晋西黄土区长期人工林恢复对土壤水分和养分性质的影响

熊瑛楠，冯天骄，王 平，吴旭东

（北京林业大学水土保持学院，北京 100083）

摘要：黄土高原地区是我国水土流失和环境问题严重的地区之一，人工植被恢复可以有效改善土壤性质，提高土壤质量，明确长期人工植被恢复后土壤水分和养分性质的响应差异，有利于进一步有效改善生态环境。选取晋西黄土区自然恢复的次生林地、人工刺槐林地、人工油松林地 3 种典型植被恢复类型为研究对象，通过测定土壤物理性质以及有机碳、氮磷钾元素含量等土壤养分，对比分析长期不同人工林恢复条件下的差异。结果表明：(1)次生林地、刺槐林地和油松林地在 0—20 cm 浅层土壤的容重分别 1.15，1.04，1.06 g/cm^3，次生林地的容重最大，土壤容重随着土层深度的增加而增大；(2)次生林地在浅层的土壤水分状况优于刺槐林地和油松林地，土壤水分消耗期(生长季开始前)过渡到积累期(生长期开始)时，次生林土壤水分动态变化更剧烈；(3)次生林地土壤碳储量较高，油松林地土壤氮、磷储量较高。3 种林地土壤养分垂直变化差异显著，且均具有明显的表聚性，有机碳、全氮、全磷、速效氮和速效钾含量均随着土层深度的增加而减少，而速效磷含量随着土层深度的变化表现为先增大再减小。以水养条件为依据，建议在植被恢复过程中多以保育次生林为主来达到较好的水碳储量等生态效益，有利于优化晋西黄土区的林分管理，促进植被恢复和生态建设。

关键词：晋西黄土区；植被恢复；土壤物理性质；土壤水分；土壤养分

中图分类号：S152.7$^+$5；S158.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1009-2242(2022)02-0228-10

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.02.029

Effects of Long-term Artificial Forest Restoration on Soil Moisture and Nutrient Characteristics in the Loess Area of Western Shanxi Province, China

XIONG Yingnan, FENG Tianjiao, WANG Ping, WU Xudong

(*College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083)

Abstract: The Loess Plateau has always been one of the most serious soil erosion and environmental problems regions in China. Artificial vegetation restoration can effectively improve soil properties and soil quality, therefore clarifying the responses of soil moisture and nutrient properties to long-term artificial vegetation restoration is conducive to further effectively improving the eco-environment. This study selected three typical vegetation types, including natural restoration secondary forest land, artificial *Robinia pseudoacacia* forest land and artificial *Pinus tabulaeformis* forest land, during ecological restoration in the loess region of western Shanxi. By measuring soil physical properties, soil moisture contents and soil nutrients such as organic carbon, nitrogen, phosphorus and potassium contents, the differences under the long-term artificial vegetation restorations were comparatively analyzed. The results showed that: (1) The soil bulk density of secondary forest land, *Robinia pseudoacacia* forest land and *Pinus tabulaeformis* forest land in 0—20 cm shallow layer was 1.15, 1.04 and 1.06 g/cm^3, respectively. The soil bulk density increased with the increase of soil depth. (2) The soil moisture of secondary forest land in shallow layer was better than those of *Robinia pseudoacacia* forest land and *Pinus tabulaeformis* forest land. When soil moisture consumption period (before the start of growth season) transited to the accumulation period (at the beginning of the growth season), the dynamic variations of soil moisture in secondary forest land were more dramatic. (3) The soil carbon storage in secondary forest land was higher, while the soil nitrogen and phosphorus storage in *Pinus*

收稿日期：2021-08-13

资助项目：国家自然科学基金项目(41901021，11802032)；生态学会托举项目(STQT2020A01)；北京林业大学杰出青年人才培育项目(2019JQ03002)；中国科协青年人才托举工程项目(2019-2021QNRC001)

第一作者：熊瑛楠(1997—)，女，硕士研究生，主要从事生态水文学研究。E-mail：hsiunyn@163.com

通信作者：王平(1988—)，男，博士，副教授，博士生导师，主要从事环境生态水力学研究。E-mail：wangp@bjfu.edu.cn

tabulaeformis forest land was higher. The vertical variations of soil nutrients of the three forest lands had significant differences with accumulation in surface layer. The contents of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, available nitrogen and available potassium all decreased with the increase of soil depth, while the contents of available phosphorus increased first and then decreased. Considering the soil moisture and nutrient condition, it was suggested that the secondary forest should be mainly conserved in the process of vegetation restoration to achieve the better water and carbon storage and other ecological benefits, which would be conducive to the optimization of stand management, and the promotion of vegetation restoration and ecological construction in the western Shanxi loess region.

Keywords: Loess area of West Shanxi; vegetation restoration; soil physical properties; soil moisture; soil nutrients

由于自然因素和人类活动的综合影响,黄土高原地区的生态环境十分脆弱,水土流失严重,风沙危害频繁,是我国乃至世界范围内水土流失最严重的地区之一。晋西黄土区长期以来遭受严重的水土流失、土壤侵蚀和植被退化等问题,为了改善生态环境,防治土壤侵蚀,解决植被退化问题,该区开展了大规模的植被恢复措施,营造了大面积的人工林。植被恢复可以有效减少土壤侵蚀和提高土壤质量,是治理黄土高原水土流失的有效生物措施,也是我国重大的生态工程,在黄土高原水土保持和生态环境建设中占据重要地位[1]。植被在恢复过程中与土壤相互作用,通过地表凋落物以及地下根系部分的影响,改善土壤的物理性状,增加土壤生物的生物量及活性。这个过程必然导致土壤结构、水分及养分特征等理化性质产生变化,因此,不同植被类型的土壤理化特性具有显著差异性。同时,随着植被恢复进程的推进,通过一系列次生演替阶段所形成的次生林也具有重要的生态保护作用,研究次生林和人工林条件下的土壤属性变异,对于优化黄土高原植被恢复措施和促进生态环境改善具有重要意义。

近几年,国内外许多学者对不同植被类型下的土壤理化性质及养分特征进行了大量研究。首先,已有相关研究表明植了被类型对土壤性质的改良和影响。例如,蔡楚雄等[2]在科尔沁沙地南缘研究了不同植被对土壤物理性质的改良作用表明,相比裸沙地,植被能明显改善当地土壤物理性质;张晓霞等[3]研究了晋西黄土区退耕 22 年后形成的 3 种典型乔木林分的土壤物理性质变化,指出自然恢复林对土壤物理性质的影响大于人工林。同时,对于不同植被类型下的水分特征也有相关研究。李航等[4]研究了不同植被类型条件下土壤的有效水和持水能力,证明了刺槐林的有效水分和土壤持水能力都较低;袁杰等[5]对高寒区不同植被类型枯落物和土壤持水性能进行分析后发现,土壤各理化指标都不同程度地影响了各植被类型的持水性能,其中土壤容重和砂含量粒越大,相应的土壤持水能力越差,土壤粉砂、黏粒含量、总孔隙度及有机碳含量越大,相应的土壤持水能力越好。另外,植被恢复对不同土层土壤性质的影响差异显著。万雪琴[6]对植被恢复后改土效应的研究表明,不同的植被恢复模式下土壤有机碳增加的速度和在土壤不同深度的分布有较大差异,有机碳主要集中分布在表层土中,而土壤全氮含量表现为土壤上层大于下层;田宁宁等[7]在晋西黄土区对土壤养分和根系密度进行调查发现,3 种水土保持林地土壤养分和植物根系密度密切相关:土壤有机碳和全钾质量分数与根系密度变化趋势一致,全磷质量分数与根系密度变化趋势不明显。关于植被恢复过程中土壤水分的时空变化规律,也受研究者广泛关注。曹奇光[8]选择了 3 种人工林纯林及其混交林,通过分析比较各林地的土壤水分时空动态变化,得出混交林比纯林更能够充分利用土壤水分的结论。王国梁等[9]测量了不同土地利用方式下 500—1 000 cm 土层间的土壤水分后发现,平均含水率呈农田>草地>灌木林>林地的趋势;邹俊亮[10]对黄土高原小流域植被恢复过程中土壤水分变化的研究表明,土壤水分在不同土壤类型下的垂直分布特征具有明显差异,同一土壤类型下的土壤水分受植被类型的影响显著,且植被类型的不同对表层土壤水分状况影响较小,而对深层土壤水分的影响较显著。最后,关于不同植被条件下的土壤综合分析相对较少,焦菊英等[11]研究了黄土丘陵沟壑区不同恢复方式下植被群落的土壤水分和养分特征指出,封禁自然恢复植物群落的土壤水分、养分含量高于人工林地,且无管理下的自然恢复植物群落及农田土壤水分和全磷质量分数较高,而土壤有机碳、全氮、有效氮、全磷和速效钾含量较低。

