

DOI: 10.20103/j.stxb.202306231336

于航,冯天骄,卫伟,王平.晋西黄土区土壤理化特征对长期植被恢复的响应.生态学报,2024,44(7):2873-2885.

Yu H, Feng T J, Wei W, Wang P. Response of soil physicochemical characteristics to long-term vegetation restoration in loess region of western Shanxi province. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(7): 2873-2885.

晋西黄土区土壤理化特征对长期植被恢复的响应

于 航^{1,2}, 冯天骄^{1,2}, 卫 伟³, 王 平^{1,2,*}

1 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

2 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 吉县 042200

3 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要: 晋西黄土区具有典型的残塬沟壑地貌特征, 该地区植被恢复时间较长, 探究植被恢复对土壤理化性质的长期影响, 以及开展环境因子长期定位观测, 对实现区域生态修复与保护具有重要意义。以晋西黄土区四种典型植被恢复林地(辽东栎次生林地、刺槐人工林地、油松人工林地、侧柏人工林地)为研究对象, 测定 2006 年、2012 年、2017 年不同土层(0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm、80—100 cm)土壤理化性质(有机碳、全氮、全磷、全钾、酸碱度、土壤容重、砂粒、粉粒、黏粒), 采用主成分分析、冗余分析、相关性分析等统计方法, 探讨长期植被恢复下土壤中各因子的变化和相互作用规律, 分析不同植被类型对土壤属性时空异质性的影响。结果表明: 在长期植被恢复过程中, 不同林分土壤有机碳和全氮含量会表现为初期增加, 然后下降。土壤全钾和全磷含量则是先减少后增加, 植被恢复增强了土壤有机碳和全氮的积累。土壤的酸碱度、容重、砂粒、粉粒、黏粒的变化则不明显, 这些属性在植被恢复期内受到的外部影响较小。总体来说, 长期植被恢复增加了土壤养分含量、土壤砂粒、土壤粉粒, 降低土壤容重、土壤黏粒。相比人工林, 辽东栎次生林改善土壤结构、增加土壤肥力的效果最好。冗余分析表明, 不同植被类型长期恢复条件下, 影响土壤养分含量最主要的属性存在差异, 刺槐的土壤粉粒、侧柏的土壤容重对多年土壤养分变化的贡献度最高。本研究结果可为黄土残塬区的长期植被恢复实践工作的生态效益评估提供数据支持和理论依据。

关键词: 植被恢复; 黄土高原; 土壤理化性质; 土壤综合肥力

Response of soil physicochemical characteristics to long-term vegetation restoration in loess region of western Shanxi province

YU Hang^{1,2}, FENG Tianjiao^{1,2}, WEI Wei³, WANG Ping^{1,2,*}

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

2 Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, Jixian 042200, China

3 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: The loess region of western Shanxi has typical geomorphological features of the eroded tableland gully. The duration of vegetation restoration in this area has a relatively long history. Exploring the long-term effects of vegetation restoration on soil physical and chemical properties, as well as carrying out long-term field observation of environmental factors, has significant implications and supports for achieving regional ecological restoration and protection. This study selected four typical vegetation restoration forests (i.e. secondary forest of *Quercus wutaishanica* Mayr, artificial forest of *Robinia pseudoacacia* L., artificial forest of *Pinus tabulaeformis* Carr., and artificial forest of *Platycladus orientalis*) in the loess region of western Shanxi as the research objects. The soil physical and chemical properties of different soil layers (0—

基金项目: 国家自然科学基金(52179056, 41901021); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(QNTD202303)

收稿日期: 2023-06-23; **网络出版日期:** 2024-01-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangp@bjfu.edu.cn

10 cm, 10—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm, 80—100 cm) were measured in 2006, 2012, 2017, including organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, pH, soil bulk density, sand, silt, clay. The statistical methods such as principal component analysis (PCA), redundant analysis (RDA) and correlation analysis were used to explore interactions among various factors in the soil under long-term vegetation restoration, and analyze the effects of vegetation types on spatiotemporal heterogeneity of soil properties. The results showed that during the long-term vegetation restoration process, soil organic carbon and total nitrogen contents in different forests initially increased then decreased, while soil total potassium and total phosphorus contents decreased at first stage and then increased. Vegetation restoration enhanced the accumulation of soil organic carbon and total nitrogen. Changes in soil pH, bulk density, sand, silt, and clay measurements were not noticeable—these properties were less influenced by external factors during the vegetation recovery period. Overall, long-term vegetation restoration increased the content of soil nutrients, soil sand, and soil silt, while reducing soil bulk density and soil clay. Compared with artificial forests, the secondary *Quercus wutaishanica* Mayr forest was the best vegetation type as regards of improving soil structure and increasing soil fertility. Redundancy analysis indicated that there existed the differences in primary attributes affecting soil nutrient content under the condition of long-term restoration of different vegetation types. Silt in the soil of *Robinia pseudoacacia* L. and soil bulk density of *Platycladus orientalis* made the highest contributions to the changes in soil nutrients over long-term scale. The results of this study can provide data support and a theoretical basis for assessing the ecological benefits of long-term vegetation restoration practices in loess eroded tableland areas.

Key Words: vegetation restoration; the Loess Plateau; physical and chemical properties of soil; comprehensive fertility of soil

黄土高原是我国具有代表性的生态脆弱区之一^[1],也是中国北方一个重要的生态环境区域,但随着长期的放牧、山地开垦、矿产开采,水土流失问题及环境条件使植物生存和生长面临严峻考验^[2],为缓解该地区生态环境问题,长期以来大规模实施的植被恢复和退耕还林还草工程^[3],有效地遏制了黄土高原地区严重的水土流失问题^[4]。目前,对黄土高原的生态修复已有多种途径。一种是改变土地利用方式,鼓励农民将土地利用从种植作物向种植灌木或草本植物过渡,土地利用方式的转变使当地的水资源得到保护,而且能够增加区域生态多样性^[5]。另外,植树造林^[6]也是黄土高原进行生态修复的重要策略。种植树木能够增加区域植被覆盖率,减少水土流失,产生较大的生态效益。此外,施肥、秸秆还田、茅草条作为植物肥料、土壤微生物活性调控等各种技术手段、大面积修复水土流失的生态工程都可以被用来修复黄土高原的生态环境^[7-8]。其中需要注意的是黄土高原的生态修复是一个长期过程,需要多方共同合作、长期抚育和管理来实现黄土高原地区的可持续发展。

森林生态系统中天然林和次生林下土壤理化性质存在明显差异,这与林分中生物多样性^[9]、土壤养分特征^[10]、土壤水分状况^[11]等有关。多数研究表明^[10,12-13],天然林在保护和改善土壤质量上的效果通常优于人工林。但人工林的建立对于初始土壤质量差、生态系统功能低下的地区仍然有其重要价值^[12]。在森林正向演替的过程中,天然林土壤容重不断减少,土壤孔隙度明显改善,为土壤保存养分提供良好空间,魏强等^[14]在对甘肃兴隆山 6 种森林类型的演替过程研究中发现,相比天然林演替过程中土壤变化特征,人工林土壤物理性质出现明显退化现象。天然林中由于不是与人工林类似的单一树种生长,生物多样性丰富,可以更好的促进养分循环。李裕元等^[13]在对子午岭天然林和人工林群落特征比较中表明,天然林在乔木层和灌木层具有较高的物种多样性。不同立地类型下的林分生物多样性直接影响土壤微生物多样性,从而间接影响土壤全氮、铵态氮、全钾等含量的变化^[15]。人工林由于单一树种种植,土壤微生物多样性可能会下降,从而影响土壤肥力。在土壤水分方面,天然林由于树木种类繁多,根系分布广泛,更有助于水分的保留和植物的吸收^[11]。Chouangthavy Bounsang 等^[16]在对老挝甲虫群落的大规模取样研究中发现,天然林转变为人工林导致了物

