

DOI: 10.20103/j.stxb.202309292115

刘亚博, 冯天骄, 王平, 卫伟. 黄土丘陵区典型小流域不同植被恢复方式土壤理化性质差异及其影响因素. 生态学报, 2024, 44(15): 6652-6666.

Liu Y B, Feng T J, Wang P, Wei W. Differences in soil physicochemical properties and influencing factors under different vegetation restoration methods in typical small watersheds in Loess hilly areas. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(15): 6652-6666.

# 黄土丘陵区典型小流域不同植被恢复方式土壤理化性质差异及其影响因素

刘亚博<sup>1,2</sup>, 冯天骄<sup>1,2,\*</sup>, 王平<sup>1,2</sup>, 卫伟<sup>3</sup>

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:**黄土高原不同小流域由于环境特点和植被恢复方式的不同, 导致其生态效益存在地带性差异。为了研究不同环境和植被恢复方式下土壤理化性质的差异性及其影响机制, 选取黄土高原两个小流域不同植被恢复方式(油松人工林、侧柏人工林和自然恢复对照)作为研究对象, 对比分析植被恢复方式和环境特点对土壤养分储量和水分状况, 以及植被生长状态等生态恢复效益的影响和贡献。结果表明: (1) 吉县自然恢复下全氮含量最高, 均值为 0.79g/kg; 有机碳均值含量表现为定西油松最高, 吉县对照次之, 其均值分别是 16.91g/kg, 13.46g/kg; 全磷含量和全钾含量最高的是吉县油松样地和定西的侧柏样地, 其均值为 2.40g/kg 和 23.43g/kg。 (2) 土壤速效氮、速效磷、速效钾的含量, 吉县的油松样地、侧柏样地和自然对照样地分别高于定西 2.89%, 81.03% 和 7.49%。 (3) 基于主成分分析(PCA)和方差分解(VP)结果, 在不同小流域影响土壤养分和水分含量的主要因素有所差异。其中吉县和定西小流域影响土壤养分的主要因素分别为土壤物理性质和植被属性, 解释度分别为 79.92%、55.3%; 而土壤含水量主要受降水量和土壤-植被共同影响, 其解释度分别为 87.06%、43.53%。综上所述, 多雨条件的吉县地区植被适合自然恢复, 而相对干旱的定西地区植被则适合人工恢复。考虑黄土高原植被恢复的人工和自然恢复方式, 结果证明不同小流域的降水量与土壤含水量等环境特点影响植被生长状态和植被恢复的生态效益, 可为因地制宜的科学植被恢复策略提供数据和理论支持。

**关键词:**黄土高原; 人工林和天然林; 土壤理化性质; 生态效益; 方差分解

## Differences in soil physicochemical properties and influencing factors under different vegetation restoration methods in typical small watersheds in Loess hilly areas

LIU Yabo<sup>1,2</sup>, FENG Tianjiao<sup>1,2,\*</sup>, WANG Ping<sup>1,2</sup>, WEI Wei<sup>3</sup>

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

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

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

**Abstract:** Due to differences in environmental characteristics and vegetation restoration methods, there are regional differences in the ecological benefits of different small watersheds on the Loess Plateau. In order to study the differences and influencing mechanisms of soil physicochemical properties under different environments and vegetation restoration methods, this study selected two small watersheds on the Loess Plateau with different vegetation restoration methods (*Pinus*

基金项目: “十四五”国家重点研发计划(2022YFB4202100); 国家自然科学基金(42371114, 52179056, 41901021)

收稿日期: 2023-09-29; 采用日期: 2024-05-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fengtianjiaobest@sina.cn

*tabulaeformis* artificial forest, *Platycladus orientalis* artificial forest, and natural restoration control) as the research objects, and compared and analyzed the impact and contribution of vegetation restoration methods and environmental characteristics on soil nutrient storage, soil moisture status, as well as vegetation growth status and other ecological restoration benefits. The results showed that: (1) Under natural restoration in Jixian County, the total nitrogen content was the highest, with an average of 0.79 g/kg; The average organic carbon content of *Pinus tabulaeformis* in Dingxi was the highest, followed by the control in Jixian, with an average of 16.91 g/kg and 13.46/kg, respectively; The highest total phosphorus and potassium contents were found in the *Pinus tabulaeformis* sample plots in Jixian County and *Platycladus orientalis* sample plots in Dingxi, with an average of 2.40 g/kg and 23.43 g/kg, respectively. (2) The contents of soil available nitrogen, available phosphorus, and available potassium in the *Pinus tabulaeformis*, *Platycladus orientalis*, and natural control plots in Jixian were 2.89%, 81.03%, and 7.49% higher than those in Dingxi, respectively. (3) Based on the results of Principal Component Analysis (PCA) and Decomposition of Variance (VP), the main factors affecting soil nutrients and water content varied in different small watersheds. The main factors affecting soil nutrients in Jixian and Dingxi small watersheds were soil physical properties and vegetation attributes, with explanatory degrees of 79.92% and 55.3%, respectively; The main factors affecting soil moisture content were rainfall and soil vegetation, with explanations of 87.06% and 43.53%, respectively. The above results indicate that the vegetation in Jixian area, which is prone to rainfall, is suitable for natural restoration, while the vegetation in Dingxi area, which is relatively arid, is suitable for artificial restoration. This study considers artificial and natural restoration methods for vegetation restoration on the Loess Plateau. The results demonstrate that the environmental characteristics such as rainfall and water content in different regions affect vegetation growth status and ecological benefits of vegetation restoration. This can provide data and theoretical support for scientific vegetation restoration strategies tailored to local conditions.

**Key Words:** the Loess Plateau; planted forests and natural forests; soil physical and chemical properties; ecological benefits; variance decomposition

在自然因素和人类活动的影响下,黄土高原历史上出现了严重的水土流失。自 1999 年实施退耕还林(草)工程以来,黄土高原总体植被覆盖度呈现出显著的区域性增加趋势,水土保持情况明显好转<sup>[1-3]</sup>。其植被覆盖度从 1999 年的 31.6% 提高到 2017 年的 65%, 植被在涵养水源、改良土壤、增加地面覆盖、防止土壤侵蚀方面起到重要作用,进而减少了土壤养分流失,使生态效益有了显著地提高,有效遏制了黄土高原地区的水土流失,特别是在半湿润和半干旱地区,大规模的植被恢复在防止土地退化和提高生物多样性方面发挥着至关重要的作用<sup>[4]</sup>。基于以上背景,目前研究重点是筛选合理有效的生态恢复模式,从而达到高效改善生态环境、实现森林可持续发展的目标<sup>[5-6]</sup>。

土壤养分含量是衡量土壤肥力状况和生态系统恢复状况的重要指标<sup>[7]</sup>。植树造林是提高土壤养分含量的主要措施,它能够改变森林生态系统植物组成、群落结构,以及通过改变枯落物、土壤微生物群落等方式进而影响土壤养分含量<sup>[8]</sup>。王雅等人<sup>[9]</sup>发现黄土高原不同植被类型影响土壤酶活性、土壤养分以及微生物多样性的程度不同,杨君珑等<sup>[10]</sup>在六盘山地区研究发现该地区合理配置人工林植被恢复模式对土壤养分积累和酶活性的促进作用要优于自然恢复模式。植被恢复过程中不断向土壤输入有机物质,增加了土壤养分含量,改变了土壤物理特性,进而改善了土壤质量<sup>[11]</sup>。不同的土壤类型下,人工造林植被的生长状况不同<sup>[12]</sup>,以及对土壤水分影响也有所差异<sup>[13]</sup>。不同土地利用方式下,人工林营造中,人工混交林在改善土壤理化性质方面有更好的效果<sup>[14-16]</sup>。李裕元等<sup>[17]</sup>通过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。张维伟等<sup>[18]</sup>在黄土高原南部麻栎不同群落类型中发现,应以顺应自然演替规律的近自然经营方式为主。不同植被恢复类型不同,其土壤养分含量也有所差异<sup>[19]</sup>,天然林无论物种组成、树种多样性指数、群落结构、土壤含水率和土壤理化性质均优于人工林<sup>[20-22]</sup>。然而,一些研究发现人工植