植被能够改善土壤理化性质,且不同植被类型对土壤养分的改良效果不同。目前,黄土高原典型森林生态系统在次生林和人工林类型条件下,植被对土壤物理性质、土壤水分和养分特征的综合比较和分析的

研究还不够深入。为了解决这一问题，本研究选择晋西黄土区的典型小流域，选取自然恢复的次生林、人工刺槐林、人工油松林为研究对象，采用 EnviroSMART 土壤水分定位监测系统观测土壤水分，采集土样，对土壤物理性质和养分进行测定，分析比较不同植被类型下的土壤理化性质和养分变化，探讨植被对土壤质量的综合影响，以选出林下土壤水养条件较好的植被类型，为晋西黄土区等半干旱地区未来植被恢复树种的选择和可持续经营提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站(110°27′—111°07′E，35°53′—36°21′N)位于黄河中游黄土高原东南部半湿润地区的山西省临汾市，属黄土高原残塬沟壑区和梁峁丘陵沟壑区。森林植物地带属于暖温带半湿润地区，褐土，落叶阔叶林。根据吉县气象站观测资料，多年平均年降水量为 579.1 mm，其中最大年降水量达 828.9 mm(1956 年)，最小年降水量 277.7 mm(1997 年)，最大降水变率为 43.11%，6—9 月降水量一般占全年降水量的 70%，年平均蒸发量 1 729 mm。多年平均气温 9.9 ℃，绝对最高气温 38.1 ℃，绝对最低气温 −20.4 ℃，≥10 ℃的积温 3 358 ℃。光照充足，多年平均光照时间为 2 563.8 h，平均无霜期为 172 天。

吉县地势呈东高西低倾斜，海拔 440～1 820 m，黄河河谷最低。大部分地形为典型黄土高原侵蚀地形。土壤类型为褐土，可分为 3 个亚类：丘陵褐土、普通褐土和淋溶褐土。由于严重的水土流失，原始土壤已极少存在，目前所见到的土壤基本上是黄土母质本身。黄土斜坡、梁顶、塬面等为第三系红土和第四系黄土组成，厚度十米至数十米，沟底为淤积黄土母质；沟坡坡脚为塌积黄土母质，底层常混有红胶土母质。

山西吉县属暖温带褐土阔叶林地带向森林草原地带的过渡地带。常见的木本植物有 194 种，分属 49 科；草本植物 180 种，分属 44 种(不包括农作物)。天然次生植被主要有辽东栎(*Quercus liaotungensis* K.)、槲栎(*Quercus aliena* B.)、山杨(*Populus davidiana* D.)、白桦(*Betula platyphylla* S.)、旱柳(*Salix matsudana* K.)等。人工植被主要有油松(*Pinus tabuliformis* C.)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、山杨(*Populus davidiana* D.)、侧柏(*Platycladus orientalis* L.)、白榆(*Ulmus pumila* L.)等。农作物以玉米、小麦、谷子、豆类为主。人工营造的水土保持防护林主要以刺槐、油松、侧柏等树种形成的纯林及各种类型的混交林。下层灌木有沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* T.)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata* L.)等灌木及白草(*Pennisetum flaccidum* G.)等，荒草坡有蒿类(*Artemisia* L.)、枸杞(*Lycium chinense* M.)、黄刺梅(*Rosa xanthina* L.)等。

1.2 研究方法

在对研究流域植被进行调查的基础上选择有代表性的次生林地、刺槐林地、油松林地为观测样地，特别注意采样地点选择与样品采集的合理性。在当地根据地形、林龄和植被类型选择具有典型代表性的区域作为采样地点，分别在 3 种植被类型样地下分散随机选择 3～5 处采样点，以达到科学合理、随机、代表性和典型性强的取样方式。对不同植被类型下的土壤理化指标进行对比。各样地的实际尺寸、具体情况、植被状况、地理信息见表 1。

表 1 样地基本概况

林地类型	土质	坡向	坡度/(°)	海拔/m	经纬度	树高/m	林龄/a	林分密度/(株·hm^{-2})	郁闭度/%	主要植被
次生林地(山杨×辽东栎)	粉壤土	阴坡	18	1081	N36°16′ E110°44′	5.36	20	1075	40	山杨(*Populus davidiana* D.)、辽东栎(*Quercus liaotungensis* K.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana* D.)、矮苔草(*Carex humilis* L.)等
刺槐林地	粉壤土	阴坡	25	1358	N36°03′ E110°75′	7.86	15	1325	80	刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、陕西荚蒾(*Viburnum schensianum* M.)、黄刺玫(*Rosa xanthina* L.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum* L.)等
油松林地	粉壤土	阴坡	22	1371	N36°04′ E110°75′	4.20	19	1600	71	油松(*Pinus tabulaeformis* C.)、陕西荚蒾(*Viburnum schensianum* M.)、黄刺玫(*Rosa xanthina* L.)、丛生隐子草(*Cleistogenes caespitosa* K.)、三脉紫菀(*Aster ageratoides* T.)、裂叶堇菜(*Viola dissecta* L.)等

1.2.1 *数据采集与测定* 土壤水分监测和数据收集方法：在 3 种林地 0—100 cm 土层内埋设 EnviroSMART 土壤水分定位监测系统。EnviroSMART 土壤水分定位监测系统由 1 个探测管、5 个土壤水分探头、1 个 CR200 数据收集器和 1 组电瓶组成。5 个土壤水分探头在 0—100 cm 土层内每隔 20 cm 布设

1 个,以每 30 min 监测 1 次的频度对次生林地、刺槐林地、油松林地的土壤水分进行实时监测。这些土壤水分探头安装在轨道上后装入事先布设在林地的探测管中,每个土壤水分探头与 CR200 数据采集器连接,观测数据保存在 CR200 数据采集器中,本研究使用的生长季动态数据是于 2019 年 1—11 月的监测数据。

采用 EnviroSMART 监测 0—100 cm 土层中各层的体积含水量的动态变化过程,土壤蓄水量根据土壤体积含水量与土层厚度计算,具体计算公式为:

$$W=h\cdot\theta_v\times 10/100$$

式中:W 为土壤蓄水量(mm);h 为土层深度(cm);θ_v 为土壤体积含水量(%)。

土壤样品收集与测定方法:在流域内选择天然次生林、人工刺槐林和人工油松林 3 种植被类型的典型样地。在 3 个林地内分别在坡中位置各设 3 个点取样,为了保持取样点的代表性,取样点的坡向坡度接近,避免因立地条件不同而导致土壤水分差异。在 2019 年 8 月中旬进行采样,以尽量不破坏小区为前提,采取 0—100 cm 内每 20 cm 土层取样土壤样品,每个土层取 3 次重复以表示各林地内土壤养分状况,代表性样地的取样方法、时间、分布位置和处理方法保持一致。具体采样层次为 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm,用 100 cm^3 环刀在每层中间取原状土样,每个剖面分层采集土样 3 个,每次取样后用取样袋带回实验室进行化验和测定。其中,有机碳用油浴加热消煮—重铬酸钾法,全氮采用凯氏蒸馏法测定,全磷采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法,速效氮采用碱解扩散法,速效磷采用 0.5 mol/L 的 $NaHCO_3$ 溶液浸提—硫酸钼锑抗混合比色法,速效钾用醋酸铵浸提—火焰光度计法测定。