种丰富度和多度的下降。不同林分在森林群落的恢复和演变过程中,由于森林种类和它们所在的地理环境及生物的差异,森林与土壤之间的相互影响表现出很大的复杂性。

20 世纪 90 年代初期,国内外研究^[17-18]关于生态修复过程中土壤改良效益处于探索阶段,当时土壤养分对植被恢复的响应方面研究并没有引入多种土壤组份和物理性质来进行分析。随着学科技术水平和土壤检测技术手段的发展,2000 年谢宝平等^[19]在华南严重侵蚀地植被恢复对土壤条件影响的研究中引入了对土壤质地、容重及孔隙度的土壤物理性质方面的讨论。现阶段,各项研究逐步将土壤养分和土壤物理性质进行相关性的研究,植被恢复对土壤养分和土壤物理性质的研究集中于不同尺度、不同土壤条件、不同生境类型上,姜丽娜等^[20]研究揭示了半干旱区内不同植被恢复类型下土壤理化性质的变化,李鹏飞等^[21]在黄土高原矿区中明晰了生态脆弱地区不同植被恢复类型中土壤理化性质等的重要性和变化趋势。多数研究探究植被群落与土壤理化性质间的量化关系,为植被修复及土壤理化性质的发展提供基础保障,综合目前关于黄土高原残塬沟壑区的相关研究进展,通过对脆弱生态系统重建任务的探索,植被恢复是实践中重要的生态恢复手段^[22-23]。当前在长期大规模植被恢复背景下,长时间视角下的植被恢复如何调控土壤生态功能,以及不同植被恢复方式条件下的土壤性质变化需要进一步探索和明晰,土壤化学计量和土壤物理性质间相互影响机制有待深入研究。在长期对于土壤养分和土壤物理性质的不断探索中,许多研究^[24-25]一直认为土壤养分是在显著增多的,但是养分增多的范围和阈值问题不明确,结合以上提出的关于土壤理化性质与植被修复相应方面的不足,本研究以黄土残塬区 4 种典型植被恢复类型样地(辽东栎次生林样地、侧柏样地、油松样地、刺槐样地)土壤为对象,以为期 12 年的时间长度,分别在 2006 年、2012 年、2017 年进行土壤取样来开展土壤理化性质监测和分析,探讨土壤理化性质不同年份的变化趋势及多因子间的相互作用,揭示不同植被恢复类型和不同土壤深度对土壤性质的影响,阐明土壤养分与土壤物理属性的关系,以加强理解黄土高原地区不同植被恢复类型中土壤理化性质变化特征,并为该地区增强生态恢复效果、提升生态系统服务提供科学依据。

1 试验地概况

本次试验地位于山西省吉县蔡家川流域的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),研究站地处黄河中游黄土高原东南部半湿润地区,为典型的黄土高原残塬沟壑区和梁状丘陵沟壑区,海拔在 900—1560 m,年均气温 10℃,日照时间年均 2563.8 h,年平均降雨量为 579.5 mm,普遍分布的土壤类型为褐土,黄土母质,土层深厚,土质均匀。山西吉县自 1992 年施行退耕还林还草活动以来,林草覆盖面积显著增加,水土流失状况逐渐好转,生态环境显著改善。主要乔木类型有自然恢复的辽东栎(*Quercus wutaishanica* Mayr)、山杨(*Populus davidiana*)等,人工的刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等纯林以及油松×刺槐、刺槐×侧柏等混交林。研究区概况及样地见图 1 所示。

2 研究方法

2.1 样品采集和数据收集方法

基于 2006 年 5 月对流域调查的结果,筛选了具有代表性的辽东栎次生林、刺槐、油松和侧柏林地,作为本研究的植被恢复类型,以进行观测样地,不同植被恢复类型林分恢复年限及林龄相同。在每个植被恢复类型研究样地面积内(表 1),选择了分散的 5 处 20 m × 20 m 样方,选择的样方相距较远,坡度相近且坡向为阴坡,植被恢复年限相近的,排除坡位、坡向和恢复年限等对土壤性质的干扰。野外土样采样分别于 2006 年 5 月、2012 年 5 月、2017 年 5 月进行,在不同年份,不同样方内均采用对角线法选取 5 个样点进行土壤取样。分别在 0—10 cm, 10—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm 和 80—100 cm 的 6 个土层进行样品采集和分析,共 1800 个土样。将土壤样品带回实验室,进行土壤有机碳、全氮、全钾、全磷、pH 值、容重、砂粒、黏粒和粉粒的分析检验。

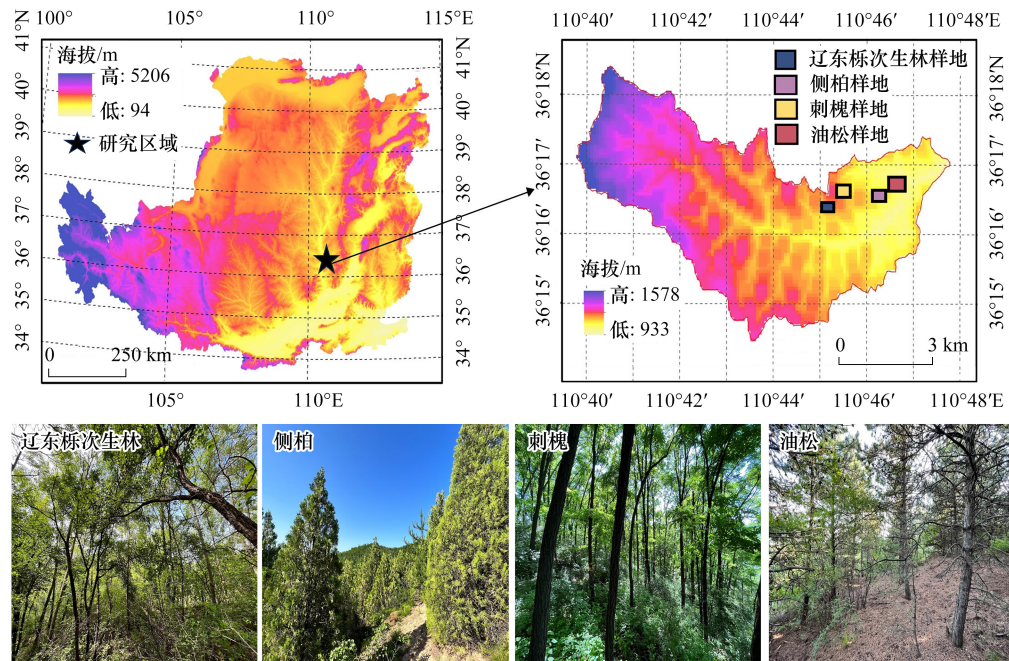


图 1 黄土高原研究区概况及样地示意图

Fig.1 General situation of the Loess Plateau research area and schematic diagram of sample plot

表 1 样地基本概要

Table 1 Basic information of the research sites

林地类型 Woodland type	研究样 地面积 Study plot area/hm ²	土质 Soil types	坡向 Aspect	坡度 Slope/(°)	海拔 Elevation/m	经纬度 Latitude and longitude	主要植被 Mainly vegetation
辽东栎次生林地 <i>Quercus wutaishanica</i> Mayr secondary forest land	26	粉壤土	阴坡	18	1081	N36°16', E110°44'	辽东栎 (<i>Quercus wutaishanica</i> Mayr)、山杨 (<i>Populus davidiana</i>)、沙棘 (<i>Hippophae rhamnoides</i> Linn.)、虎榛子 (<i>Ostryopsis davidiana</i> Deene.) 等
刺槐林地 <i>Robinia pseudoacacia</i> L. forest land	35	粉壤土	阴坡	25	1358	N36°03', E110°75'	刺槐 (<i>Robinia pseudoacacia</i> L.)、黄刺梅 (<i>Rosa xanthina</i> Lindl.)、金银木 (<i>Lonicera maackii</i>)、茜草 (<i>Rubia cordifolia</i> L.)、青蒿 (<i>Artemisia caruifolia</i>) 等
油松林地 <i>Pinus tabulaeformis</i> Carr. forest land	21	粉壤土	阴坡	22	1371	N36°04', E110°75'	丁香 (<i>Syzygium aromaticum</i>)、杠柳 (<i>Periploca sepium</i> Bunge)、紫花地丁 (<i>Viola yedoensis</i> Makino)、草木樨状黄芩 (<i>Astragalus melilotoides</i> Pall.) 等
侧柏林地 <i>Platycladus orientalis</i> forest land	30	粉壤土	阴坡	25	1210	N36°27', E110°74'	白刺花 (<i>Sophora davidii</i>)、半木夏 (<i>Elaeagnus multiflora</i> Thunb.)、二色棘豆 (<i>Oxytropis bicolor</i> Bunge)、糙叶黄耆 (<i>Astragalus scaberrimus</i> Bunge)、远志 (<i>Polygala tenuifolia</i> Willd.) 等