树造林并没有显著降低土壤的氮素养分含量,反而土壤氮素养分含量明显高于植被自然恢复<sup>[23]</sup>,刘宥延等人的研究也表明人工林相对于天然林具有更好的土壤养分保持能力<sup>[24]</sup>。前人的研究着重于单一小流域,人工林和天然林的土壤理化性质特征等差异,对于不同小流域人工恢复和自然恢复适应性比较研究较少。黄土高原不同小流域人工林与天然林恢复程度也存在差异,需要针对不同小流域人工林与天然林的土壤性质和水分含量等进行深入比较和探讨,揭示其差异原因,为黄土高原不同小流域的森林恢复途径提供理论依据。

为了研究黄土高原不同环境条件和植被类型对土壤理化性质的影响,本研究选择了山西省吉县蔡家川流域和甘肃省定西龙滩流域作为研究区域。在这两个区域中,选择自然恢复和人工恢复两种植被恢复方式,将油松人工林、侧柏人工林和自然对照三种植被类型作为研究对象,通过对植被属性(树高、胸径、冠幅)、土壤机械组成、土壤养分含量、降水量和土壤含水量等分析,为黄土高原地区在选择植被恢复类型和优化恢复方式上提供理论依据。

### 1 材料与方 法

#### 1.1 研究区概况

本文研究区分别在黄土高原的两个不同地点,如图 1 所示,地点一是在山西省临汾市吉县蔡家川流域(35°53'—36°21'N,110°27'—111°07'E),地貌类型是黄土高原梁状丘陵沟壑区。海拔高度为 440—1820m,多年平均降水量为 579mm,其中最大年降水量达 828.9mm(1956 年),最小年降水量 277.7mm(1997 年),年蒸发量 1729mm,小流域年平均气温 9.9℃,年均日照时数 2563.8h,平均无霜期为 172d,土壤类型为褐土。天然植被有辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、山杨(*Populus davidiana*)、旱柳(*Salix matsudana*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、白皮松(*Pinus bungeana*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、蒿类(*Artemisia*)、杠柳(*Periploca sepium*)、山桃(*Prunus davidiana*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)、苹果(*Malus pumila*)等,人工林主要以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等树种为主,下层伴有沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)、茅玫(*Rubus parvifolius*)等<sup>[25]</sup>。

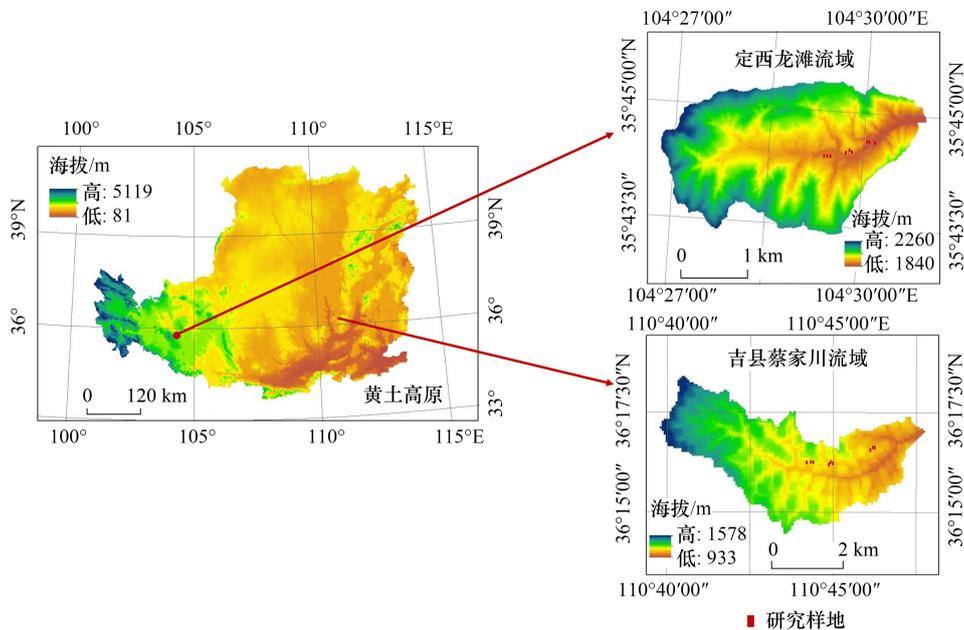


图 1 研究区概况图

Fig.1 Overview of the study area

地点二是在甘肃省定西龙滩流域(35°43′—35°46′ N, 104°27′—104°31′ E), 见图 1, 地貌类型是黄土丘陵沟壑区, 海拔高度为 1840—2260m, 多年平均降水量 386.3mm, 其中年最大降水量 721.88mm(1967 年), 最小降水量是 248.7mm(1969 年), 潜在蒸发量为 1649mm, 流域年均气温为 6.8℃, 年均日照时数 2500h, 平均无霜期 152d, 土壤类型为黄绵土。天然植被以禾本科和菊科为主, 有冰草(*Wheatgrass*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、针茅(*Stipa capillata*)、蒿类(*Artemisia*)以及锦鸡儿(*Caragana sinica*)等, 人工草地以紫花苜蓿(*Alfalfa*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens*)等为主, 人工林以柠条(*Caragana korshinskii*)、新疆杨(*Populus alba* Linn. var. *pyramidalis* Bunge)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、红柳(*Tamarix ramosissima*)为主, 并伴有少量的柳树(*Salix babylonica*)、榆树(*Ulmus pumila*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)以及沙棘灌丛(*Hippophae rhamnoides*)等<sup>[26]</sup>。

## 1.2 研究样地典型性分析

黄土高原地势西北高, 东南低, 自西北向东南呈波状下降, 且自南而北兼跨暖温带、中温带两个热量带, 自东向西横贯半湿润、半干旱两个干湿区<sup>[27]</sup>。本研究选择黄土丘陵区两个气候差异较大的小流域, 分析其植被恢复和生态环境改善状态。吉县蔡家川流域受人类活动影响, 植被破坏严重, 植被覆盖率低, 土地退化严重, 水土流失严重。定西龙滩流域受干旱气候和人类活动影响, 植被稀疏, 土地退化严重, 草原过度放牧导致植被破坏。

吉县蔡家川流域代表了黄土高原东南部暖温带半湿润褐土落叶阔叶林区, 地貌类型为黄土梁状丘陵沟壑和残塬沟壑。森林植被包括吕梁山土石山区的天然次生林和黄土区的人工林。其中嵌套流域蔡家川流域面积仅 40km<sup>2</sup>, 海拔为 870—1600m, 嵌套了天然次生林流域、封山育林流域、人工林流域、农林复合流域、农牧复合流域、农地流域等不同类型流域, 代表了黄土高原半湿润区主要森林生态系统。

定西龙滩流域代表了黄土高原西南部典型的半干旱黄土丘陵区, 梁峁起伏, 山多川少, 气候干旱, 该区光辐射较强, 当地土壤以黄绵土为主, 较单一, 土体干燥, 有机质和土壤水分含量低, 土壤贫瘠, 土壤孔隙度一般在 60%左右, 侵蚀严重<sup>[28]</sup>。该流域中下游是近年来治理的重点地区, 流域面积为 16.1km<sup>2</sup>, 不仅治理的林草面积大, 植被覆盖良好, 还兴修了许多梯田<sup>[29]</sup>, 增加了生物群落的结构复杂性。该研究区植被类型属草原地带, 拥有丰富的植被类型, 天然植物 56 科 244 种, 包括针叶林、阔叶林、灌木林等, 展现了黄土高原地区的生态多样性和植被适应性<sup>[30]</sup>。