在 2019 年 8—11 月测定 3 个林地的土壤物理性质,用环刀采集原状土来测定土壤容重,测定方法用烘干法,在 105 ℃烘箱内烘干至恒重,待冷却后称重,计算土壤容重。土壤机械组成用湿筛法分析,再计算出不同粒径区间所占的百分比。

1.2.2　*处理方法*　测定 3 种人工林内土壤各土层的水分、氮、磷、钾含量并进行化学计量分析,利用 Excel 2010 进行数据整理,利用 SPSS 25.0 软件进行单因素方差分析法(ANOVA),采用描述性统计和方差分析等方法对数据进行处理,相关数据采用平均值±标准差(mean±SD)来表示,同一因素不同水平间差异显著性采用最小显著差数法(LSD)进行检验,显著性水平 $P\leqslant 0.05$。采用 Sigma Plot 10.0、Canoco 5.0、R 4.0.5 软件制图。

2　结果与分析

2.1　不同植被类型长期恢复条件下的土壤物理性质差异

土壤容重可以反映植被对土壤物理性质的改良程度。从表 2 可以看出,次生林地的容重大于其他林地,随着土层深度的增加,土壤容重增大,总体表现为表层(0—20 cm)的容重均小于深层(40 cm 以下)土层。各林地的土壤机械组成均为粉粒含量显著大于砂粒和黏粒。在各植被类型的 0—40 cm 土层的土壤中,土壤机械组成的变化基本一致,各林地粉粒含量随着土层深度的增加而增加,但不显著,表层 0—20 cm 土层的砂粒含量高于 20—40 cm 土层。

表 2　不同植被类型条件下各土层的土壤机械组成

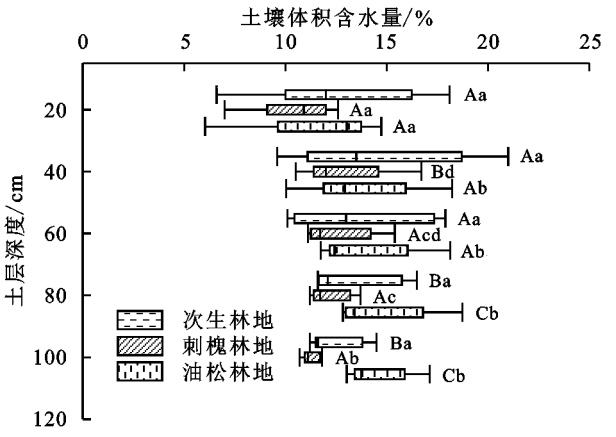
土层深度/cm	次生林地				刺槐林地				油松林地			
	容重/(g·cm^3)	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	容重/(g·cm^3)	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	容重/(g·cm^3)	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%
0—20	1.15	6.8	88.0	5.2	1.04	4.9	88.7	6.5	1.06	7.4	85.9	6.8
20—40	1.19	3.7	90.3	6.0	1.01	2.3	90.0	7.7	1.16	5.0	87.3	7.7
40—60	1.30	1.7	90.7	7.6	1.15	4.0	88.4	7.6	1.16	7.3	86.7	6.0
60—80	1.32	2.7	91.2	6.1	1.22	2.0	90.3	7.7	1.21	4.3	88.0	7.7
80—100	1.42	2.0	92.1	5.9	1.30	2.3	90.0	7.7	1.14	7.7	86.3	6.0

注:砂粒、粉粒和黏粒含量的分级为 2～0.05,0.05～0.002,<0.002 mm。

2.2　不同植被类型长期恢复条件下的土壤水分状况对比

从图 1 和表 3 可以看出,不同植被类型条件下土壤的水分状况的差异显著,0—100 cm 土层中油松林地的平均含水量最高,达 13.46%,蓄水量为 134.6 mm;次生林地次之,为 13.10%,蓄水量为 131.0 mm;刺槐林地平均含水量最低为 11.82%,蓄水量为 118.2 mm,3 种林地在土层深层(40—100 cm)土层蓄水量差异更显著。

对比次生林地、刺槐林地和油松林地各层土壤蓄水量进行分析可得,相比次生林地和油松林地,刺槐林地的总土壤蓄水量更低,其中浅层(0—40 cm)次生林地和油松、刺槐林地该段土层蓄水量分别为 54.0,46.6,50.0 mm;而 60—100 cm 土层的蓄水量比较为油松(57.4 mm)>次生林(50.6 mm)>刺槐(46.4 mm)。总体而言,次生林和油松林地的土壤蓄水量优于刺槐林地。



注：不同大写字母表示同一土层不同植被类型之间差异显著（$P<0.05$）；不同小写字母表示同一植被类型不同土层之间差异显著（$P<0.05$）。

图 1 不同植被类型下各土层土壤含水量

2.3 不同植被类型长期恢复条件下的土壤水分时空变化规律

2.3.1 土壤水分垂直变化规律 图 2 为次生林地、刺槐林地、油松林地 0—100 cm 土层中平均含水量随土层深度的变化。从整体上看，在 0—40 cm 土层范围 3 个林地的土壤含水率表现为次生林地＞油松林地＞刺槐林地；随着土层深度的增加，在 40—100 cm 土层范围 3 个林地的土壤含水率却表现为油松林地＞次生林地＞刺槐林地。即在土壤浅层次生林地含水量最高，刺槐林地含水量始终最低，而在较深的土层处油松林地含水量最高。随着土层深度的变化，次生林地、刺槐林地、油松林地在 0—20 cm 至 20—40 cm 土层的土壤含水量变化波动最大，结果均表明在不同植被条件下 0—100 cm 土层中土壤水分的变化在浅层相对剧烈。

表 3 次生林地、刺槐林地、油松林地的土壤含水量

林地类型	土壤含水量/%					蓄水量/mm
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	60—80 cm	80—100 cm	
次生林地	12.6	14.4	13.2	13.1	12.2	131.0
刺槐林地	10.4	12.9	12.6	12.0	11.2	118.2
油松林地	11.4	13.6	13.6	14.4	14.3	134.6

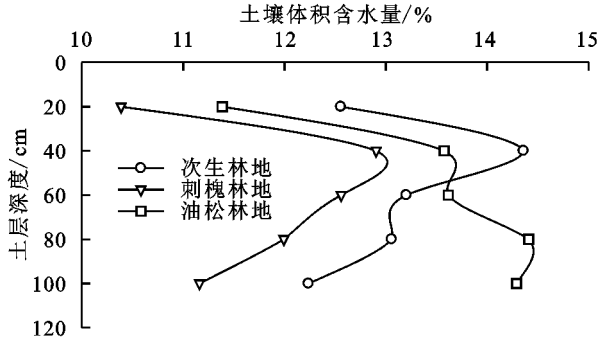


图 2 不同植被类型条件下土壤含水量随土层深度的变化

在次生林地土壤剖面上 0—100 cm 土层的含水量的变化趋势为随土层深度的增加先增大再减小，0—40 cm 土层范围随土层深度的增加而增大，40—100 cm 土层范围随土层深度的增加而减小。

刺槐林地 0—100 cm 土层的含水量随土层深度的增加先增加再减小，与次生林地的变化趋势一致。具体表现为在 0—40 cm 土层的含水量随土层深度的增加而逐层递增，40—100 cm 土层的含水量随土层深度的增加而逐层递减。刺槐林地表层 0—20 cm 的土壤含水量最低，仅为 10.4%；20—40 cm 处的土壤含水量为 12.9%，是刺槐林地整个土壤剖面中土壤含水量的最高值。结合土壤物理性质数据（表 2），20—40 cm 土层容重变小，说明该层土壤孔隙数量多，保墒能力强，土壤水分状况较好，故 20—40 cm 土层处土壤含水量高。