2.2 土壤理化指标的测定方法

土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法测定,土壤全氮采用半微量凯氏法测定,土壤全磷采用 HClO₄-H₂SO₄ 法测定,土壤全钾采用氢氧化钠溶解、火焰光度法测定,土壤 pH 值采用电位法测定,土壤容重采用环刀法测定,土壤机械组成采用比重计速测定^[26]土壤机械组成中粒度的划分方法采用国际制的土壤颗粒分级标准,将土壤颗粒组划分分为砂粒(2.0—0.02 mm)、粉粒(0.02—0.002 mm)、黏粒(<0.002 mm)^[27]。

2.3 数据处理

研究采用 Excel 2019 软件对数据进行整理、IBM SPSS Statistics 26 软件采用描述性统计和单因素方差分析对数据进行处理,检验不同植被类型、相同年份间植被恢复类型土壤理化性质的显著性差异及相同植被类

型不同年份间植被恢复类型土壤理化性质的显著性差异 ($P < 0.05$), 单因素方差分析的事后检验采用 LSD 法。使用 Canoco5 进行冗余分析。相关数据采用平均值 $\pm$ 标准差 (mean $\pm$ SD) 来表示, 利用 Origin 2021 软件, R 软件绘图。

3 结果与分析

3.1 不同植被恢复类型 0—100 cm 土壤性质的年际变化

土壤有机碳含量、全氮含量在四种植被恢复类型中均表现为先上升后下降, 2006 年、2017 年土壤有机碳含量在同一年份不同样地间均具有显著相关性 (图 2), 土壤有机碳含量、土壤全氮含量均为辽东栎>油松>侧柏>刺槐。土壤全磷含量、全钾含量, 两种元素的含量都表现为先下降后上升, 四种植被恢复类型在不同年份的含量具有显著相关性, 两种元素在同一种年份不同样地间不具备稳定的相关性。四种样地中仅刺槐样地的钾元素含量比 2006 年测定的高, 2017 年的土壤全磷含量在四种样地中均高于 2006 年。土壤全磷含量为油松>刺槐>辽东栎>侧柏, 土壤全钾含量为刺槐>辽东栎>油松>侧柏。不同年份的植被恢复类型土壤 pH 值不显著。

辽东栎次生林的土壤容重在林分生长过程中总体呈现下降趋势, 其余三种植被恢复类型的土壤容重有所上升。土壤粉粒在所有样地都有所上升, 土壤砂粒显著关系不明显, 土壤黏粒在辽东栎次生林样地、侧柏样地

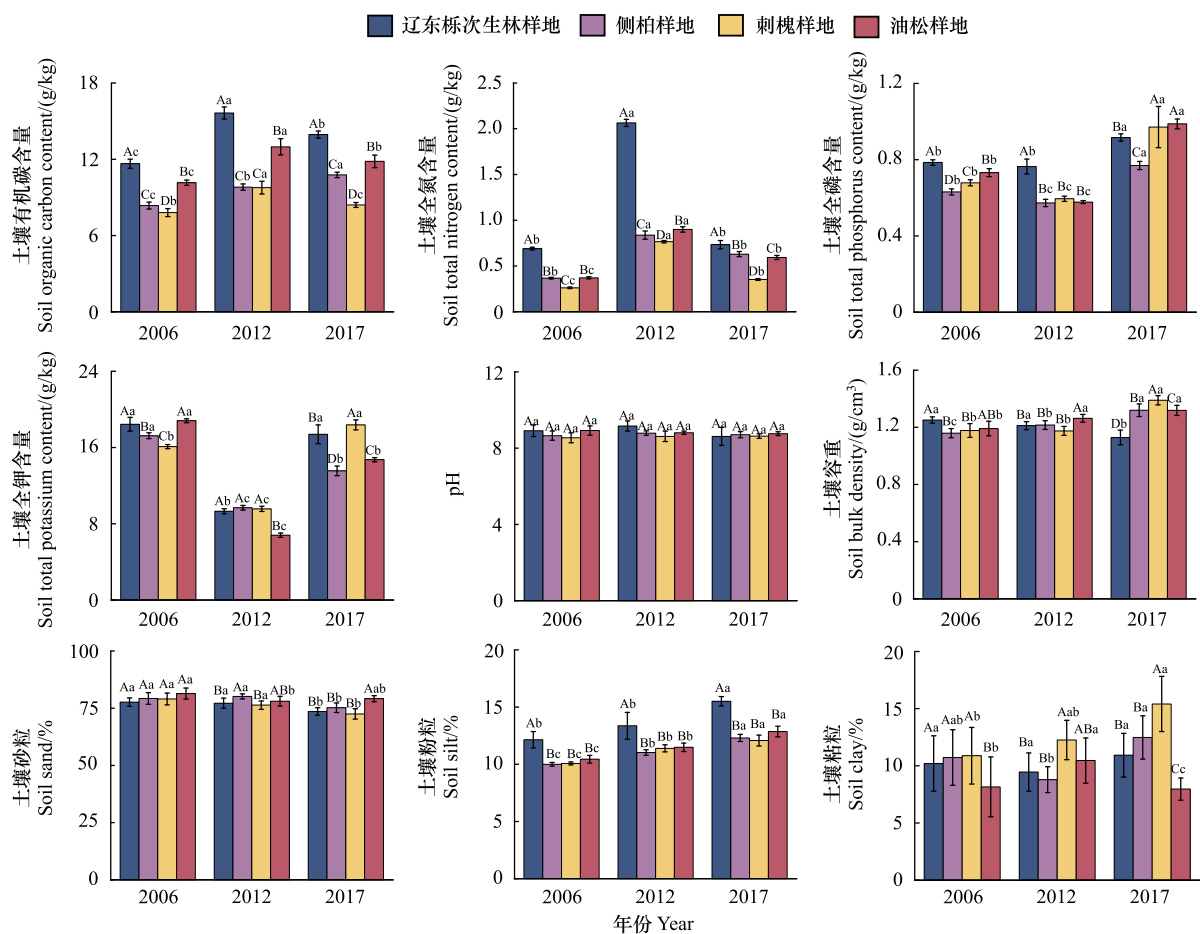


图 2 不同植被恢复类型 0—100 cm 土壤性质的年际变化

Fig.2 Interannual changes of soil properties from 0 to 100cm for different vegetation restoration types

图中数据为平均值 $\pm$ 标准差; 不同大写字母代表相同年份不同样地间显著差异 ($P < 0.05$); 不同小写字母代表不同年份同一样地间显著差异 ($P < 0.05$)

中先下降再上升,刺槐样地的土壤黏粒则一直上升,油松样地先上升再下降。辽东栎、侧柏、刺槐三种植被恢复类型,比起 2006 年、2012 年土壤砂粒,在 2017 年显著下降,本研究中的油松样地的土壤黏粒含量并未表现出下降趋势,土壤砂粒在 2012 年显著增加后明显下降,比 2006 年低 65.62%。

3.2 不同植被恢复植被类型土壤性质的垂直深度变化规律

不同土壤深度中土壤性质变化规律(表 2)的结果显示,土壤全氮含量表现为明显的表层聚集性,0—10 cm 的全氮含量最高,随着土层深度的增加,全氮含量逐渐降低,但在刺槐样地和辽东栎次生林样地 80—100 cm 的土层中,全氮含量依旧较高,其含量分别为 0.44 g/kg、0.86 g/kg。不同样地全磷含量随土层深度的变化不明显。侧柏样地、刺槐样地中 0—10 cm 的土壤全钾含量最低,相较 0—10 cm 的其他土层含量明显升高。油松样地、侧生林样地各土层的土壤全钾含量变化不明显,钾素稳定存在各层土壤中。土壤有机碳含量与土壤全氮含量表现相同,具有表层聚集特征,表层 0—10 cm 的有机碳含量明显高于其他深度,并且各植被恢复类型样地中随土层深度的增加,土壤有机碳含量逐渐降低。

土壤 pH 值随土层深度的增加变化不明显,其中油松样地 60—80 cm 的土壤 pH 值最高(9.37),侧柏样地 0—10 cm 的土壤 pH 值最低(7.93)。侧柏林地 20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm、80—100 cm 的土壤容重显著低于 0—10 cm、10—20 cm 土层。总体来看,刺槐样地、油松样地、辽东栎次生林样地的土壤容重随着土层深度的增加而增加,除侧柏样地外,各样地中不同土层土壤容重变化并不具备规律性,土壤容重仅随土壤深度的增加逐渐增加。四种植被恢复类型的土壤机械组成中以砂粒土为主,粉粒土与黏粒土共占 20% 左右。土壤机械组成随土壤深度变化的趋势不明显,各土层的砂粒、粉粒、黏粒占比不规则。

