质各指标 Pearson 相关性分析

多样性 指数	土壤容重		毛管孔隙度		总孔隙度		有机质	
	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm
D_{ma}	-0.15	-0.870	0.709 *	0.127	0.50	0.02	0.11	0.234
D	0.25	0.240	0.776 *	0.498	-0.07	-0.164	-0.40	-0.489
H	0.07	0.178	0.755 *	0.608	0.11	-0.004	-0.23	-0.279
J_{sw}	0.38	0.125	0.530	0.108	-0.47	-0.428	-0.69	-0.605
E_{qt}	0.25	-0.670	0.400	0.057	-0.52	-0.498	-0.65	-0.576

注:“*”表示具有相关性($p<0.05$)。

4 结论

(1) 油松沙棘混交林地草本层丰富度、均匀度指数最好,表现出较高的毛管孔隙度,和较低的总孔隙度;侧柏刺槐混交林地草本层丰富度、多样性指数最差,具有较高的总孔隙度和 CP/TP 值。

(2) 草地、沙棘小区均表现出较低的土壤容重、较高的土壤有机质,但沙棘小区具有最高的毛管孔隙度,而草地具有较高的总孔隙度和 CP/TP 值。由于草本层的影响,各小区 20—40 cm 的土壤性质差异大于 0—20 cm;0—40 cm 土壤剖面上,草地和侧柏刺槐混交林地蓄水性强、入渗性能好,油松、侧柏纯林蓄水性和入渗性能均最差;油松、侧柏和沙棘、刺槐混交林、刺槐和沙棘纯林蓄水透水性能居中。

(3) 不同的人工林覆被下的草本植物群落多样性指数、物种丰富度指数与表层土壤毛管孔隙度相关性显著,与土壤的保水性能存在良好的对应关系。改善林下草本植被生长状况有利于土壤性质的改良。

参考文献:

[1] 张宝庆,吴普特,赵西宁.近 30a 黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析[J].农业工程学报,2011,27(4):287-293.

[2] 焦居仁,乔殿新.退耕还林(草)的成功实践与思考[J].中国水土保持,2000(7):1-2.

[3] 秦伟,朱清科,刘中奇,等.黄土丘陵沟壑区退耕地植被自然演替系列及其植物物种多样性特征[J].干旱区研究,2008,25(4):507-513.

[4] 阿守珍,卜耀军,温仲明,等.黄土丘陵区不同植被类型土壤养分效应研究:以安塞纸房沟流域为例[J].西北林学院学报,2006,21(6):58-62.

[5] 秦伟,朱清科,刘中奇,等.黄土丘陵沟壑区退耕地植被自然演替系列及其植物物种多样性特征[J].干旱区研究,2008,25(4):507-513.

[6] 柴晓虹,王理德,姚拓,等.石羊河中下游不同退耕年限次生草地土壤理化及生物学特性研究[J].草业学报,2015,24(8):24-34.

[7] 黄宇,汪思龙,冯宗炜,等.不同人工林生态系统林地土壤质量评价[J].应用生态学报,2004,15(12):2199-2205.

[8] 姜红梅,李明治,王亲,等.祁连山东段不同植被下土壤养分状况研究[J].水土保持研究,2011,18(5):166-170.

[9] 杨亚辉,赵文慧,蔺鹏飞,等.不同植被对土壤理化性质影响:以王东沟小流域为例[J].水土保持通报,2016,36(1):249-252.

[10] 王升,王全九,董文财,等.黄土坡面不同植被覆盖度下产流产沙与养分流失规律[J].水土保持学报,2012,26(4):23-27.

[11] 秦伟,朱清科,张宇清,等.陕北黄土区生态修复过程中植物群落物种多样性变化[J].应用生态学报,2009,20(2):403-409.

[12] 刘中奇,朱清科,秦伟,等.半干旱黄土区自然恢复与人工造林恢复植被群落对比研究[J].生态环境学报,2010,19(4):857-863.

[13] Li Y Y, Shao M A. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China[J]. Journal of Arid Environments, 2006,64(1):77-96.

[14] Xu M, Zhang J, Liu G B, et al. Soil properties in natural grassland, *Caragana korshinskii* planted shrubland, and *Robinia pseudoacacia* planted forest in gullies on the hilly Loess Plateau, China[J]. Catena, 2014,119(1):116-124.

[15] 魏强,凌雷,柴春山,等.甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质[J].生态学报,2012,32(15):4700-4713.

[16] 毛天旭.黄土塬区王东流域产流产沙过程研究[D].陕西杨凌西北农林科技大学,2012.

[17] 杨建伟,梁宗锁,韩蕊莲.黄土高原常用造林树种水分利用特征[J].生态学报,2006,26(2):558-565.

[18] 及金楠,张志强,郭军庭,等.黄土高原刺槐和侧柏根系固坡的有限元数值模拟[J].农业工程学报,2014,30(19):146-154.

[19] 郑纪勇,邵明安,张兴昌.黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J].水土保持学报,2004,18(3):53-56.