油松林地 0—100 cm 土层含水量变化的总体趋势为土壤含水量随土层深度的增加而增加。表层 0—20 cm 的土壤含水量最低，仅有 11.4%，60—80 cm 土层的含水量最高，为 14.4%。可能是因为油松根系主要分布在 0—60 cm 的土层中[12]，植被蒸腾作用消耗水分导致含水量低，油松林地表层土壤含水量低，形成干层，抑制下层水分的蒸发。

2.3.2 土壤水分时间变化规律 图 3 为次生林地、刺槐林地、油松林地在 1—11 月 0—100 cm 土层含水量动态变化规律。根据研究地区次生林地、刺槐林地、油松林地各月份 0—100 cm 土壤水分的动态变化可以划分为土壤水分消耗期、土壤水分积聚期、土壤水分消退期。1—5 月为土壤水分消耗期，油松林地的平均含水量为 11.7%，高于次生林地和刺槐林地，次生林地和刺槐林地的平均含水量相差不大，1 月由于温度低可能会出现土壤冻结现象，因此降水难以补充给土壤，此时各林地的土壤含水量均为监测期间内的最低值。6—7 月为土壤水分积聚期，次生林地、刺槐林地和油松林地的土壤平均含水量分别为 18.3%，14.6%，17.2%，3 种林地的土壤含水量均有所增加，其中次生林地在 7 月达到监测期间土壤含水量的最大值（22.8%），这是由于 7 月降雨量为 124.5 mm，较前几个月的降雨量有明显增大，在一定程度上使土壤水分得到了补偿，土壤水分的补给大于消耗，所以土壤含水量不断增加。8—11 月为土壤水分消退期，其中 8—9 月气温较高，蒸散作用较为强烈，降雨补给土壤中的水分小于因蒸散作用消耗掉的土壤水分，此期间次生林地、刺槐林地和油松林地的土壤含水量分别减少 1.6%，1.0%，0.2%，次生林地消退最多，油松林地消退最少；10—

11 月期间降水很少,次生林地、刺槐林地和油松林地的土壤含水量分别维持在 12.6%,11.0%和 13.2%。

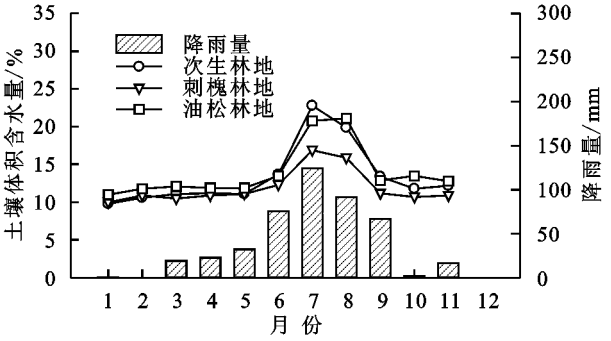


图 3　不同植被类型条件下土壤水分动态变化

2.4　不同植被类型长期恢复条件对土壤养分垂直分布的影响

2.4.1　不同植被类型条件下土壤剖面上养分含量比较　从表 4 可以看出,在不同植被类型的林地下土壤养分含量有所不同。土壤有机碳和速效氮含量均为次生林地>油松林地>刺槐林地,有机碳含量依次为 31.436,27.388,22.144 g/kg,速效氮含量依次为 12.04,9.83,9.62 mg/kg。全氮含量、全磷含量、速效磷含量均为油松林地>刺槐林地>次生林地,油松林地的全氮、全磷、速效磷含量高于其他林地。全氮含量依次为 2.281,1.587,1.400 g/kg,全磷含量依次为 2.851,0.655,0.604 g/kg,速效磷含量依次为 87.20,61.14,43.7 mg/kg。次生林地、刺槐林地、油松林地的速效钾含量分别为 495.981,486.692,507.180 mg/kg,差异不大。

从图 4 还可看出,油松林地全氮和全磷含量分别为 2.281,2.851 g/kg,具有较高的氮素供应水平,且土壤能为植物吸收的磷量最高,而次生林地的氮素供应水平较低;次生林地、刺槐林地和油松林地之间的速效钾含量差异很小;次生林地土壤有机碳含量最大,为 31.436 g/kg,油松林地次之,刺槐林地土壤有机碳含量最低。

表 4　不同植被类型下土壤剖面养分含量

植被类型	土层深度/cm	有机碳/(g·kg^{-1})	全氮/(g·kg^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})	速效氮/(mg·kg^{-1})	速效磷/(mg·kg^{-1})	速效钾/(mg·kg^{-1})
次生林地	0—20	11.95±0.131Cd	0.49±0.006Ae	0.19±0.030Ac	3.08±0.217Bb	7.73±0.279Ab	155.36±0.453Cd
	20—40	7.27±0.421Cc	0.41±0.004Ad	0.13±0.009Ab	2.99±0.216Cb	9.35±0.224Ac	107.18±0.448Bc
	40—60	4.08±0.165Aab	0.11±0.005Aa	0.06±0.008Aa	2.68±0.346Bb	18.65±0.89Bd	70.08±0.471Aa
	60—80	4.36±0.465Bb	0.17±0.004Ab	0.13±0.015Ab	1.74±0.157Aa	4.24±0.566Aa	81.40±0.287Bb
	80—100	3.77±0.436Ba	0.23±0.006Ac	0.10±0.019Ab	1.55±0.146Aa	3.74±0.423Aa	81.96±0.252Ab
刺槐林地	0—20	6.74±0.923Bd	0.49±0.006Ad	0.15±0.025Abc	2.45±0.161Ad	14.61±0.445Cc	107.53±0.322Ad
	20—40	5.31±0.210Ac	0.44±0.009Bc	0.11±0.008Aab	2.12±0.127Acd	17.81±0.303Bd	79.09±0.125Ab
	40—60	4.70±0.433Bb	0.21±0.004Ba	0.10±0.010Aa	1.92±0.131Abc	14.24±0.184Ac	77.20±0.223Ba
	60—80	2.58±0.425Aa	0.21±0.005Ba	0.17±0.026Ac	1.65±0.09Aab	9.38±0.572Bb	101.61±0.327Cc
	80—100	2.82±0.462Aa	0.25±0.003Bb	0.13±0.007Bab	1.48±0.135Aa	5.10±0.203Ba	121.26±0.325Ce
油松林地	0—20	4.82±0.570Aa	0.69±0.011Be	1.17±0.094Bc	2.22±0.225Abc	13.70±0.349Bc	140.36±0.402Be
	20—40	6.29±0.707Bc	0.47±0.003Cc	0.73±0.184Bb	2.54±0.147Bc	36.45±0.395Ce	111.39±0.534Cd
	40—60	5.15±0.423Cab	0.52±0.005Cd	0.74±0.240Bb	2.08±0.172Abc	24.24±0.268Cc	88.20±0.507Cb
	60—80	5.59±0.505Cb	0.33±0.006Cb	0.12±0.019Aa	1.64±0.155Aab	5.08±0.528Aa	78.23±0.276Aa
	80—100	5.54±0.325Cb	0.26±0.004Ca	0.10±0.006Aa	1.35±0.301Aa	7.73±0.459Cb	89.01±0.213Bc

注:土壤养分含量均为平均值±标准误差;不同大写字母表示同一土层不同植被类型之间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一植被类型不同土层差异显著($P<0.05$)。