综上所述, 通过对“吉县蔡家川流域”和“定西龙滩流域”进行植被恢复对比研究, 可以深入了解黄土高原不同小流域植被恢复的效果及影响因素, 为制定更有效的植被恢复策略和生态环境保护政策提供科学依据。

## 1.3 样地设计与设置

油松适应性强, 根系发达, 树姿雄伟, 枝叶繁茂, 有良好的保持水土和美化环境的功能<sup>[31]</sup>, 侧柏耐旱、抗盐碱, 在平地或悬崖峭壁上都能生长, 油松和侧柏都是黄土高原地区最主要的生态修复树种<sup>[32]</sup>。油松和侧柏保水能力强, 已被验证了在当地能够大范围推广。因此, 在两个流域内分别选择侧柏人工林、油松人工林和天然对照 3 种植被类型的林分, 用以分析不同黄土丘陵区植被恢复方式下土壤养分和水分特性的差异。每个代表性样地的取样方法、分布位置和处理方法保持一致, 从而保证在采样点选择与样品采集上的合理性。

为协同分析各因素对精度的综合作用, 本研究设计了 25m×25m, 40m×40m, 50m×50m 三种面积的样地进行植被调查, 最终发现 40m×40m 作为研究样地基本能够包含林分中的绝大多数物种。因此, 为了更加详细地观测和记录森林内部的结构和功能, 我们在两个研究区中, 选择坡度 20—25 度左右的阳坡, 人工林龄在 20—23 年的 3 个 40m×40m 的样地, 每块样地选择树种分布均匀, 群落结构完整, 层次分明、林分发育阶段比较统一, 能够更好地代表人工林和天然对照的典型样地。

在每块典型样地内根据其生长密度、群落盖度等设置 3 个坡向、坡度、坡位一致的 10m×10m 的植被调查样方, 在每块典型样地内按照“品”字方式设 3 个 10m×10m 的植被调查样方。选择树木长势良好, 群落特征和空间分布格局清晰, 排除树木生长过剩或者一些枯木, 保证调查取样的完整性。按照“品”字方式设置植被样方可以确保样方的布局均匀分布在整个样地内, 避免了样方布局不均匀导致的偏差。每个 10m×10m 的植

被调查样方的大小适中,足够容纳多个乔木个体,从而可以综合考虑样方内不同乔木个体的特征和属性,提高样方的代表性。并在样方内采用对角线法选取 5 个剖面进行取土,最后混合 5 个剖面土样,以确保取样方式的科学性、随机性、代表性和典型性<sup>[33]</sup>。6 块样地根据不同的植被恢复方式对土壤理化性质、土壤含水量、植被属性等进行对比分析。各小区的具体情况、植被状况、地理信息如表 1:

表 1 吉县和定西地理特点分析  
Table 1 Analysis of geographical characteristics of Jixian County and Dingxi County

因子 Parameters	吉县蔡家川流域 Caijiachuan Watershed in Jixian			定西龙滩流域 Longtan Watershed in Dingxi		
	油松人工林	侧柏人工林	天然林地对照	油松人工林	侧柏人工林	天然林地对照
经纬度 Latitude and longitude	N 36°16'23" E 110°45'33"	N 36°16'22" E 110°45'33"	N 36°15'59" E 110°43'41"	N 35°44'24" E 104°30'39"	N 35°44'11" E 104°30'24"	N 35°44'21" E 104°30'25"
坡向 Aspect	阳坡	阳坡	阳坡	阳坡	阳坡	阳坡
坡度 Gradient	26°	25°	23°	20°	26°	23°
林龄 Stand age/a	21	22	/	23	23	/
郁闭度 Coverage/%	34	25	41	40	30	25
土质 Soil properties	粉壤土	粉壤土	粉壤土	砂壤土	砂壤土	砂壤土
林分密度 Stand density (株/hm <sup>2</sup> )	1600	1700	1075	1500	1500	800
林下主要植被 Main vegetation under the forest	陕西荚蒾 ( <i>Viburnum schensianu</i> )、 黄刺玫 ( <i>Rosa xanthina</i> )、 丛生隐子草 ( <i>Cleistogenes caespitosa</i> )、 裂叶堇菜 ( <i>Viola dissecta</i> )	丁香( <i>Syzgium aromaticum</i> )、 胡枝子( <i>Lespedeza bicolor</i> )、白刺花 ( <i>Sophora davidii</i> )、 矮苔草( <i>Carex humilis</i> )	山杨( <i>Populus davidiana</i> )、 沙棘( <i>Hippophae rhamnoides</i> )、 虎榛子( <i>Ostryopsis davidiana</i> )、 矮苔草( <i>Carex humilis</i> )	中华隐子草 ( <i>Cleistogeneschinensis</i> )、 冷蒿( <i>Artemisia frigida</i> )、 阿尔泰狗娃花 ( <i>Heteropappusaltaicus</i> )、 赖草 ( <i>Leymussecalinus</i> )	束伞亚菊 ( <i>Ajaniaparviflora</i> )、 阿尔泰狗娃花 ( <i>Heteropappusaltaicus</i> )、 二裂委陵菜 ( <i>Potentillabifurca</i> )、 长芒草 ( <i>Stipabungeana</i> )	尔泰狗娃花 ( <i>Heteropappus altaicus</i> )、 披针叶野决明 ( <i>Thermopsis lanceolata</i> )、 长芒草( <i>Stipa bungeana</i> )

## 1.4 样品采集和数据获取

### 1.4.1 土壤理化性质

在两个小流域中,每个植被调查样方中采用对角线法设置 5 个土壤取样点,在 2017 年和 2018 年 7 月生长季进行取土采样,在 0—100cm 内,分土层取土壤样品,具体采样土层分别是 0—10cm, 10—20cm, 20—40cm, 40—60cm, 60—80cm, 80—100cm。在 5 个取样点中,每个土层取 1 次,共 5 次重复,最后混合为一个样品,最终总共 3 份土壤样品,以表示各林地内土壤养分状况,每个代表性样地的取样方法、分布位置和处理方法保持一致。用 100cm<sup>3</sup> 环刀在每层土壤中间取原状土样,每个剖面分层采集土样,每次取样后用塑封袋带回实验室进行化验和测定。所有样品中的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,全钾采用的是碱融—原子吸收分光光度法进行测定,速效氮采用碱解扩散法,速效磷采用 0.5mol/L 的 NaHCO<sub>3</sub> 液浸提—硫酸钼锑抗混合比色法,速效钾用醋酸铵浸提—火焰光度法测定,土壤机械组成用湿筛法分析,再计算出不同粒径区间在土壤中所占的百分比。

### 1.4.2 植被属性和气象要素

在每块植被调查样方内,进行每木检尺,测量并记录每棵树的树种、树高、胸径、冠幅等植被属性。在两小流域内设置便携式气象站(Vantage Pro2, Davis, USA),观测并记录降水量、空气湿度、太阳辐射、风速、风向、气压等气象数据。土壤水分监测方法:6 块林地 0—100cm 土层内每隔 20cm 布设土壤温湿度探头,以每 30min 监测 1 次的频度收集至数据采集器(U30-NRC: EM 50 和 5-TM; Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA),本研究使用的生长季动态数据是于 2017 年和 2018 年的监测数据。