3.3 植被恢复过程中土壤性质的相互关系

图 3 分别为 2006 年、2012 年、2017 年土壤各因子间的相关性矩阵,2006 年土壤内各因子相互关系以正相关关系为主。通过植被修复,土壤全氮与土壤全磷、土壤全钾、土壤容重,土壤有机碳与土壤容重均从植被恢复前期的显著正相关关系转变为显著负相关关系,土壤砂粒与土壤全钾、土壤 pH,土壤黏粒和土壤全氮、土壤有机碳均从植被恢复前期不显著关系转变为显著关系。

图 4 为辽东栎次生林样地、侧柏样地、刺槐样地、油松样地 2006 年、2012 年、2017 年所测定土壤数据综合的冗余分析和土壤物理性质及 pH 对土壤养分的贡献度。图 5 为四种样地的主成分分析图,PC1 和 PC2 的贡献值分别为 33.6% 和 17.0%,四组中辽东栎次生林样地和其他三组存在显著差异,侧柏样地、刺槐样地、油松样地相互不存在显著差异,图中向量长短代表差异贡献,方向为与主成分的相关性。PC2 的差异主要由土壤黏粒和土壤砂粒贡献。PC1 的变异主要来自于其他成分的共同影响,土壤有机碳、土壤全氮与土壤全钾、土壤全磷、土壤容重、土壤粉粒间存在负相关性,土壤砂粒和土壤黏粒间存在负相关性。从统计贡献度来看,土壤 pH 值对 PC1 和 PC2 的影响并不显著。土壤 pH 在 PC1 和 PC2 中的贡献度较小,在主成分分析的前两个维度中,土壤 pH 值并不是主导变量,PC1 和 PC2 并不能充分表示土壤 pH 值的变动趋势,这可能表明土壤 pH 值与 PC1 所表示的环境或生物过程相对独立。土壤有机碳、土壤全氮、土壤 pH 值间存在正相关性,土壤全钾、土壤全磷、土壤容重、土壤粉粒间存在正相关性。研究结果表明,植被恢复类型中土壤理化性质间相互作用。由相关性分析、主成分分析、冗余分析可知,植被恢复过程中物理性质和化学性质相互影响,由最初不能提供植物良好生长养分需求及空间的土壤条件关系向利于其二者的相互关系转变。

4 讨论

4.1 长期植被恢复过程中土壤性质的时空变化特征

2006—2012 年土壤养分、土壤容重、土壤机械组成的变化趋势都明显高于 2012—2017 年。以辽东栎次生林样地的土壤全氮含量为例,2006—2012 年升高 1.38 g/kg,而 2012—2017 年下降 1.33 g/kg,2006—2017 年增加 0.04 g/kg,土壤养分整体上是增加的。本研究发现长期植被恢复过程中土壤各性质的变化并不是连续的,而是当某一因子的数量到达一定数值时会向相反方向变化,这可能是由于黄土高原地区水土流

表 2 四种植被恢复类型不同土壤深度中土壤性质变化规律

Table 2 Changes of soil properties in different soil depths of four Planting vegetation restoration types										
植被恢复类型 Type of vegetation restoration	土层深度 Soil depth/cm	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)	全钾 Total potassium/ (g/kg)	有机碳 Organic carbon/ (g/kg)	pH	土壤容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)	砂粒 Sand	粉粒 Silt	粘粒 Clay
侧柏样地 <i>Platycladus orientalis</i> plots	0—10	1.28±0.61a	0.76±0.15a	11.04±3.21a	15.00±3.61a	7.93±0.37a	1.06±0.1a	76.15±6.24ab	9.23±1.22a	14.62±6.28a
	10—20	0.82±0.41b	0.60±0.08c	12.24±4.05ab	14.00±2.1a	8.99±0.65b	1.03±0.17a	79.44±5.64ab	10.82±1.18b	9.74±4.87abc
	20—40	0.62±0.27b	0.74±0.14ab	12.93±2.42abc	9.52±0.78b	8.93±0.82b	1.18±0.13b	80.35±6.59b	12.13±1.39c	7.52±6.7c
	40—60	0.37±0.08c	0.66±0.17bc	14.27±3.07bc	8.04±2.42b	9.02±0.76b	1.42±0.12c	78.23±6.03ab	10.47±1.57b	11.3±6.75abc
	60—80	0.24±0.03c	0.62±0.08c	15.08±3.04c	6.07±0.91c	8.72±0.99b	1.40±0.07c	74.7±6.1a	12.46±1.53c	12.84±5.62ab
刺槐样地 <i>Robinia pseudoacacia</i> L.	80—100	0.34±0.22c	0.57±0.04c	15.36±3.92c	5.24±0.48c	8.71±0.8b	1.30±0.12d	80.48±6.68b	11.53±1.52bc	7.99±5.93bc
	0—10	0.71±0.42a	0.73±0.17a	12.98±4.17a	12.64±2.04a	8.66±0.51a	1.31±0.11a	78.19±6.84a	8.36±1.2a	13.44±6.65ab
	10—20	0.58±0.26ab	0.76±0.2a	15.23±4.89ab	9.84±1.07b	8.67±0.55a	1.13±0.18b	83.12±6.54c	7.89±1.13a	8.99±5.95a
	20—40	0.48±0.15bc	0.75±0.23a	13.77±4.94ab	10.52±1.85b	8.70±0.61a	1.12±0.14b	75.41±5.62ab	11.50±0.89b	13.09±5.12ab
	40—60	0.35±0.17cd	0.76±0.13a	14.64±3.22ab	7.10±0.74c	8.60±0.77a	1.19±0.12bd	76.85±5.86a	13.30±1.46c	9.85±5.66a
油松样地 <i>Pinus tabulaeformis</i> Carr.	60—80	0.19±0.04d	0.77±0.22a	14.71±3.59ab	6.88±2.22c	8.49±0.42a	1.43±0.14c	71.66±6.3b	12.14±1.32b	16.20±5.72b
	80—100	0.44±0.38bc	0.81±0.2a	16.73±2.75b	4.99±1.33d	8.46±0.85a	1.30±0.16ad	70.59±5.62b	13.89±1.1c	15.52±5.86b
	0—10	1.09±0.37a	0.76±0.16a	14.87±5.07a	19.8±4.6a	8.81±0.8ab	1.2±0.08a	77.96±6.33a	11.07±0.69a	10.97±6.7ab
	10—20	0.61±0.19bc	0.74±0.2a	14.17±6.12a	13.34±4.07b	9.00±0.71bc	1.19±0.14a	76.15±6.43ab	14.67±1.97b	9.18±5.41abc
	20—40	0.64±0.33b	0.77±0.16a	11.17±5.01a	10.83±1.68c	8.62±0.48ab	1.24±0.15ab	72.76±6.96b	14.07±1.15bc	13.16±7.18b
辽东栎次生林样地 <i>Quercus wutaishanica</i> Mayr	40—60	0.44±0.09bc	0.74±0.16a	12.81±5.21a	9.08±2.56cd	8.79±0.61ab	1.32±0.12bc	85.49±5.17c	7.29±1.36d	7.22±4.35ac
	60—80	0.53±0.31bc	0.77±0.21a	14.21±4.9a	8.51±1.44d	9.37±0.63c	1.36±0.13c	80.14±5.21a	13.02±1.87c	6.83±4.85ac
	80—100	0.41±0.25c	0.82±0.22a	13.43±5.51a	8.38±0.95d	8.38±0.81b	1.24±0.13ab	84.75±5.81c	9.44±2.22e	5.81±4.6c
	0—10	2.57±0.66a	0.87±0.1a	15.72±4.38a	26.59±3.72a	8.73±0.77a	1.15±0.1ab	83.26±5.39a	10.43±2.15a	6.32±5.19a
	10—20	1.28±1.24b	0.87±0.09a	14.95±3.08a	20.29±4.82b	8.45±0.81ab	1.19±0.12ab	74.79±5.52bc	12.91±1.58b	12.31±5.9b
secondary forest sample plot	20—40	0.87±0.58bc	0.78±0.11b	14.6±4.72a	13.64±2.4c	8.91±0.68ab	1.12±0.07a	77.93±6.52b	14.47±2.79bc	7.6±5.25a
	40—60	0.80±0.55bc	0.83±0.1ab	16.12±4.24a	8.05±1.38d	9.06±0.75b	1.21±0.1b	74.86±7.64bc	15.59±3.26c	9.55±6.03ab
	60—80	0.59±0.49c	0.79±0.12ab	15.37±4.91a	8.23±1.24d	8.96±0.59ab	1.22±0.13b	70.94±6.79c	15.74±2.88c	13.32±4.53b
80—100	0.86±0.89bc	0.79±0.11ab	13.53±5.49a	5.67±0.66e	9.27±0.73b	1.3±0.11c	75.02±5.46bc	12.9±1.91b	12.08±5.07b	