2.4.2　不同植被类型条件下的土壤养分随土层变化规律　从图 5 可以看出,土壤养分在不同植被类型下的垂直分布特征具有明显差异,但各养分总体上呈波动性和表聚性。次生林地的有机碳含量、全氮含量、全磷含量、速效氮含量、速效钾含量均表现为 0—20 cm>20—40 cm>40—60 cm 土层,在 40—60 cm 土层处又增加,即随着土层深度增加先减小再增加,在 0—20 cm 土层含量最大;而速效氮的含量始终随着土层深度增加而减小,在表层 0—20 cm 土层含量最大,80—100 cm 土层含量最小;速效磷含量随着土层深度增加先增加再减小,在 40—60 cm 土层含量最大。

刺槐林地土壤养分随土层深度的变化趋势与次生林地相似。其中,有机碳含量、全氮含量、速效氮含量均在表层达到最大值;全磷含量在 60—80 cm 土层处最大;速效磷在 20—40 cm 土层处最大;速效钾含量在 80—100 cm 土层处达到最大。

油松林地的有机碳含量与次生林地、刺槐林地有机碳含量的垂直分布不一致,次生林地和刺槐林地土壤有机碳的垂直分布均为随土层深度增大而递减,而油松林地 0—60 cm 土层和 60—100 cm 土层的有机碳含量随土层深度的增加先增加再减小,20—40 cm 为整个土壤剖面上有机碳含量最高的土层,0—20 cm 为整个土壤剖面上有机碳含量最低的土层;全氮含量、全磷含量、速效钾含量在土壤表层含量最大,随

土层深度的增加逐渐减小，其中全磷含量垂直分布的波动性大于次生林地和刺槐林地；速效氮含量和速效磷含量随土层深度的增加先增加再减小，均在 20—40 cm 的含量最高。

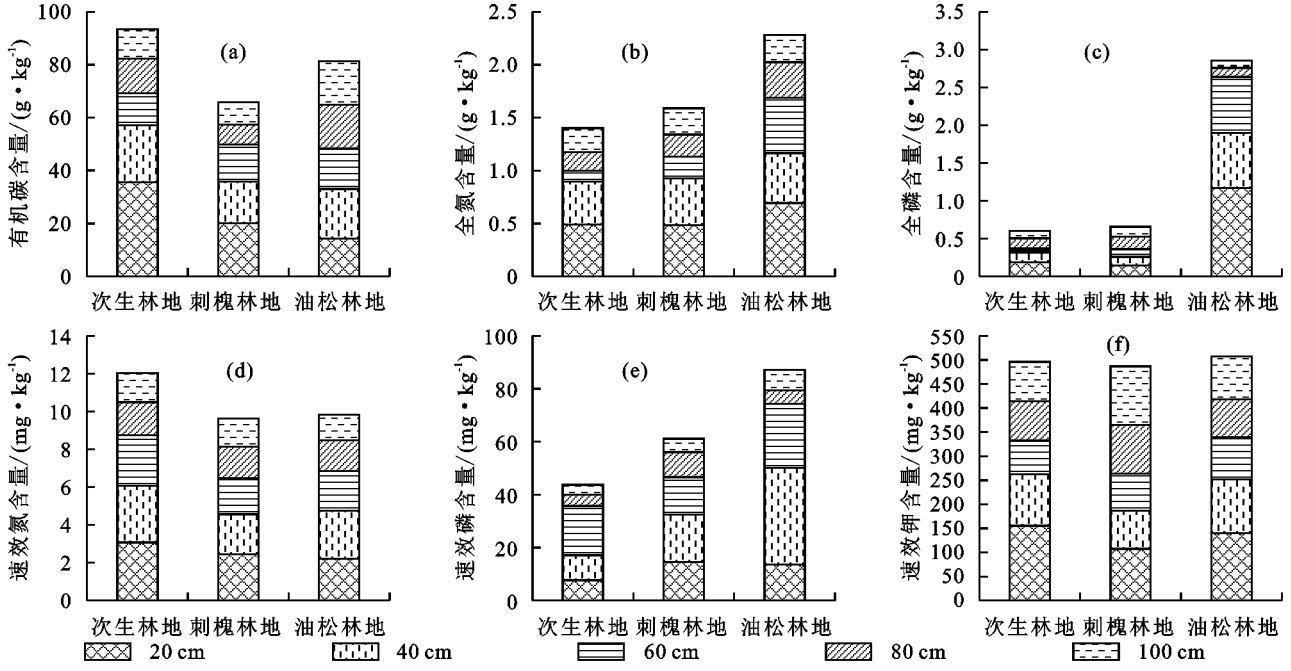


图 4 不同植被类型条件下各土层土壤养分含量比较

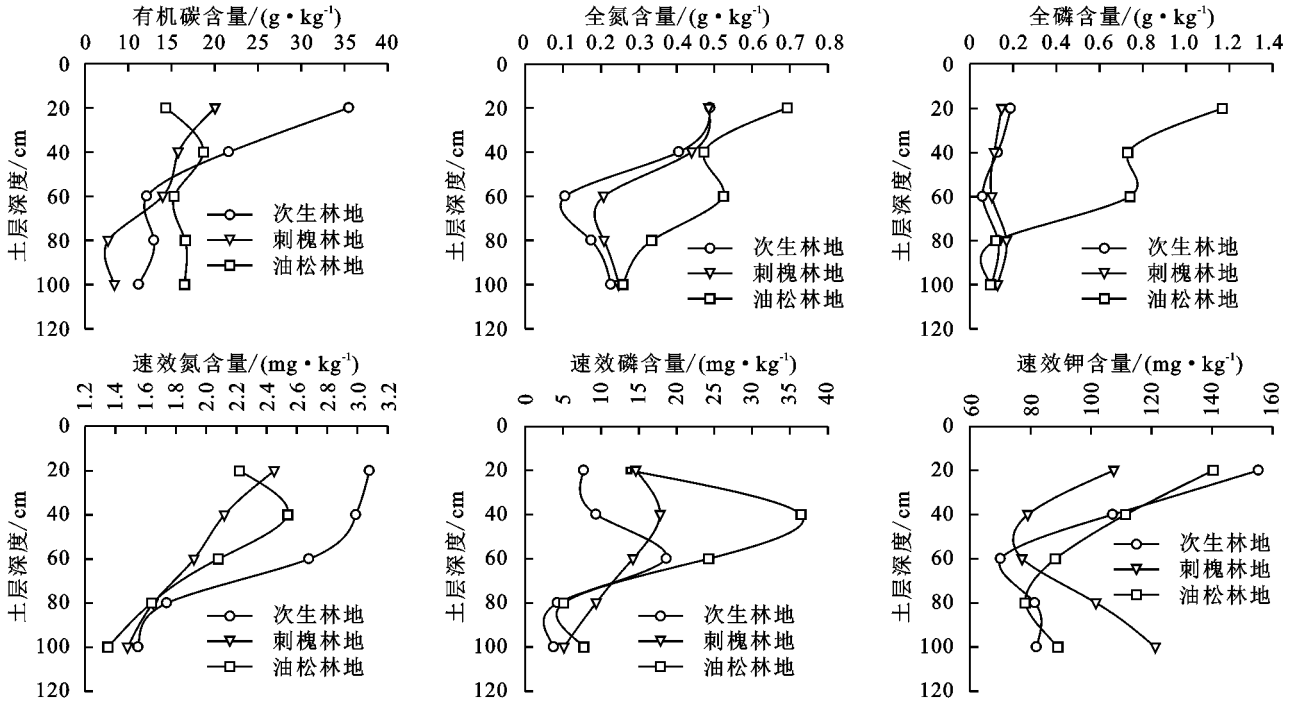
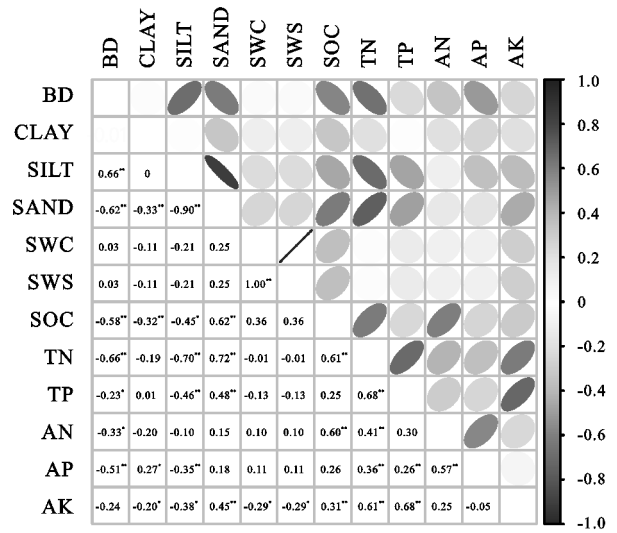