## 1.5 数据分析

利用 Excel 2016 进行数据整理,获得的样品数据均采用平均值来表示该研究区的特性。采用 SPSS 单因

素方差分析法 (one-way ANOVA) 对不同植被类型下土壤有机碳、氮磷钾含量, 速效氮、速效磷、速效钾含量及其化学计量比、土壤机械组成和容重、植物属性等数据进行相关性分析, 并利用 Canoco 5 进行贡献度分析, 利用 Origin 和 R 4.2.1 软件对植物与土壤等有关属性进行相关图表的绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 黄土高原两个小流域不同植被恢复模式下土壤中有机碳、氮磷钾含量的差异

本文将吉县的油松、侧柏、天然对照中 3 个样地和定西的 3 个样地作为 6 个处理, 进行了单因素方差分析 (LSD、邓肯 (D)、方差齐性检验)。图 2 可知, 有机碳均值含量表现定西油松林的有机碳含量居首, 其后是吉县的自然对照, 定西油松与吉县对照的有机碳均值分别为 16.91g/kg、13.45g/kg, 吉县侧柏有机碳含量最低, 其平均值为 10.71g/kg。在定西, 相比于侧柏和天然林, 油松生长速度快, 具有较好的固碳效果, 而在吉县则是天然林具有较高的碳储存能力。两个小流域不同植被的土壤全氮含量吉县大于定西, 但无明显差异 ( $P > 0.05$ ), 其中吉县自然对照的全氮含量平均最高, 其值为 0.79g/kg, 油松样地的全氮平均含量最低, 而定西与之相反, 油松样地和侧柏样地的全氮含量均高于自然对照, 且油松样地的全氮平均含量最高。在吉县地区的三

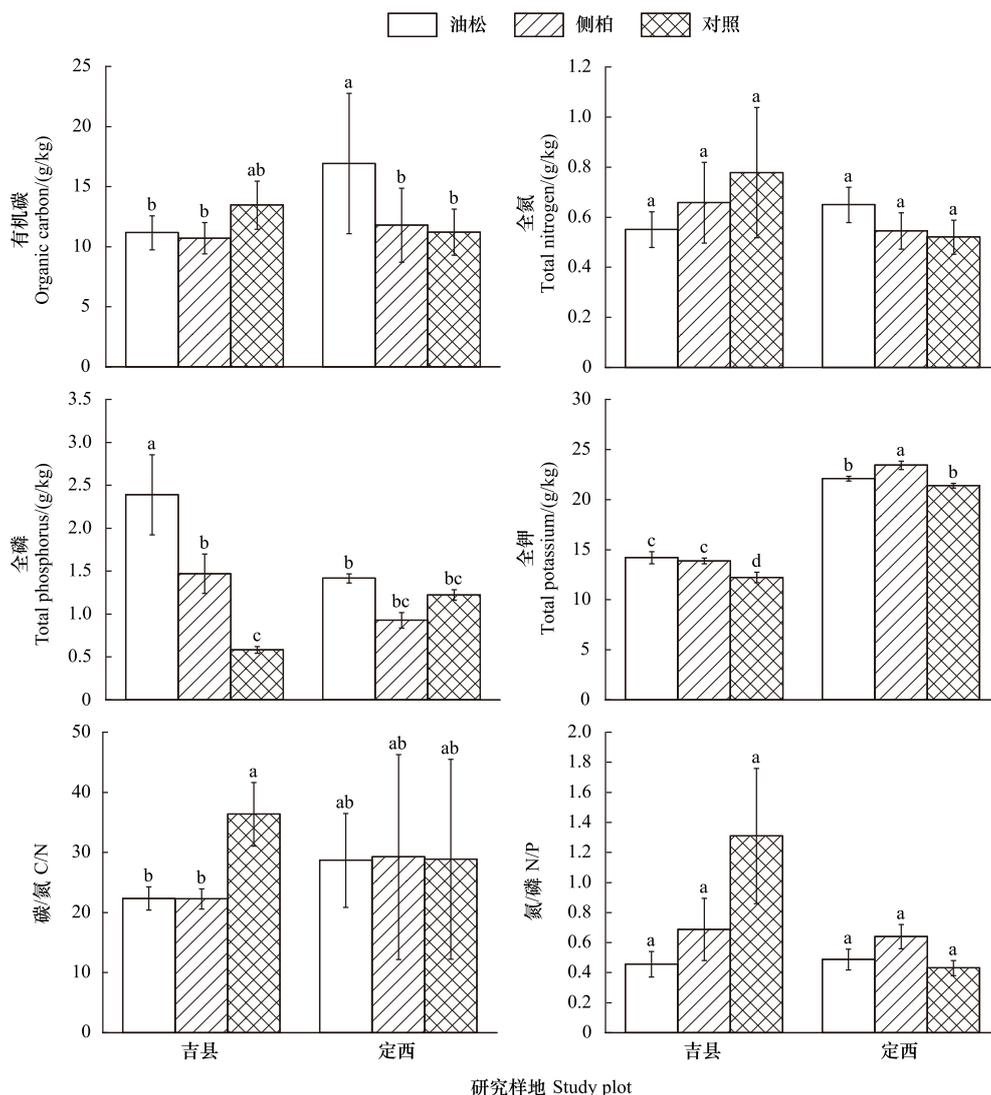


图 2 不同小流域土壤中有机碳、氮磷钾含量及化学计量比

Fig.2 Content and stoichiometric ratio of organic carbon, nitrogen, phosphorus, and potassium in soils of different regions  
不同字母表示各处理之间存在显著差异 (one-way ANOVA,  $P < 0.05$ )

种植被类型的土壤中,吉县油松的全磷含量最高,平均值为 2.39g/kg。相比之下,吉县自然对照的全磷含量最低,平均值为 0.59g/kg。而定西则是侧柏样地的全磷含量最低。在两个研究区中,定西土壤中全钾含量高于吉县土壤中全钾含量,且有明显的差异( $P<0.05$ ),在吉县和定西,自然对照土壤中的全钾含量低于其他两个样地,其平均值分别为 12.24g/kg,21.39g/kg。吉县蔡家川流域天然林地植被覆盖度和较高,植物残体和根系的分解会释放养分到土壤中,以及该地区降水量大,有利于土壤中养分的淋洗和富集,增加土壤养分含量。而定西龙滩流域则是天然林地相比于人工林地植被覆盖度较低,植物对土壤中养分的吸收也相对较少。对于 C:N,吉县自然对照最高,侧柏的最低,吉县 N:P 高于定西,其中吉县自然对照的最高,吉县油松的最低,但无明显差异( $P<0.05$ )。

## 2.2 黄土高原两个小流域不同植被恢复模式下土壤 pH 值以及土壤中速效氮、速效磷、速效钾含量的差异

从图 3 可知,不同地貌类型下,在两个不同的小流域中,定西地区的油松林、侧柏、和自然对照组的土壤 pH 值都略大于吉县,6 块样地的土壤 pH 值都在 8 左右,偏碱性。