小写字母表示在不同土层深度的显著性($P<0.05$);相同小写字母代表不具备显著关系

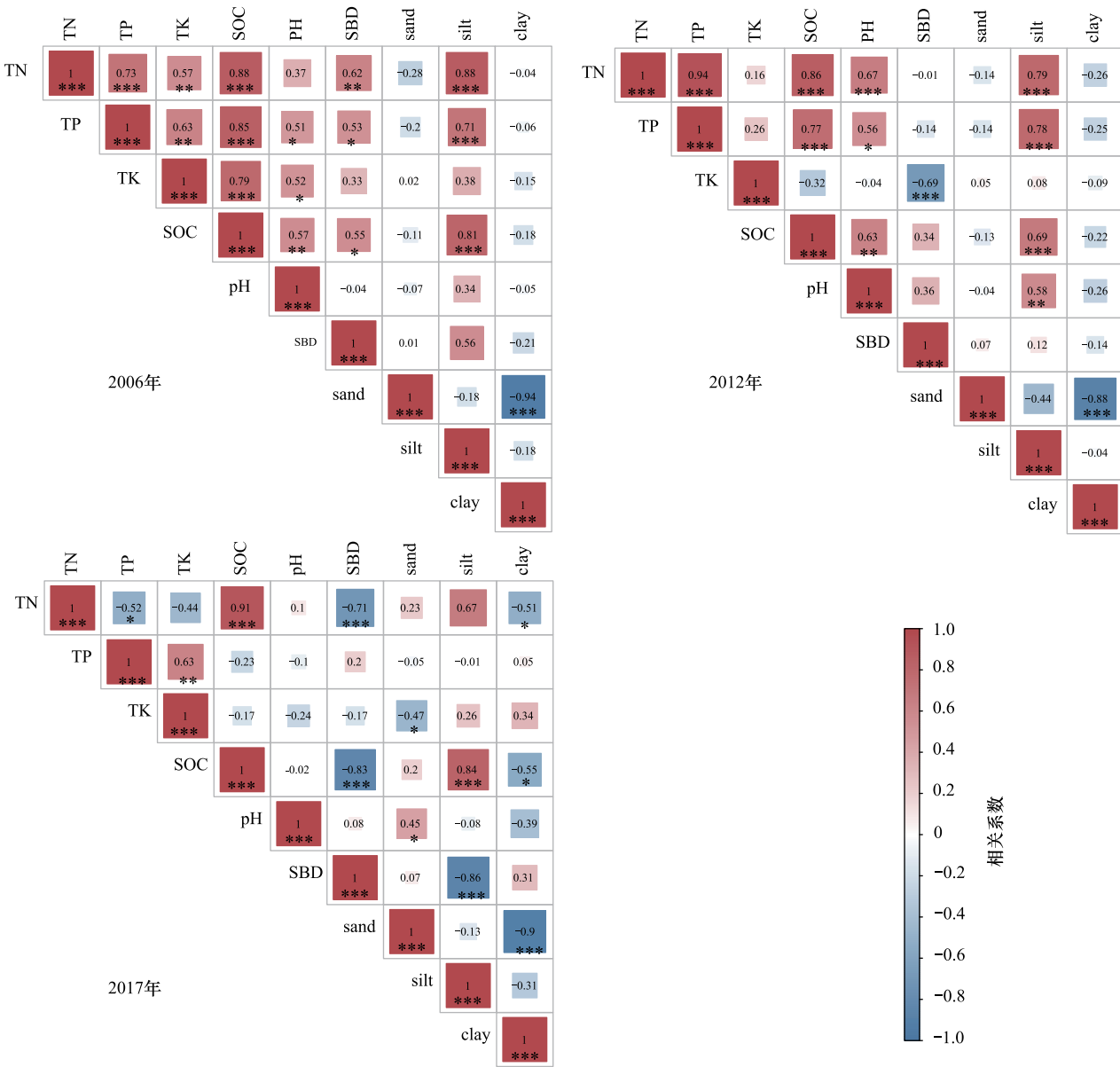


图3 植被恢复过程中不同年份土壤性质的相关性分析矩阵

Fig.3 Correlation analysis of soil properties in different years during vegetation restoration

TN:土壤全氮; TP:土壤全磷; TK:土壤全钾; SOC:土壤有机碳; pH:土壤pH值; SBD:土壤容重; Sand:土壤砂粒; Silt:土壤粉粒; Clay:土壤黏粒

失^[28]、水资源短缺,时空分布不均^[29]、土壤侵蚀^[30]、植被退化问题严重^[31],植被恢复初期有效缓解了黄土高原地区的土地压力,短期内土壤性质变化显著,随着演替的进行,林地内其他灌草植物迁入,土壤养分供给大量植物生长,并且逐渐趋于正常范围内,由此表明,2006年开始进行植被恢复之后,不同植被恢复类型对于土壤的改良都表现为良好。把握植被恢复过程中各因子变化规律至关重要,掌握土壤各因子的动态变化,及时调整植被恢复过程中所需的人为干扰,提高植被恢复效率。

植被恢复过程中,由于不同树种所提供的根系分泌物、地表覆盖物、地表植被群落组成均不相同,导致土壤的化学性质经过长期的植被恢复后,与植被恢复初期存在一定的差异。此前许多研究^[32-33]证明植被恢复对土壤化学性质的影响是显著的,不同植被类型对土壤化学元素含量起到提升或降低的作用。本研究对比长期不同植被恢复下的土壤有机碳、全氮、全磷、全钾含量发现,以辽东栎次生林为例,其林下有机碳含量增长最