[20] 朱祖祥.土壤学[M].北京:农业出版社,1983.

- [20] 程积民,邹厚远.封育刈割放牧对草地植被的影响[J].水土保持研究,1998,5(1):36-54.
- [21] 屠敏仪,刘国栋.红黄壤地区草山草坡资源:几种高效开发利用技术对策研究[J].草业科学,2000,17(3):7-11.
- [22] 范春梅,廖超英,李培玉,等.放牧强度对林草地土壤物理性状的影响:以黄土高原丘陵沟壑区为例[J].中国农业科学,2006,39(7):1501-1506.
- [23] 马德仓,常富礼,梁必升,等.黄土丘陵区生态修复项目实施效果分析与思考[J].水土保持研究,2008,15(1):238-240.
- [24] 刘库,谢应忠,李云,等.宁夏南部黄土丘陵区天然退化草地改良效果的研究[J].畜牧与兽医,2006,38(8):1-3.
- [25] Hobbs R J, Huenneke L F. Disturbance, diversity, and invasion: implications for conservation[J]. Conservation biology, 1992, 6(3): 324-337.
- [26] Dumont B, Farruggia A, Garel J P, et al. How does grazing intensity influence the diversity of plants and insects in a species-rich upland grassland on basalt soils [J]. Grass and Forage Science, 2009,64(1):92-105.
- [27] 张长庆,张文辉.黄土高原不同立地条件下刺槐人工林种群的无性繁殖与更新[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(1):135-144.
- [28] 周立华,朱艳玲,黄玉邦.禁牧政策对北方农牧交错区草地沙漠化逆转过程影响的定量评价[J].中国沙漠,2012,32(2):308-313.
- [29] 刘艳华,王磊,王彦庚,等.禁牧前后宁夏盐池县农民主体收益结构对比[J].水土保持研究,2007,14(3):355-357.
- [30] 程积民,井赵斌,金晶炜,等.黄土高原半干旱区退化草地恢复与利用过程研究[J].中国科学:生命科学,2014,44(3):267-279.
- [31] 张颖,吴丽莉,苏帆,等.森林碳汇研究与碳汇经济[J].中国人口·资源与环境,2010,20(3):288-291.
- [32] 邓蕾.黄土高原生态系统碳固持对植被恢复的响应机制[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [33] 陈先刚,张一平,詹卉.云南退耕还林工程林木生物质碳汇潜力[J].林业科学,2008,44(5):24-30.
- [34] 王正淑,王继军,刘佳.退耕地林草植被碳汇及与农业生态经济系统的关系:以陕西省县南沟流域为例[J].草地学报,2016,24(2):263-269.
- [35] 顾文,赵阿丽,徐健,等.基于碳汇生产理念下的县南沟流域退耕还林工程实施效果评价[J].水土保持研究,2014,21(2):144-151.
- [36] 谭广潮,宋维龙.关于在黄土丘陵地区发展畜牧业的思考[J].草食家畜,2008(1):7-9.
- [37] 谢高地,肖玉,鲁春霞.生态系统服务研究:进展、局限和基本范式[J].植物生态学报,2006,30(2):191-199.
- [38] 王磊.不完全产权视角下的退耕还林补偿标准及期限研究[J].生态经济,2009(9):159-162.
- [39] 何念鹏,王秋凤,刘颖慧,等.区域尺度陆地生态系统碳增汇途径及其可行性分析[J].地理科学进展,2011,30(7):788-794.

~~~~~

(上接第242页)

- [21] 张勇,庞学勇,包维楷,等.土壤有机质及其研究方法综述[J].世界科技研究与发展,2005,27(5):72-78.
- [22] 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.
- [23] 陈廷贵,张金屯.山西关帝山神尾沟植物群落物种多样性与环境关系的研究. I:丰富度、均匀度和物种多样性指数[J].应用与环境生物学报,2000,6(5):406-411.
- [24] 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):4306-4316.
- [25] 李建兴,何丙辉,湛芸,等.不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J].农业工程学报,2013,29(10):144-152.
- [26] 党晓宏,高永,汪季,等.砒砂岩沟坡沙棘根系分布特征及其对林下土壤的改良作用[J].中国水土保持科学,2012,10(4):45-50.
- [27] 牛健植.长江上游暗针叶林生态系统优先流机理研究[D].北京:北京林业大学,2003.
- [28] Germann P, Beven K. Water flow in soil macropores. I: An experimental approach[J]. Journal of Soil Science, 1981,32(1):1-13.
- [29] 刘效东,乔玉娜,周国逸.土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J].植物生态学报,2011,35(12):1209-1218.
- [30] 张玉岱.生草对渭北苹果园土壤有机碳的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [31] 魏天兴,赵健,朱文德,等.退耕还林区水土保持植被恢复及物种多样性特征[J].西北林学院学报,2013,28(1):1-6.
- [32] 李鹏,李占斌,鲁克新.黄土区草本植被根系与土壤垂直侵蚀产沙关系研究[J].植物生态学报,2006,30(2):302-306.