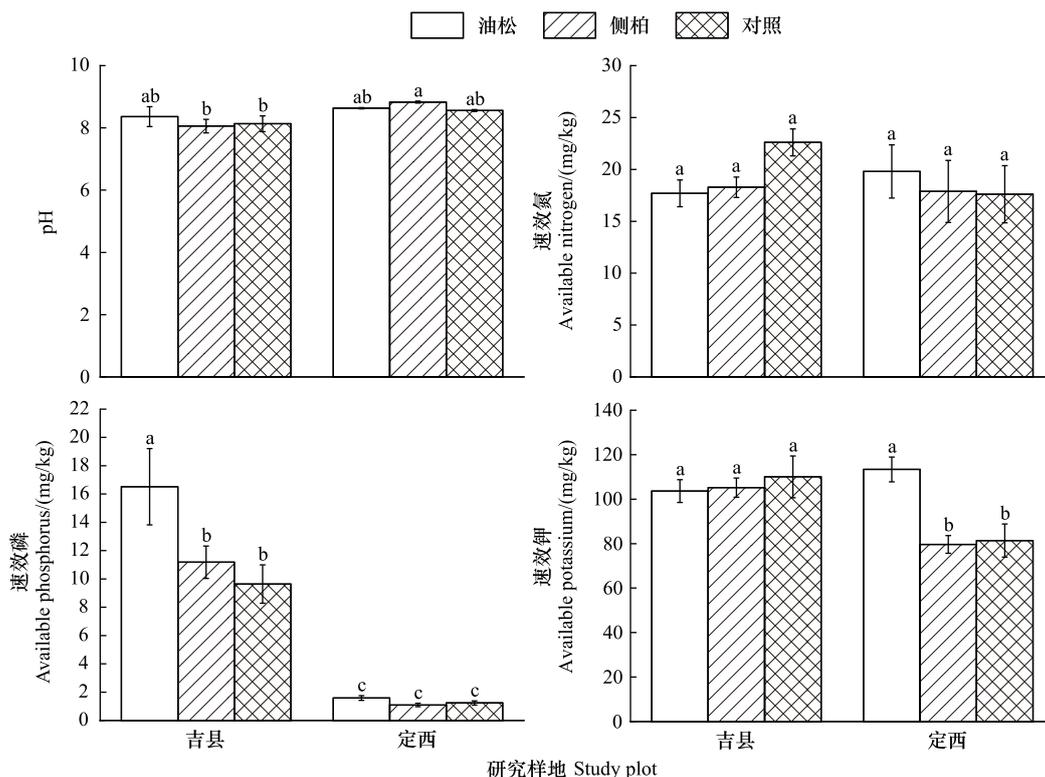


图 3 不同小流域土壤 pH 值和土壤中速效氮磷钾含量

Fig.3 Soil pH and Available Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Content in Different Regions

在黄土高原不同小流域中,不同植被速效氮含量表现无明显差异( $P>0.05$ ),但其中吉县小流域的自然对照组的土壤中速效氮含量最高,其平均值为 22.61g/kg,定西土壤中速效氮含量低于吉县。在定西,不同植被下,油松林土壤中速效氮含量高于其他两种植被,自然对照的速效氮含量最低,而在吉县,自然对照土壤中速效氮含量明显高于其他两种植被。速效磷含量表现是吉县含量远远高于定西,含量最高的是吉县油松林,其平均值为 16.51g/kg;在同一小流域,不同植被条件下,定西油松土壤中速效磷含量最高、天然对照次之,侧柏土壤速效磷含量最低,但它们之间差异不明显( $P>0.05$ ),而在吉县不同植被类型下土壤速效磷含量则是油松最高,天然对照最低,且有明显差异( $P<0.05$ )。速效钾含量在定西土壤中不同植被下有明显差异( $P<0.05$ ),即油松林土壤中速效钾含量明显高于其他两种植被,而在吉县不同植被土壤中自然对照的高于其他两种,但无明显差异( $P>0.05$ )。综上所述,吉县蔡家川流域林地土壤速效氮、磷、钾含量相对较高,其中天然林地由于

茂密的植被通过吸收土壤中的速效养分,以及林地中植物的残体、枝叶等有机质逐渐分解,释放出速效养分,促进了速效养分的循环积累,使得土壤中的速效养分含量相对较高。

### 2.3 土高原两个小流域不同植被恢复模式下的降水量及土壤含水量的比较

图 4 分别为 2017 年和 2018 年定西和吉县两个小流域,4 月 1 日到 10 月 31 日每天的降水量,从图 4 中可以看出吉县每年的降水量远大于定西年降水量。在 4 月、5 月和 10 月降水分布较为零散,6 月、7 月、8 月和 9 月降水分布集中且较大,两个小流域的降水程度表现为 2017 年的降水量远大于 2018 年的降水量。在 2017 年 7 月份吉县和定西降水量达到最大,值分别为 299.8mm 和 105.2mm,在吉县 4、5、6 月份的降水量相当,其降水量分别为 51.7mm、56.6mm、59.3mm。在 2018 年吉县和定西降水量在 7 月份也达到最大,其值分别是 124.5mm 和 43.4mm,从中可以看出吉县的降水量远远大于定西。

吉县的 2017 年和 2018 年的年降水总量分别是 674.8mm,423.6mm;定西这两年的年降水总量为 323.2mm,157.8mm。吉县油松、侧柏及自然对照三块林分的土壤含水量远远大于定西的,其中吉县自然对照的土壤体积含水量最高,定西油松最低。在吉县,侧柏、油松、自然对照的土壤体积含水量依次是 16.91%、17.23%、18.65%,在定西依次为 10.91%、8.59%、8.99%。吉县蔡家川流域降水较多,土壤水分较充足,从而有利于植物吸收养分和养分在土壤中迁移。而定西玲龙滩流域水分紧缺,导致养分在土壤中的迁移速度较慢,影响养分的有效利用。

### 2.4 黄土高原两个小流域不同植被恢复模式下土壤物理性质的差异

从图 5 可以看出,在吉县蔡家川流域和定西龙滩流域内土壤机械组成主要分布在粉砂粒径中,砂粒和粉粒所占比重相差不大,粘粒含量最低,仅在 30% 上下,所以吉县和定西这两个小流域是黄土母质发育较为普

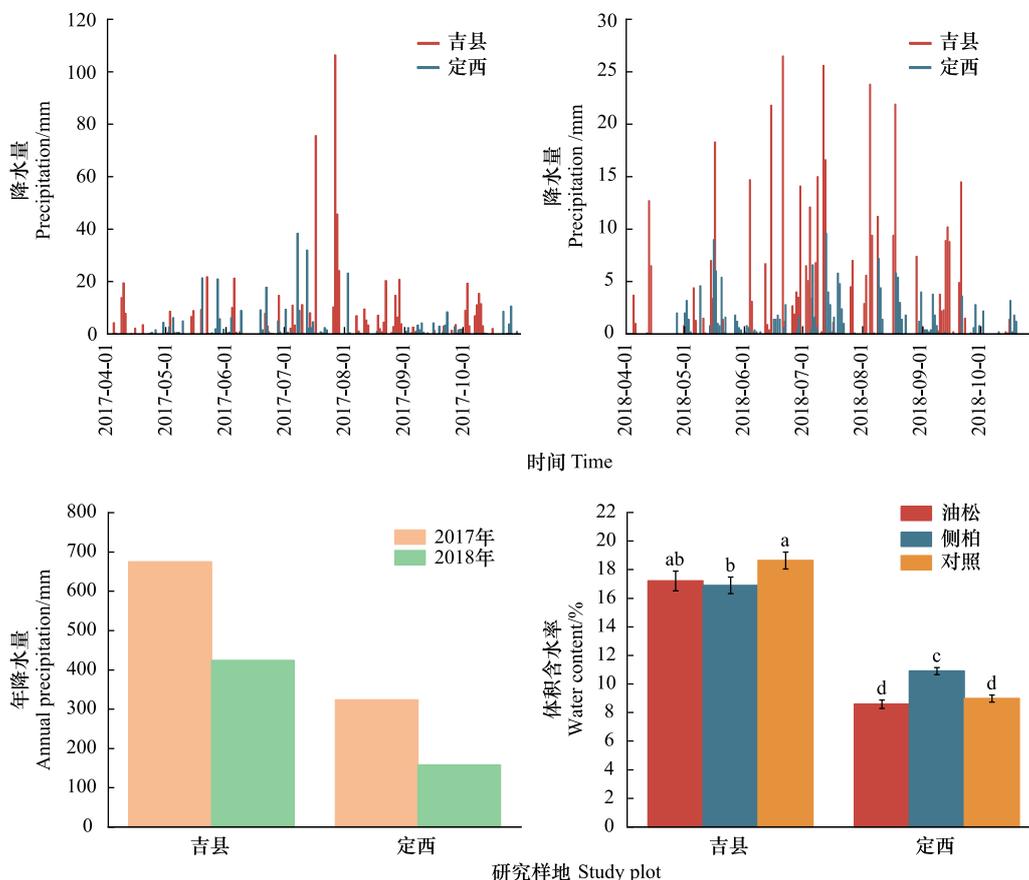


图 4 2017 年、2018 年吉县定西日降水量,年降水总量,土壤体积含水量

Fig.4 Daily Rainfall in Dingxi, Jixian County in 2017 and 2018, total annual rainfall, and soil volume moisture content