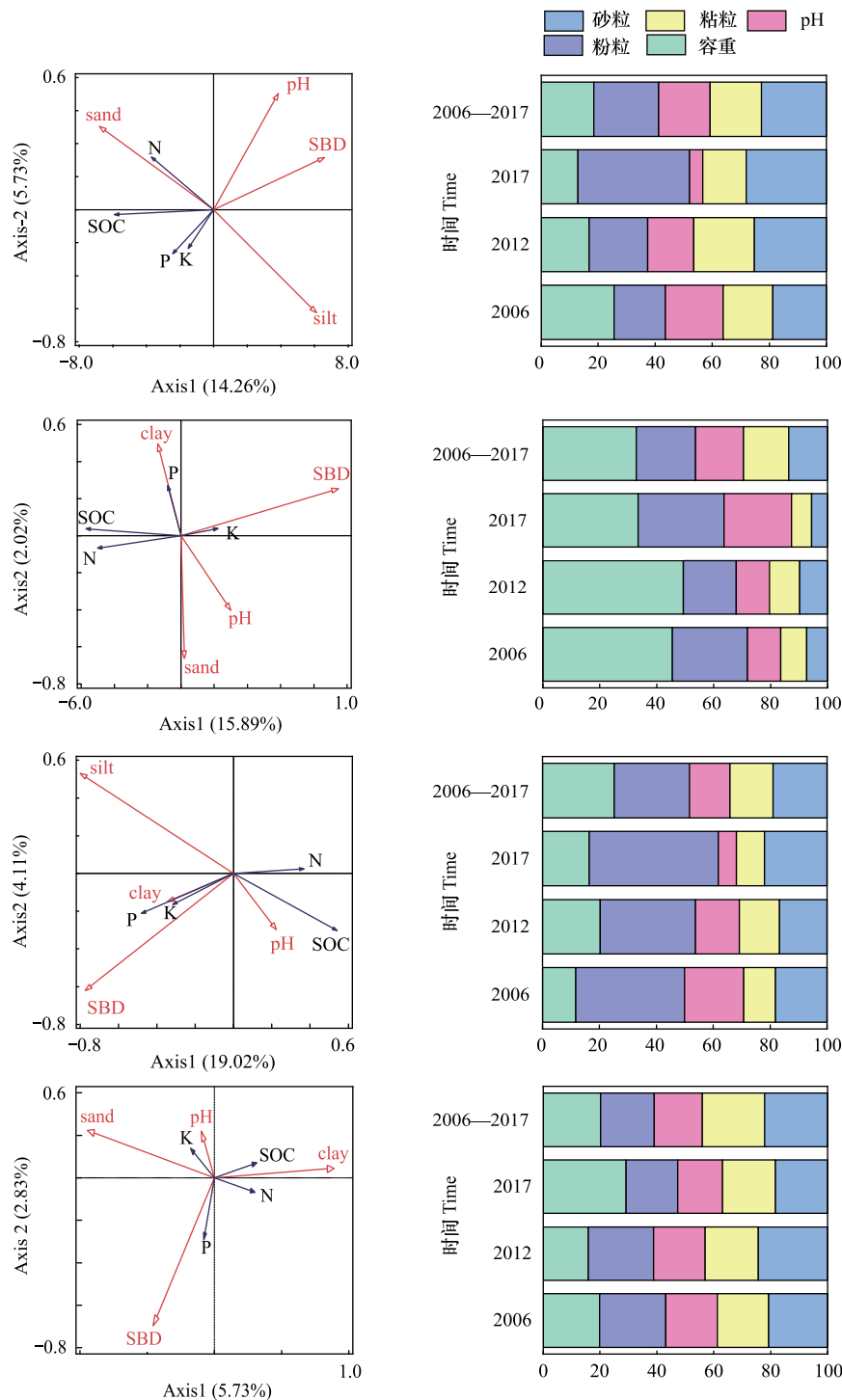


图 4 四种植被恢复类型土壤性质的冗余分析

Fig.4 Redundant analysis of soil properties for different vegetation restoration types

多,相比其他林地,辽东栎次生林样地中不同土层下土壤有机碳含量表现良好,土壤有机质的含量依次为辽东栎次生林>油松>侧柏>刺槐。辽东栎次生林提供的落叶丰富且易分解,改善土壤有机质,促进团粒结构的生成,加之辽东栎次生林样地为天然恢复的乔木植被,其生物多样性水平丰富、群落稳定性高^[34],刺槐样地与之相比,不论是有性繁殖还是无性繁殖,在无人工辅助的近自然条件下均表现不良,黄土高原人工刺槐林群落稳定性较差,具体表现为群落结构简单、更新差、土壤含水率低、土壤养分恢复水平低^[35]。不同植被在恢复过程

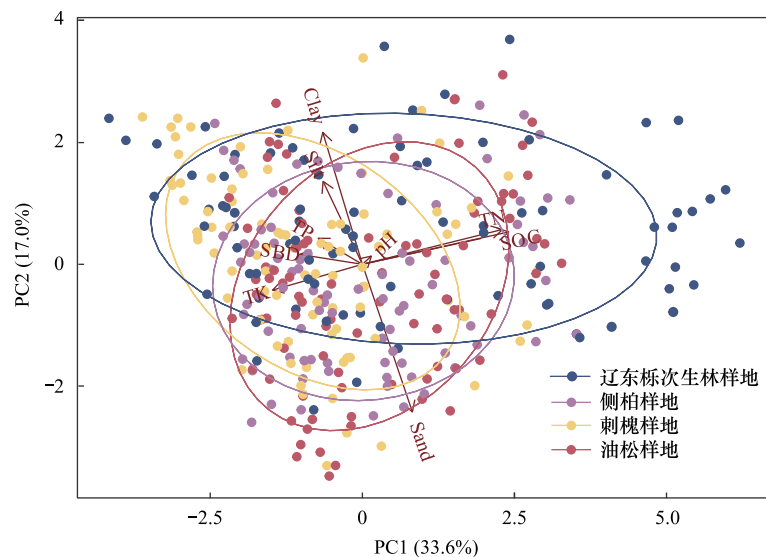


图5 不同植被恢复类型土壤性质的主成分分析

Fig.5 Principal component analysis of soil properties of different vegetation restoration types

中的土壤有机碳含量都有显著上升,本研究区域与以往研究植被恢复过程中土壤养分变化的其他生态环境脆弱区,如青藏高原东南缘高寒区^[36]、喀斯特地貌^[37]等区域的研究结果一致。在不同植被恢复类型中,各林地的其他土壤养分含量表现不同,全氮含量与有机碳含量一致,全磷含量为油松>刺槐>辽东栎次生林>侧柏,土壤全钾含量为刺槐>辽东栎次生林>油松>侧柏,这可能是由于不同树种对于元素的需求各异,进而对不同林分下土壤养分的改良不同。在不同林地的土壤中,垂直方向上的土壤全氮含量具有明显的表聚性,各土层的养分含量随土层深度的增加而减少,但这一特点在全磷、全钾含量上并不适用,不同样地下全磷含量随土层深度的变化不明显,这与冯天骅等^[38]对陇东黄土区坡面整地和植被恢复类型对土壤化学性质的影响研究结果一致,即磷元素在土壤中的移动性较弱,不易随着雨水淋溶或者土壤水分下渗,从而使土壤中全磷含量在各土层中变化不大。黄土高原属于半湿润半干旱地区,降水较少,气候较为干燥,由于土壤中大部分钾素不易被植物吸收利用,并且干旱少雨地区的钾素不易被淋失消耗,故大量的被保存在土壤中。

由于生存地域、气候条件、人为活动的分异,土壤各性质有较强的时空异质性,土壤理化性质间的关系表现为多样性和复杂性^[39],在植被恢复的不同阶段、植被恢复的不同类型存在差异,张恒硕等^[40]在晋西黄土区退耕年限对土壤物理性质的影响的研究表明,土壤有机质和土壤黏粒的增加以及土壤结构的改善被认为是影响改善黄土区退耕还林后土壤物理性质的主要原因,与本研究的结果一致,除油松样地外,其余三种植被恢复类型中土壤有机物含量、土壤黏粒都有显著增加。在黄土高原长期的植被恢复过程中,辽东栎次生林显著降低了土壤容重,植被调节土壤物理性质良好。植被恢复的效果也可以间接通过测量土壤有机物含量、土壤容重及土壤黏粒状况,将其综合评价,作为一个评估因子。

4.2 长期植被恢复过程中土壤性质间相互影响机制

相关性分析表明,土壤全氮和全磷在植被恢复过程中由显著正相关性向显著负相关性过渡,氮、磷含量以及氮磷比对于评价植被恢复效果、土壤养分富集程度、植被生长等方面是至关重要的^[41]。土壤全氮与有机碳的相关性保持不变,研究认为土壤有机碳含量与土壤全氮含量一直都处于共同升高或降低的状态,协同促进植物生长^[42-44],土壤中其二者含量可以反映当前土壤肥力水平^[45]。土壤全氮和土壤全钾,土壤有机碳和土壤全磷、土壤全钾,土壤pH值和土壤有机碳、土壤全磷、土壤全钾之间都由显著的正相关性过渡为不显著关系,它们之间相互的限制关系逐渐减弱。土壤化学性质间的正相关关系逐渐过渡为不显著,土壤容重与土壤全氮、土壤有机碳、土壤粉粒之间由显著的正相关性过渡到显著的负相关性。根据2017年土壤性质之间的

相关性可知,土壤有机碳同样影响着土壤容重的变化,当土壤容重随着植被恢复时间逐渐降低时,土壤砂粒和土壤粉粒在土壤中的占比逐渐上升,从而导致土壤黏粒下降,这与张晓霞等^[46]对晋西黄土区退耕还林 22 年后,林地土壤物理性质的变化研究结果一致。植被恢复后,土壤砂粒含量升高,粘粒含量减少,容重降低。这种变化可以增加土壤孔隙度和透气性,提高土壤生物生存环境,促进土壤肥力提升。同时,土壤养分升高,土壤容重降低,增加了土壤孔隙度,使养分在土壤孔隙中得到保存。2017 年的数据表明,土壤 pH 值仅与土壤砂粒呈显著正相关。当前,尚缺乏直接研究探讨土壤 pH 值与土壤机械组成中砂粒占比之间的关系。通过对已有数据的测定和分析,我们可以推测在本次研究中,土壤 pH 值是会影响土壤砂粒占比的。结合主成分分析(图 5)的结果来看,即在不同植被恢复类型下,辽东栎次生林对土壤改良的效果优于其他三种对造林地改善效果相似的植被恢复类型。不同植被恢复类型对土壤的影响还需结合土壤微生物^[47]、植被覆盖度^[48]等共同讨论,孙长安等^[49]在我国植被恢复对土壤性状影响的研究综述中表明,植被恢复对土壤多种理化性状产生双向影响,不同地点、不同措施、不同恢复时间土壤性状的变化均不同,因此在探究不同植被恢复类型对土壤内各因子的影响,及因子间的相互关系时,需要注意当前的耕作方式、整地方式、试验地的立地条件、试验地水分含量等多种因素综合考虑。