图 5 不同植被类型土壤剖面养分随土层深度的变化

2.5 土壤物理性质与土壤养分的相互关系

以次生林地、刺槐林地和油松林地内各土壤物理性质与其土壤各养分含量之间进行相关矩阵分析和冗余分析。由图 6 和图 7 可知，土壤各养分均与土壤容重、粉粒、黏粒分异较大，呈负相关关系，而与土壤砂粒分布接近。从土壤物理性质与土壤养分相关系数来看，土壤容重与有机碳、全氮、速效磷均呈极显著负相关，与全磷、速效氮呈显著负相关；土壤黏粒与砂粒、有机碳呈极显著负相关，与速效钾呈显著负相关，同时与速效磷呈显著正相关；土壤粉粒与砂粒、全氮、全磷、速效磷呈极显著负相关，与有机碳、速效钾呈显著负相关；土壤砂粒与有机碳、全氮、全磷、速效钾呈极显著正相关；土壤含水率、土壤蓄水量与速效钾呈显著负相关，其他养分与土壤水分无显著相关性。从土壤各养分间的相关性来看，有机碳与全氮、速效氮、速效钾呈极显著正相关，全氮与速效氮、速效磷呈极显著正相关，同时，全氮、全磷、速效钾两两间呈极显著正相关。



注:BD 为土壤容重;CLAY 为土壤黏粒;SILT 为土壤粉粒;SAND 为土壤砂粒;SWC 为土壤含水量;SWS 为土壤蓄水量;SOC 为土壤有机碳;TN 为全氮;TP 为全磷;AN 为速效氮;AP 为速效磷;AK 为速效钾;左下三角形里的数字表示相应变量之间的斯皮尔曼相关系数(r),与右上三角形中的椭圆短轴的宽度成正比(宽度越窄,r 越大);深色和浅色分别表示相关性显著和不显著,* 和 * * 表示相关系数分别达 0.05 和 0.01 水平。

图 6　土壤各理化性质之间的相关矩阵

3　讨　论

3.1　长期植被恢复条件下土壤物理性质的差异

经过长期植被恢复后的土壤地表覆被变化受到植被根系、地表枯落物等的影响,容重、含水量等土壤持水性相关的物理性质较植被恢复前有一定差异,主要表现为改善土壤结构和持水能力[13]。很多学者[1]已经证明植被可以显著改变土壤的物理结构和养分特征,且不同的植被类型由于其生长方式不同,对土壤性质的影响也不同。本研究对比长期不同植被恢复下的土壤容重发现,次生林地和油松林地 0—20 cm 表层土壤容重均低于更深层的土壤。如谭学进[14]对黄土区延河流域近 40 年来植被恢复对土壤容重等土壤物理性质指标的影响研究结果表明,植被对土壤物理性质的改善效应随土层深度的增加而减弱,植被恢复显著降低土壤容重,提高土壤孔隙度和 >0.25 mm 团聚体含量。陈建宇[15]对杉木林下植被生物量与土壤容重关系的研究表明,林下植被的生长有利于减小土壤容重,且对降低表层土壤容重的作用较为显著,增加土壤孔隙度,扩大根系的分布深度。所以,植被对改善土壤容重有重要作用。

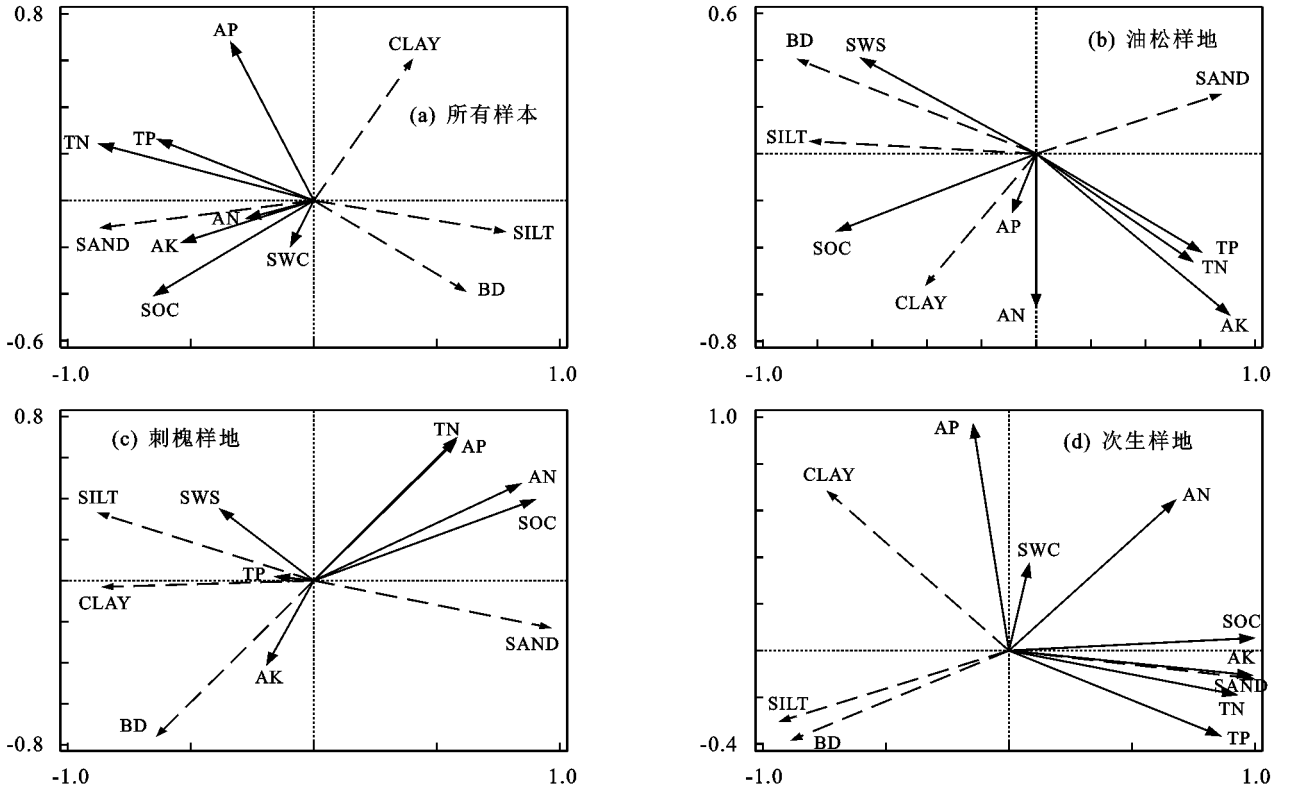


图 7　不同植被类型条件下土壤性质冗余分析

3.2　长期植被恢复条件下土壤水分的差异

本研究对比了次生林地、刺槐林地、油松林地的土壤水分状况差异,结果显示 3 种林地在 0—100 cm 土层的土壤含水量均有显著差异,次生林地土壤浅层含水量高于刺槐林地和油松林地,且在 7—8 月随着降雨量的增加土壤水分开始进入积累期,这与赵文智等[16]的研究结果一致,生长季内降水量的大小对水分补给深度有着显著的影响,土壤水分的变化主要取决于降水量的变化,同时降水的季节分布格局也直接影响不同整地方式土壤水分的动态。本研究对 3 种