遍的砂质壤土。

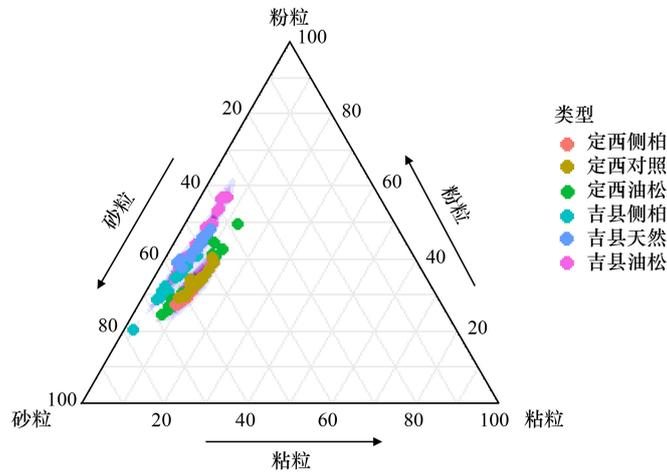


图 5 定西和吉县土壤机械组成

Fig.5 Composition of soil machinery in Dingxi and Jixian County

图 6 中看出,定西土壤容重高于吉县。吉县三块样地中,侧柏样地的土壤容重含量最高,油松和自然对照的容重无明显差异( $P>0.05$ ),而在定西自然对照的土壤容重含量最高,且三种植被类型下土壤容重有明显差异( $P<0.05$ );在土壤质地方面,吉县土壤中粘粒和砂粒含量小于定西土壤的含量,粉粒含量与之相反。在吉县,三块样地中,侧柏林中的土壤粘粒和粉粒含量最低,三块样地的粘粒含量无明显差异( $P>0.05$ ),而粉粒含量有明显差异( $P>0.05$ ),其中油松林的粉粒含量最高,其所占比例 50.34%,吉县油松砂粒含量最低,次之是天然林,分别占 43.55%,51.36%。在定西土壤中,粘粒含量的顺序是油松、侧柏、对照,且有明显差异( $P<0.05$ ),侧柏林中土壤粉粒含量最少,砂粒含量最高,其所占 59.55%,油松和天然林的粉粒占比无明显差异( $P>0.05$ )。

## 2.5 黄土高原两个小流域不同植被恢复模式下植物属性的差异

从图 7 中可以看出,植被的树高和胸径以及冠幅都存在显著差异( $P<0.05$ ),吉县的树高、胸径和冠幅明显高于定西。对于树高,吉县的侧柏最高,其平均树高为 8.91m,定西的侧柏最低,其平均值为 1.59m;胸径是吉县油松最大,平均值为 13.88cm,定西侧柏最小,其平均值为 3.76cm;冠幅是吉县的油松最大,定西侧柏最小,平均值分别是 20.38m<sup>2</sup>,0.84m<sup>2</sup>;在吉县,天然对照的树高、胸径、冠幅略低于其他两块样地,在定西,则是侧柏的植被属性较低。

## 2.6 黄土高原两个小流域不同植被恢复模式下土壤养分及土壤含水量的相互影响机制

本文图 8 采用主成分分析(PCA)和方差分解(VP)的方法分析了不同生态因子(土壤容重、粘粒、粉粒、砂粒、土壤含水量、降水量、树高、胸径、冠幅)与土壤养分含量变化趋势的相关性。并将其生态因子分成三组即(土壤物理性质、植被属性、降水量和土壤含水量),它们对土壤养分的解释程度,以及土壤性质、植被属性、降水量对土壤含水量的解释程度。由图 8 可知,在吉县,生态因子中砂粒、土壤含水量以及容重与土壤 pH 值和碳氮比变化趋势呈现正相关;土壤粘粒与氮磷比、速效氮、全氮、有机碳的变化趋势呈现正相关;冠幅、胸径、树高、粉粒这些生态因子与土壤中全磷、全钾和速效磷的变化趋势呈现正相关。在定西,图中的生态因子中土壤含水量、砂粒、胸径、树高、冠幅都与土壤有机碳含量和全氮含量的变化趋势呈现正相关。植被的冠幅、树高、胸径、土壤容重、粉粒与土壤的全磷含量变化趋势呈正相关。土壤的全钾含量变化与土壤含水量、砂粒、粘粒以及容重与其呈正相关。

在吉县土壤物理性质、植被属性对其土壤养分的解释程度分别占 79.92%,19.3%。降水量对土壤含水量的解释力度显著大于其它因子,其解释程度为 87.06%。在定西,对土壤养分解释程度最高的是植被属性,占 55.3%,土壤物理性质对土壤养分的解释程度占 30.02%。土壤物理性质、植被属性、降水量和土壤含水量三者