根据不样地、不同年份的土壤物理性质及 pH 值对土壤化学性质的贡献度(图 4)可知,辽东栎次生林样地和油松样地中各组分贡献度大致相同,物理性质及 pH 值对土壤养分的影响基本一致,这一点不同于侧柏样地和刺槐样地,土壤容重在侧柏样地的植被恢复期间占主要贡献位置,土壤粉粒在刺槐样地的植被恢复期间占主要贡献位置。辽东栎次生林样地、油松样地相较于侧柏样地、刺槐样地,各组分协同影响土壤中化学性质,在栽植时确保各组分的等量增减。黄土高原地区在栽植侧柏时建议侧重考虑土壤容重对侧柏树种下各因子的影响,栽植刺槐时建议侧重考虑土壤粉粒对侧柏树种下各因子的影响。刺槐土壤粉粒、侧柏土壤容重、辽东栎次生林、油松各组分协同影响土壤化学性质。在较长的时间格局上监测土壤、植被内部各因子变化意义极大,从各组分含量、各组分相互作用的角度评估生态修复效果对植被恢复研究更具价值。本研究仅考虑了三个时间节点来研究植被恢复下土壤理化性质十二年间的变化,虽然仅有三个时间节点,但数据序列长度可以研究和揭示研究区域土壤理化性质随植被恢复进程的变化规律。大量的时间点将会给出更精确的结果,后续关于本研究区流域尺度的研究中,我们会更加注意本研究中的局限。目前土壤中元素变化研究还处于不断探索、不断开拓阶段,土壤养分为植被提供能量来源,土壤物理因素为植被创造生长环境,通过不同角度分析二者的相互影响规律,不断引入新的作用因子,可以为生态修复过程中的植被恢复部分提供数据支撑,为国土资源保护与建设提供新方法。

4.3 基于植被恢复对土壤理化特征影响的造林实践启示

不同植被恢复树种在长期植被恢复过程中对土壤理化性质的影响有明显差异,这些差异主要体现在各样地土壤中养分含量、土壤机械组成、土壤容重变化上。土壤全氮含量和土壤容重的变化被认为是植被恢复过程中,土壤肥力强弱表现的客观体现^[6,10,20]。土壤容重与土壤有机质含量呈现显著的负相关(图 3),相关研究^[10,36,40,46]也表现为土壤容重随土壤有机质含量上升而下降。不同植被恢复使土壤质地和结构得到改善(图 2),土壤物理特性有所提升,但土壤容重方面,仅辽东栎次生林有所下降,人工纯林并不能有效降低土壤容重,在土壤养分方面(图 2),四种植被类型的养分含量变化为刺槐(3.26 g/kg;13.13%)>辽东栎次生林(1.42 g/kg;4.49%)>侧柏(-0.87 g/kg;-3.27%)>油松(-1.93 g/kg;-6.42%),造成养分含量下降的主要原因是土壤全钾含量的大量流失,只有刺槐林在植被恢复过程中土壤全钾量有所增长,说明除刺槐林外,其他植被类型在黄土高原地区造林并不能改善土壤全钾在土壤中的保存能力。首先,本研究选取的试验样地,可将所研究的植被类型分为阔叶和针叶两种林型,根据不同林型对森林生态系统养分循环的影响的研究^[50-51]可知,不同林型因植物叶面积指数、叶片凋落物的可降解性、叶片凋落物厚度等的不同,进而影响森林生态系统的养分循环。其次,辽东栎次生林及刺槐林下具有更高的生物多样性,这与养分含量提升和土壤钾素的保存存在一定关系。根据不同植被恢复类型土壤性质的主成分分析(图 5),相比其他三种植被类型,辽东栎次生林具

有更高的多样性,不同土壤因子对辽东栎次生林更均衡,这一点通过不同植被恢复类型土壤性质的冗余分析(图4)也可以得出,辽东栎次生林稳定性更高。黄土高原地区植被恢复与退化生态系统重建工作有所不同,该地区初始土壤条件更贫瘠,应当根据初始土壤条件,造林树种应当考虑调整土壤结构或增加土壤养分等的实际需求,并且人工纯林的抚育工作应该遵循近自然森林经营基本原则^[52],珍惜立地潜力并尊重自然力,在不同区域实行具有立地特色的近自然森林经营,在考虑种间关系的基础上,建议人工纯林辅以不同林龄、不同树种,对现有纯林进行混交林建设。

5 结论

总体来讲,相比2006年,土壤养分含量、砂粒占比、粉粒占比随植被恢复时间逐渐增多,土壤容重、黏粒占比降低,为植物生长提供良好的土壤条件,也提供良好的生态效益。首先,不同植被恢复类型条件下土壤化学计量和物理性质存在差异,辽东栎次生林中土壤有机碳含量(2.291 g/kg)、全氮含量(0.044 g/kg)增加最多,油松样地全磷含量(0.256 g/kg)增加最高,刺槐样地全钾含量(2.279 g/kg)增加最高。其次,黄土高原长期植被恢复过程中,养分状况和物理性质在造林初期表现为极增(土壤有机碳、土壤全氮)、极减(土壤全钾)或者变化幅度较小(土壤pH值、土壤全磷、土壤容重、土壤机械组成),但经过长期植被恢复进程后,理化性质变化开始呈现相反趋势。然后,本研究通过分析长期植被恢复进程中土壤理化性质和化学计量的相互关系和互作机制,发现土壤有机物含量、土壤容重和土壤黏粒具有较高的相互关系。最后,本研究发现不同植被恢复类型条件下,土壤养分含量变化关系最紧密的土壤属性存在差异,例如刺槐的土壤粉粒、侧柏的土壤容重与多年土壤养分变化的同步关系最高。所以,进行植被恢复时,确认当前造林地土壤中,植被下土壤物理性质影响土壤化学性质较大组份的合理配置,遵循适地适树原则来达到提高生态修复效率的作用。

致谢:感谢山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站的数据支持。

参考文献(References):

- [1] Fu B, Wang S, Liu Y, Liu J B, Liang W, Miao C. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the loess plateau of China. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45(1): 223-243.
- [2] 张明, 高慧蓉, 莫惟轶, 陈爽, 朱荣, 王小春, 王志波, 李丹洋, 王瑞丽. 黄土高原草地植物叶脉性状沿环境梯度的变化规律. *生态学报*, 2022, 42(19): 8082-8093.
- [3] 李世东, 陈应发. 退耕还林还草工程综合效益监测进展与展望. *林业资源管理*, 2021(5): 1-9.
- [4] 袁和第, 信忠保, 侯健, 李宗善, 杨磊. 黄土高原丘陵沟壑区典型小流域水土流失治理模式. *生态学报*, 2021, 41(16): 6398-6416.
- [5] 刘卓, 马红彬, 李雯, 杨帆, 李剑, 韩旭彪, 兰剑. 黄土高原丘陵区退耕苜蓿草地补播禾草对苜蓿光合生理及群落特征的影响. *中国草地学报*, 2023, 45(2): 35-45.
- [6] 牛丽楠, 邵全琴, 宁佳, 杨雪清, 刘树超, 刘国波, 张雄一, 黄海波. 黄土高原生态恢复程度及恢复潜力评估. *自然资源学报*, 2023, 38(3): 779-794.
- [7] 李凯, 史磊. 黄河流域黄土高原地区水土保持与生态保护研究. *山西水土保持科技*, 2022(3): 24-25, 51.
- [8] Kong D X, Miao C Y, Gou J J, Zhang Q, Su T. Sediment reduction in the middle Yellow River Basin over the past six decades: attribution, sustainability, and implications. *Science of the Total Environment*, 2023, 882: 163475.
- [9] 张希彪, 上官周平. 黄土丘陵区主要林分生物量及营养元素生物循环特征. *生态学报*, 2005, 25(3): 527-537.
- [10] 黄宇, 汪思龙, 冯宗炜, 高洪, 王清奎, 胡亚林, 颜绍旭. 不同人工林生态系统林地土壤质量评价. *应用生态学报*, 2004, 15(12): 2199-2205.
- [11] 熊瑛楠, 冯天骄, 王平, 吴旭东. 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. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 228-237, 246.
- [12] 张希彪, 上官周平. 黄土丘陵区油松人工林与天然林养分分布和生物循环比较. *生态学报*, 2006, 26(2): 373-382.
- [13] 李裕元, 郑纪勇, 邵明安. 子午岭天然林与人工林群落特征比较研究. *西北植物学报*, 2005, 25(12): 2447-2456.
- [14] 魏强, 凌雷, 柴春山, 张广忠, 闫沛斌, 陶继新, 薛睿. 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质. *生态学报*, 2012, 32(15): 4700-4713.
- [15] 何友军, 王清奎, 汪思龙, 于小军. 杉木人工林土壤微生物生物量碳氮特征及其与土壤养分的关系. *应用生态学报*, 2006, 17(12): 2292-2296.
- [16] Chouangthavy B, Fourcade Y. Large-scale sampling of beetle communities in Laos shows that conversion of natural forests into plantations leads to a