林地土壤水分时间变化规律的对比分析发现，刺槐林地的土壤水分状况受降水的影响小于次生林地和油松林地，这是因为刺槐叶片面积大，冠层对降雨的截留能力强，影响降水的再分配过程。于洋等[17]的研究表明，植被自身的属性也是影响水分变化的重要因素，通过冠层截留、树干茎流以及植被蒸腾耗水等水文循环过程来影响土壤水分的动态变化；Loik 等[18]对旱地生态系统中植物和土壤微生物群落的土壤水分供应的研究说明植被的冠层截留是影响降水进入土壤中的第 1 个环节，乔木冠层能够截留小的降水事件产生的降水，使乔木的土壤水分动态几乎不受小降水事件的作用。本研究对土壤水分在不同植被类型下的垂直分布特征的结果表明，在土壤浅层次生林地含水量最高，刺槐林地含水量始终最低，而在较深的土层处油松林地含水量最高，这与赵荣玮等[19]的研究结果一致。油松林地土壤浅层水分低于次生林地和刺槐林地，可能是因为油松的地上植被覆盖率低，导致表层的蒸散发大，主要消耗土壤浅层的水分。如李登武等[20]对油松自毒作用的研究发现，油松叶的乙酸乙酯提取物会抑制油松生长，且对周围植物产生影响，这样的情况导致林下缺少植被层覆盖而增加土壤表面蒸发；王志强等[21]的研究还表明，在不同植被类型之间，天然植被土壤的干燥化程度小于人工林植被。在本研究中刺槐林地的土壤含水量始终低于次生林地和油松林地，可能是由于刺槐林地的林分密度过高，林地土壤水分得不到补充，导致土壤水分亏缺。这与孙中峰等[22]的研究结论一致，刺槐林分的土壤水分还受到植被郁闭度、胸径、林分生产量等因子的影响。

3.3 长期植被恢复条件下土壤养分的差异

本研究对比不同植被类型下的土壤物理性质和土壤养分含量发现，3 种林地的容重随着土层深度的增加而增加，有机碳含量随着土层深度的增加而减少，即土壤容重与有机碳含量之间呈负相关关系。土壤容重过大导致植被根系无法正常生长，从而影响根系吸收土壤中的的营养元素。本研究对次生林地、刺槐林地和油松林地内各土壤物理性质与土壤养分的相关矩阵分析显示，土壤容重与各土壤养分的分异较大，均呈负相关关系，其中土壤容重与有机碳、全氮、速效磷的相关系数达到极显著水平，远高于其他土壤养分。土壤养分含量越高，土壤容重越小，彭文英等[23]的研究支持了这一结论，即植被恢复后土壤物理结构得到改善，土壤养分不断增加，侵蚀破坏的土体剖面构型渐趋完整，土壤容重减小。土壤砂粒与有机碳、全氮、全磷、速效钾在 0.01 水平上呈显著正相关，说明砂粒含量越高的土壤，越有利于土壤养分的保持。从相关矩阵分析可以看出，土壤有机碳是引起其他土壤物理性质变化的主要原因，由于土壤有机碳含量增加，改善了土壤结构，使容重减少，土壤空隙度增加，这与张希彪等[24]的研究结果一致，森林土壤中的有机碳主要来源于森林凋落物，凋落物的存在增加了土层中主要营养元素及有机碳含量，其性质和数量影响着有机碳积累。

本文研究发现，在垂直方向上，次生林地、刺槐林地、油松林地土壤养分的层次变化差异显著，但均具有明显的表聚性。这是因为通过植被根系的活动以及地表枯落物的分解增加了土壤养分的含量，枯落物作为联系地上植被与土壤的中间载体，是森林土壤养分的主要补给者，在维持土壤肥力、促进森林生态系统正常的生物循环、养分平衡和土壤物理结构等方面起着重要作用。这与刘海威等[25]、冯天骄等[26]在黄土区对不同植被类型下土壤养分含量的研究结果一致。邹诚等[27]对黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用模式的土壤速效养分研究结果发现，研究区所有土地利用模式 0—20 cm 土层的速效养分含量均高于 20—40 cm 土层，只有草地在 2 个土层速效养分含量差别不大[27]。本研究对比了不同植被类型下的土壤速效养分含量发现，速效氮和速效钾在 0—20 cm 土层的含量大于 20—40 cm 土层。这是因为 0—20 cm 土层的容重小，土壤通气条件比 20—40 cm 土层好，所以表层微生物量多，固定较多的土壤养分；而速效磷含量在 3 种林地的分布均是 20—40 cm 土层大于 0—20 cm 土层，可能是因为植被根系主要分布在 20—40 cm 土壤中，而根系吸收速效磷养分较慢。由于不同作物的根系吸收速效养分的量不同，而导致作物间土壤中速效养分含量的区别[27]。本研究的相关矩阵分析表明，土壤各养分之间均呈正相关的关系，其中有机碳对土壤氮肥的影响比较大，对其他土壤磷肥的影响很小，全氮与全磷之间的相关系数最高，说明二者之间的关系最为密切。不同的植被类型对土壤中 N、P 含量的影响也不同，董秀群等[28]在晋西黄土区的试验林地内的研究表明，对土壤全氮、全磷改良效果相对较好的分别为油松林、山杨林和侧柏林。本研究对全氮、全磷在不同植被类型的对比中发现，油松林地在不同土层深度下的全氮含量均大于其他植被，油松林地在 0—80 cm 土层的全磷含量显著大于其他植被的全磷含量，油松林地 80—100 cm 土层的全磷含量和次生林地、刺槐林地全磷含量相差不大。这是因为油松根浅且生长较缓慢，林下基本没有林草植被生长，减少

林地内养分消耗[28]。油松林对土壤改良效果最好,可以增加土壤肥力,增强土壤的保水保肥性能;而次生林与刺槐林效果都较小,并且差距不大。

4　结 论

(1)在长期的人工林植被恢复和次生林自然恢复后,土壤的物理性质有一定的变化。次生林地的容重大于其他林地,土壤容重随着土层深度的增加而增大;同一植被下浅层土层的容重小于深层土层。次生林地、刺槐林地和油松林地在 0—100 cm 土层的土壤含水量均有显著差异,在 0—40 cm 土层中次生林地土壤含水量大于刺槐林地和油松林地,而油松林地 60—100 cm 土层中各层的含水量高于次生林地。故可以认为次生林地浅层土壤的水分状况较好,而且当处于土壤水分积累期时,次生林地土壤含水量大于刺槐林地和油松林地,反映了次生林对降雨的动态变化更敏感,波动性更强。

(2)不同植被类型的林地土壤养分分布规律有所不同。次生林地土壤有机碳和速效氮含量较高,而刺槐林地和油松林地较低;与之相反,油松林地土壤全氮、全磷、速效磷含量较高,次生林地较低。

(3)在垂直方向上,次生林地、刺槐林地、油松林地土壤养分的层次变化差异显著,但均具有明显表聚性。有机碳、全氮、全磷、速效氮和速效钾的含量在 0—20 cm 层明显比其他层大,整体呈表层土壤大于底层土壤;而速效磷含量随着土层深度的变化表现为先增大再减小。

(4)各植被类型土壤水养条件在 0—20 cm 土壤浅层优于深层。相关分析和冗余分析表明,土壤容重小时养分含量较高,可能原因是表层土壤孔隙度大,通气性好、结构性好,有利于有机碳的积累和氮素的循环。

(5)次生林和油松林的土壤水养状况优于刺槐林,考虑到晋西黄土区干旱少雨的气候条件和生态经济效益,进行植被恢复时以封育保护天然次生林为主,结合营造人工恢复林,控制造林密度;同时在深层土壤含水量较多而浅层土壤含水量较少的人工油松林地适当种植深根系植物,以改善浅层土壤水分条件,优化当地生态环境。

本文在一定程度上描述了晋西黄土区自然恢复的次生林和人工恢复后的抚育林的土壤物理性质和水养特征,对于优化黄土高原植被恢复措施和促进生态环境改善有重要意义,但关于不同植被对土壤改良作用的机理还需进一步研究。关于在不同植被条件下各土层水分变化程度的差异,还需要运用传统方法与 CT 扫描技术相结合进行更深一步的研究。

致谢:感谢山西吉县森林生态系统国家野外实验站的平台支持,感谢毕华兴老师、张建军老师、魏天兴老师和王若水老师的数据支持。

参考文献:

[1] 胡婵娟,郭雷.植被恢复的生态效应研究进展[J].生态环境学报,2012,21(9):1640-1646.