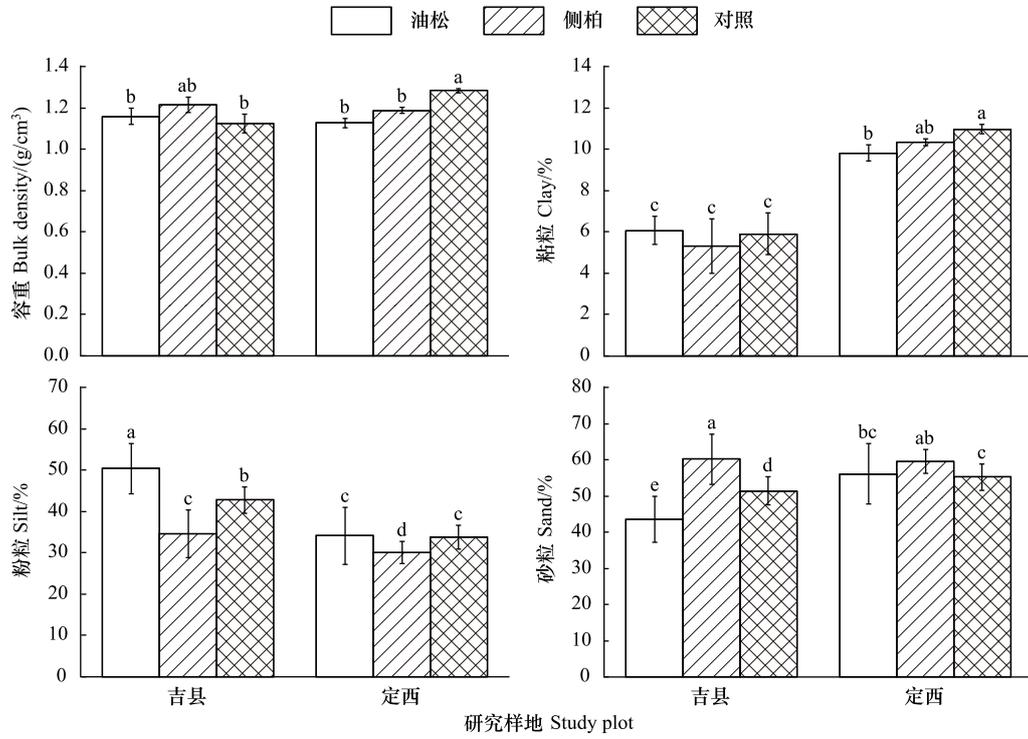


图 6 定西和吉县土壤机械组成及其容重

Fig.6 Soil Mechanical Composition and Unit Weight in Dingxi and Jixian County

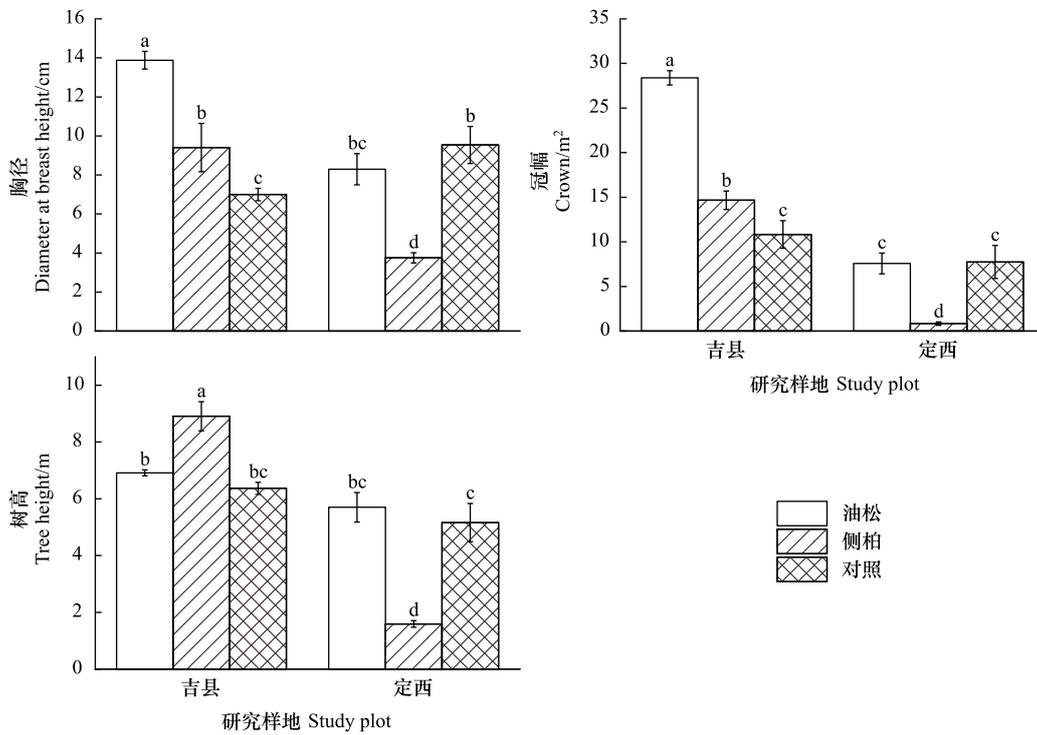
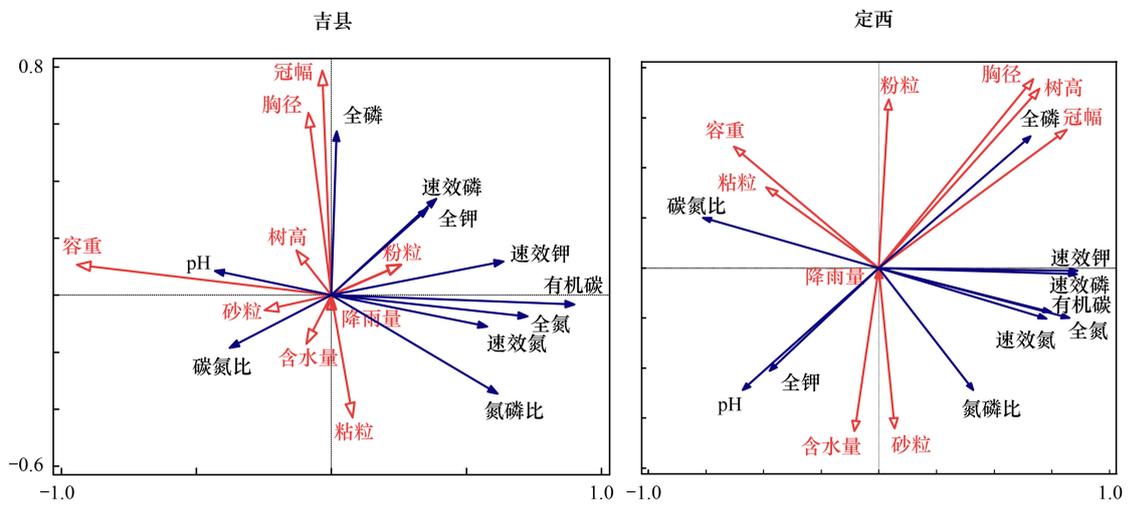
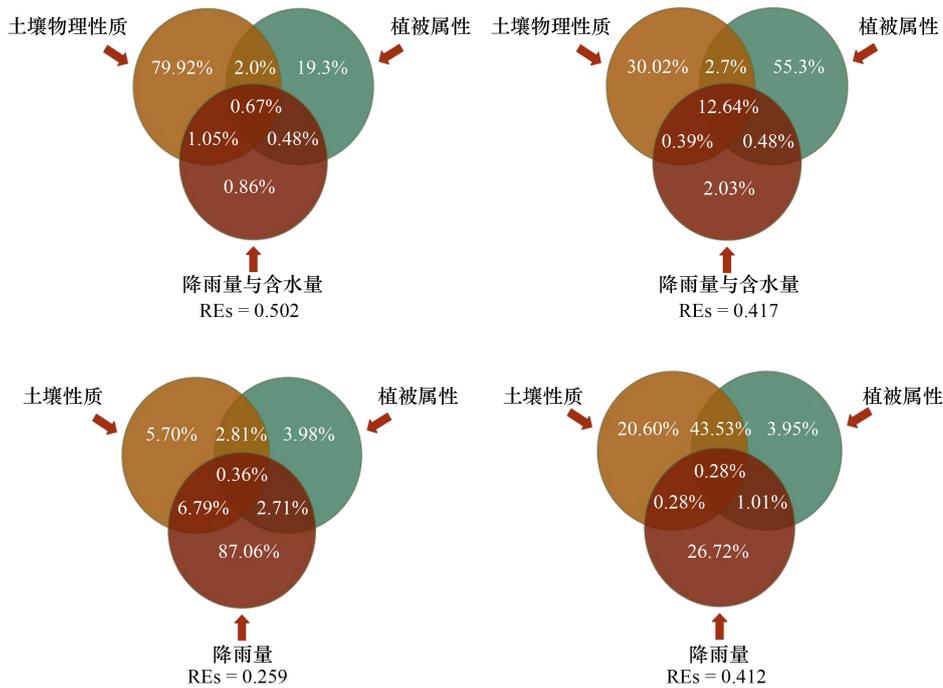


图 7 定西和吉县植物的胸径、冠幅、树高

Fig.7 DBH, Crown Diameter, and Tree height of Plants in Dingxi and Jixian



土壤性质与生态因子之间贡献度分析



土壤性质与生态因子之间相互关系

土壤含水量与生态因子之间的关系

图 8 不同小流域土壤性质与生态因子之间相互关系与贡献度分析

Fig.8 Analysis of the relationship and contribution between soil properties and ecological factors in different regions

对土壤养分共同解释为 12.64%。降水量和土壤性质对土壤含水量的解释程度分别为 26.72%、20.60%，土壤性质与植被属性二者共同对其解释度为 43.53%。