- decline in family richness and abundance. *Ecology and Evolution*, 2023, 13(7):1-11.
- [17] 刘更另, 黄新江, 冯云峰. 红壤丘陵自然植被恢复及其对某些土壤条件的影响. *中国农业科学*, 1990, 23(3): 60-69.
- [18] Jasper D A, Robson A D, Abbott L K. Revegetation in an iron ore mine-Nutrient requirements for plant growth and the potential role of vesicular arbuscular (VA) mycorrhizal fungi. *Soil Research*, 1988, 26(3): 497.
- [19] 谢宝平, 牛德奎. 华南严重侵蚀地植被恢复对土壤条件影响的研究. *江西农业大学学报*, 2000, 22(1): 135-139.
- [20] 姜丽娜, 马洁, 刘建康, 王少杰, 赵健宇, 白建华. 毛乌素沙地不同植被恢复措施下土壤理化性质空间分布特征. *水土保持通报*, 2022, 42(5): 1-7.
- [21] 李鹏飞, 张兴昌, 郝明德, 崔勇兴, 张燕江, 朱世雷. 植被恢复对黄土高原矿区重构土壤理化性质、酶活性以及真菌群落的影响. *水土保持通报*, 2019, 39(5): 1-7.
- [22] 向珈瑶, 彭文甫, 陶帅, 银盈, 刘华山. 2000—2019 年四川省植被恢复成效与影响因素. *生态学报*, 2023, 43(4): 1596-1609.
- [23] 刘文祥, 万丹, 甘国权, 卢阳, 周火明. 干热河谷区光伏电站建设的生态效应与植被恢复探讨. *中国水土保持*, 2023(1): 15-19.
- [24] 刘成刚, 薛建辉. 喀斯特石漠化山地不同类型人工林土壤的基本性质和综合评价. *植物生态学报*, 2011, 35(10): 1050-1060.
- [25] Lu Z T, Wang P, Ou H, Wei S X, Wu L C, Jiang Y, Wang R J, Liu X, Wang Z H, Chen L J, Liu Z M. Effects of different vegetation restoration on soil nutrients, enzyme activities, and microbial communities in degraded Karst landscapes in southwest China. *Forest Ecology and Management*, 2022, 508(15): 120002.
- [26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [27] 朱秋潮, 范浩定. 土壤颗粒组成分级标准的换算. *土壤通报*, 1999, 30(2): 53-54.
- [28] 李晶晶, 张建国. 水土流失仍是黄河流域重要生态问题. *中国科学报*, 2021-11-18(004).
- [29] 任美玲, 李伟. 黄土高原的生态修复问题研究. *科技情报开发与经济*, 2014, 24(3): 152-153, 156.
- [30] 穆兴民, 李朋飞, 刘斌涛, 赵广举, 高鹏, 孙文义. 1901—2016 年黄土高原土壤侵蚀格局演变及其驱动机制. *人民黄河*, 2022, 44(9): 36-45.
- [31] 索安宁, 王兮之, 林勇, 葛剑平, 秦向华. 基于遥感的黄土高原典型区植被退化分析——以泾河流域为例. *遥感学报*, 2009, 13(2): 291-299.
- [32] 陶吉杨, 谭军利, 郑飞龙, 王西娜, 张维江. 宁南山区植被恢复模式对土壤主要酶活性、微生物多样性及土壤养分的影响. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(3): 207-217.
- [33] 李文龙, 刘美英, 张有新, 赵晶. 植被恢复模式对光伏阵列间土壤养分的影响. *山西农业大学学报: 自然科学版*, 2020, 40(5): 16-23.
- [34] 高贤明, 陈灵芝. 北京山区辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 群落物种多样性的研究. *植物生态学报*, 1998, 22(1): 23-32.
- [35] 康迪. 黄土高原人工刺槐林群落演化特征及稳定性综合评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [36] 苟小林, 郭静静, VLADIMIROV Dmitrii, 聂富育, 罗雪梅. 高寒半湿润沙化地土壤养分对植被恢复的响应研究. *环境保护科学*, 2022, 48(5): 134-140.
- [37] 赵元, 张伟, 胡培雷, 肖峻, 王克林. 桂西北喀斯特峰丛洼地不同植被恢复方式下土壤有机碳组分变化特征. *生态学报*, 2021, 41(21): 8535-8544.
- [38] 冯天骄, 卫伟, 陈利顶, 于洋, 杨磊, 张涵丹. 陇中黄土区坡面整地和植被类型对土壤化学性状的影响. *生态学报*, 2016, 36(11): 3216-3225.
- [39] 肖烨, 商丽娜, 黄志刚, 张文广, 薛振山, 张仲胜, 吕宪国. 吉林东部山地沼泽湿地土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征. *地理科学*, 2014, 34(8): 994-1001.
- [40] 张恒硕, 查同刚, 张晓霞. 晋西黄土区退耕年限对土壤物理性质的影响. *北京林业大学学报*, 2020, 42(6): 123-133.
- [41] 张艾明, 刘苏蓝, 余洪茜, 朱建宇, 徐玉梅. 农牧交错区不同玉米种植年限对土壤氮磷养分的影响研究. *湖北农业科学*, 2022, 61(14): 74-77.
- [42] Zhou G Y, Xu S, Ciaia P, Manzoni S, Fang J Y, Yu G R, Tang X L, Zhou P, Wang W T, Yan J H, Wang G X, Ma K, Li S G, Du S, Han S J, Ma Y X, Zhang D Q, Liu J X, Liu S Z, Chu G, Zhang Q M, Li Y L, Huang W J, Ren H, Lu X K, Chen X Z. Climate and litter C/N ratio constrain soil organic carbon accumulation. *National Science Review*, 2019, 6(4): 746-757.
- [43] Shaobo W, Xia L, Zefu L, Hui Z, Xiangyuan Y, Yujie Z, Jing L, Yanyan Y, Hongcui P, Fengying D, Danying W, Song C, Peng W, Chao Z, Lianguang S, Yue Z, Peng Y, Ming Z, Jirong H, Bock Ralph, Qian Q, Wenbin Z. A transcriptional regulator that boosts grain yields and shortens the growth duration of rice. *Science*, 2022, 377(6604): 370-371.
- [44] 苗娟, 周传艳, 李世杰, 闫俊华. 不同林龄云南松林土壤有机碳和全氮积累特征. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 625-631.
- [45] 王萍萍, 段英华, 徐明岗, 张水清, 王小利. 不同肥力潮土硝化潜势及其影响因素. *土壤学报*, 2019, 56(1): 124-134.
- [46] 张晓霞, 杨宗儒, 查同刚, 张志强, 王高敏, 朱聿申, 吕志远. 晋西黄土区退耕还林 22 年后林地土壤物理性质的变化. *生态学报*, 2017, 37(2): 416-424.
- [47] Xiao D, He X Y, Zhang W, Hu P L, Sun M M, Wang K L. Microbiological mechanism underlying vegetation restoration across climatic gradients in a Karst ecosystem. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(16): 3245-3259.
- [48] Hagen D, Mehlhoop A C, Torsæter E, Kyrkjæide M O, Grainger M J, Evju M. Assessing the effect of mitigation efforts to improve vegetation recovery in powerline construction sites across Norway. *Ecological Engineering*, 2022, 184: 106789.
- [49] 孙长安, 王炜炜, 董磊, 尹忠东. 我国植被恢复对土壤性状影响研究综述. *长江科学院院报*, 2008, 25(3): 6-8, 22.
- [50] 杜良贞. 黄土高原不同树种枯落叶混合分解对微量元素释放的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [51] 张悦, 张艺凡, 马怡波, 刘嫦娥, 段昌群, 字玉奋, 唐彬程, 张维兰. 森林生态系统凋落物分解影响因素研究进展. *环境生态学*, 2023, 5(4): 45-56.
- [52] 赵明, 孟京辉, 陆元昌. 我国人工林近自然经营的可行性与必要性. *河北林果研究*, 2013, 28(2): 136-139.