[2] 蔡楚雄,贾玉华,郭成久.科尔沁沙地南缘不同植被对土壤物理性质改良作用研究[J].水土保持研究,2017,24(2):49-54.

[3] 张晓霞,杨宗儒,查同刚,等.晋西黄土区退耕还林 22 年后林地土壤物理性质的变化[J].生态学报,2017,37(2):416-424.

[4] 李航,严方晨,焦菊英,等.黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤有效水和持水能力[J].生态学报,2018,38(11):3889-3898.

[5] 袁杰,曹广超,曹生奎,等.祁连山南坡不同植被类型枯落物及其土壤持水特性分析[J].生态科学,2018,37(5):180-190.

[6] 万雪琴.坡耕地退耕还林后的植被恢复及其改土效应[D].四川 雅安:四川农业大学,2003.

[7] 田宁宁,张建军,茹豪,等.晋西黄土区水土保持林地的土壤水分和养分特征[J].中国水土保持科学,2015,13(6):61-67.

[8] 曹奇光.晋西黄土区人工刺槐林地土壤水分特征及合理密度研究[D].北京:北京林业大学,2007.

[9] 王国梁,刘国彬,党小虎.黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤含水率的影响[J].农业工程学报,2009,25(2):31-35.

[10] 邹俊亮.黄土高原小流域植被恢复的土壤水碳变化特征[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2012.

[11] 焦菊英,焦峰,温仲明.黄土丘陵沟壑区不同恢复方式下植物群落的土壤水分和养分特征[J].植物营养与肥料学报,2006,15(5):667-674.

[12] 刘秀萍,陈丽华,陈吉虎.刺槐和油松根系密度分布特征研究[J].干旱区研究,2007,24(5):647-651.

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

[14] 谭学进,穆兴民,高鹏,等.黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J].中国环境科学,2019,39(2):713-722.

[15] 陈建宇.杉木林下植被生物量与土壤容重关系的研究[J].福建林业科技,2000,27(4):56-60.

[16] 赵文智,刘鹄.干旱、半干旱环境降水脉动对生态系统的影响[J].应用生态学报,2011,22(1):243-249.

(下转第 246 页)

study at the county level in the Chinese Loess Plateau [J].Global Ecology and Conservation,2020,23: e01110.

[16] 袁坤宇.永寿县典型人工林生态系统服务功能评估[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.

[17] 李泰君.陕西黄土高原人工刺槐林碳固持特征与影响因子[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2015.

[18] 刘璐,葛结林,舒化伟,等.神农架常绿落叶阔叶混交林碳氮磷化学计量比[J].植物生态学报,2019,43(6):482-489.

[19] 巫涛,彭重华,田大伦,等.长沙市区马尾松人工林生态系统碳储量及其空间分布[J].生态学报,2012,32(13):4034-4042.

[20] 解宪丽,孙波,周慧珍,等.中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J].土壤学报,2004,41(1):35-43.

[21] Zheng S X, Shangguan Z P. Spatial patterns of leaf nutrient traits of the plants in the Loess Plateau of China [J].Trees,2007,21(3):357-370.

[22] Thomas S C, Martin A R. Carbon content of tree tissues: A synthesis[J].Forests,2012,3(2):332-352.

[23] 崔高阳,曹扬,陈云明.陕西省森林各生态系统组分氮磷化学计量特征[J].植物生态学报,2015,39(12):1146-1155.

[24] 陈亚南,马露莎,张向茹,等.陕西黄土高原刺槐枯落叶生态化学计量特征[J].生态学报,2014,34(15):4412-4422.

[25] 张涵丹,康希睿,邵文豪,等.不同类型杉木人工林林下草本植物多样性特征[J].生态学报,2021,41(6):2118-2128.

[26] 全国土壤普查办公室.中国土种志[M].1 卷.北京:中国农业出版社,1993:1-934.

[27] 吴胜男,李岩泉,于大炮,等.基于 VAR 模型的森林植被碳储量影响因素分析:以陕西省为例[J].生态学报,2015,35(1):196-203.

[28] Huang Y Y, Chen Y X, Castro I N, et al. Impacts of species richness on productivity in a large-scale subtropical forest experiment [J]. Science, 2018, 362 (6410):80-83.

[29] 彭文俊,王晓鸣.生态位概念和内涵的发展及其在生态学中的定位[J].应用生态学报,2016,27(1):327-334.

[30] Gong C, Tan Q Y, Liu G B, et al. Mixed-species plantations enhance soil carbon stocks on the loess plateau of China[J].Plant Soil,2020,464(1/2):13-28.

[31] Jerome L, Denis A. As, David P. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: A meta-analysis [J].Global Change Biology,2010,16(1):439-453.

[32] Yahya K, Mohammad B. Composition of tree species can mediate spatial variability of C and N cycles in mixed beech forests[J]. Forest Ecology and Management,2017,401:55-64.

[33] Wang B R, Zhao X D, Liu Y, et al. Using soil aggregate stability and erodibility to evaluate the sustainability of large-scale afforestation of *Robinia pseudoacacia* and *Caragana korshinskii* in the Loess Plateau [J]. Forest Ecology and Management, 2019, 450: e117491.

(上接第 237 页)

[17] 于洋,卫伟,陈利顶,等.黄土丘陵区坡面整地和植被耦合下的土壤水分特征[J].生态学报,2016,36(11):3441-3449.

[18] Loik M E, Breshears D D, Lauenroth W K. et al. A multi-scale perspective of water pulses in dryland ecosystems: Climatology and ecohydrology of the western USA[J].Oecologia,2004,141(2):269-281.

[19] 赵荣玮,张建军,李玉婷,等.晋西黄土区人工林地土壤水分特征及其对降雨的响应[J].水土保持学报,2016,30(1):178-183.

[20] 李登武,王冬梅,姚文旭.油松的自毒作用及其生态学意义[J].林业科学,2010,46(11):174-178.

[21] 王志强,刘宝元,王晓兰.黄土高原半干旱区天然锦鸡儿灌丛对土壤水分的影响[J].地理研究,2005,4(1):113-120.

[22] 孙中峰,周玉喜,朱金兆,等.晋西黄土丘陵区坡面刺槐林地土壤水分研究[J].中国水土保持科学,2007,5(5):43-49.

[23] 彭文英,张科利,陈瑶,等.黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究[J].自然资源学报,2005,20(2):272-278.

[24] 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.

[25] 刘海威,张少康,焦峰.黄土丘陵区不同退耕年限草地群落特征及其土壤水分养分效应[J].草业学报,2016,25(10):31-39.

[26] 冯天骄,卫伟,陈利顶,等.陇中黄土区坡面整地和植被类型对土壤化学性状的影响[J].生态学报,2016,36(11):3216-3225.

[27] 邹诚,徐福利,闫亚丹.黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用模式对土壤机械组成和速效养分影响分析[J].中国农学通报,2008,24(12):424-427.

[28] 董秀群,王百田,武中鹏,等.晋西黄土区三种林地土壤养分随林分生长的变化[J].林业科学研究,2018,31(2):69-76.