### 3 讨论

#### 3.1 黄土高原两个小流域不同植被恢复模式下土壤养分的差异

本文研究了黄土高原两个小流域不同植被恢复方式下土壤 pH、有机碳、氮磷钾元素及其速效氮、速效磷、速效钾的变化,为理解不同环境条件下植被与自然环境相互作用及土壤养分循环过程提供了有效数据支持。随着植被恢复的长期影响,林地土壤理化性质也发生了较大的变化<sup>[34]</sup>。环境差异导致的林地近地表条件,包括地表枯落物、植被根系、以及动物和微生物的生命活动等对土壤物理性质及土壤养分都有一定的影响<sup>[35-36]</sup>,并且不同的植被类型和恢复方式由于其生长方式不同,对土壤性质的影响也不同。

本研究中,黄土高原两个小流域,不同植被恢复模式下林地的土壤理化性状及土壤养分含量存在差异。其中,吉县蔡家川流域土壤有机碳、全氮平均含量为天然林对照组最高,在定西龙滩流域则是天然对照的最低,定西龙滩流域天然对照的土壤有机碳和全氮平均含量相对吉县蔡家川流域较低,而人工林地则与之相反。其原因是土壤有机碳的差异主要取决于土壤中有机的矿化分解、腐质化等土壤中碳的输入和输出平衡,年降水量和平均气温也可以调节土壤 C、N、P 循环<sup>[37]</sup>,黄土高原不同地区,有机碳受气温和降水的共同作用,对降水表现出更强的相关性,降水量不同,土壤有机碳含量有所不同<sup>[38]</sup>。由于吉县地区的降水多,以自然恢复为主的天然林地中,林下植被以及枯落物多,在降水和气温的共同作用下,动植物躯体的腐朽分解速度加快,有机质的积累速度也随之加快,有机质积累增加<sup>[39]</sup>,然而针叶作为主要凋落物分解缓慢,返还到土壤中的有机质有限,因此油松和侧柏林内土壤有机质含量相对较低<sup>[40]</sup>。而定西属于半干旱地区,降水稀少,水分蒸发大,土壤水分含量少,天然林地下生物与凋落物少,不能提供植被生长所需的水分与养分,而在人工油松林和侧柏林中,在人为抚育下,比如建造水平阶、反坡台等整地措施,增加了土壤含水量,提高了树木成活率。

本研究分析了林地土壤生态系统的变化以及天然林和人工林对土壤养分含量的影响。在黄土高原半湿润地区,降水充足,可满足植被的生长需求,在自然恢复下,该地区生物多样性相较于人工恢复更加丰富。这种丰富的植被有助于土壤有机质的积累和养分循环,导致土壤中有机碳和全氮含量较高。而在黄土高原半干旱地区,降水较少,人为干预的植被恢复更有效地提高了土壤养分水平。人工林系统可通过凋落物、根系分泌物、根际菌根互作以及林地环境等主要生态过程,调控其土壤生物在人工林土壤地力维持的作用。适宜的林分结构和抚育管理方式有利于调动土壤生物参与生态系统主要生态过程的能力,加强土壤地力维持的可持续性,进而提升人工林初级生产力。

吉县油松土壤的全磷平均含量最高,其次是吉县侧柏,然后是定西油松,定西对照,定西侧柏,最后是吉县对照。在两个研究区内,油松样地的全磷平均含量最高,这是因为油松根浅且生长较缓慢,除此,油松林下基本没有林草、灌木等植被生长,从而减少林地内土壤养分消耗<sup>[41]</sup>。定西 3 种样地的全钾平均含量远大于吉县样地,其原因是定西相对于吉县雨水较少,低温天气较长,土壤的风化作用相对较弱,致使土壤钾的流失减弱。平坦地势面积大,坡度小,土壤中的钾随水而流失减弱,也提高了土壤钾的含量<sup>[42]</sup>。土壤 C:N、N:P 是指示土壤有机质矿化速率及元素有效性的关键指标。土壤 C:N 可以衡量土壤中碳氮营养平衡状况,并影响其循环过程,是反应土壤质量好坏的敏感性指标<sup>[43]</sup>。6 种林分中,吉县对照的碳氮比值较高,其次是定西侧柏,吉县侧柏最低,定西侧柏人工林、油松人工林及天然对照的差异以及吉县油松、侧柏之间的差异均不显著( $P > 0.05$ ),其原因是 C、N 在消耗和积累的过程中形成了相对平衡的关系;另一方面,凋落物在分解释放养分时,需将有机物的碳骨架破坏,此过程同步释放 C、N<sup>[44]</sup>。吉县的自然对照样地 C:N 值最高,其原因主要是由于 C、N 作为土壤的结构成分,同时受凋落物养分归还和分解的影响,在吉县的自然对照样地中,林下植被及掉落物十分丰富,最终导致其土壤比值高<sup>[45]</sup>。有研究表明,土壤酸碱度变化能够直接影响植物对土壤养分的吸收效率,同时在土壤有机碳和无机碳相互转化过程中起重要作用<sup>[46]</sup>。本研究对黄土高原的两个小流域的三种植被的 pH 值进行比较发现,pH 值在不同植被类型下略有差异,但其都在 8.0—8.9 之间,其中定西三块样地的 pH 值都略高与吉县样地,其原因也与土壤水文过程有关,定西地区林下植被和枯落物少,导致地表水分蒸发量加大,溶于地下水的可溶性盐类随着毛管水上升、迁移而累积于土壤表面,使土壤碱化<sup>[47]</sup>。

总体上看,吉县蔡家川流域植被自然恢复的土壤养分比人工恢复的土壤养分高。而定西则是人工恢复的土壤养分比自然恢复方式的土壤养分高<sup>[48]</sup>。表明了定西自然恢复的森林效果较差,而吉县自然恢复的效果较好,其原因是吉县地区是半湿润气候,降水量较大,林下植物种类丰富,从而促使凋落物成分复杂且易于分解腐烂,最终使土壤养分积累受到了一定地影响,而定西属于半干旱地区,气候条件较差,降水少,且流失多,利用率低,低温,林下植被和枯落物少,返回土壤中有机物质少,使得植被自然恢复相对困难,需要人为辅助进行生态修复。

### 3.2 黄土高原两个小流域不同植被恢复模式下植被、降水和土壤的关系

本研究关注土壤养分和土壤含水量,它们是森林生态系统发育的基础,有其他研究表明,土壤养分状况和

土壤对养分吸附能力的强弱都与土壤机械组成等土壤性质有密切关系<sup>[49]</sup>。本研究进一步发现不同气候和地貌区,影响土壤养分和含水量的主导因素有所不同(图 8)。在吉县,土壤物理性质对土壤养分的解释程度为 79.92%,其中粘粒与土壤养分的相关性最为显著,植被属性对土壤养分解释程度为 19.3%;在定西,土壤物理性质对土壤养分的解释程度为 30.02%,其中砂粒与土壤养分的相关性最为显著,植被属性对土壤养分解释程度为 55.3%,所以本研究表明吉县和定西的环境因子对土壤养分的影响具有异质性,区域差异的原因已经有相关研究表明,吉县地区由于降水等气候因素相对于干旱区具有明显特征,在水文过程的推动和循环下,长期的植被恢复将会改变土壤物理性质,最终表现为对土壤养分含量的区域差异性影响<sup>[50]</sup>。而定西降水较少,土壤贫瘠,植被属性较差,气候干燥,因此,植被在定西地区生态改善是重中之重,能够直接影响土壤养分,从而进一步影响该地区的生态环境。本研究表明,在环境恶劣的地区,植被直接影响土壤养分,但由于其地理环境和气候条件,植被自然恢复较为困难,因此需要人工种树从而改善生态环境。在环境条件相对较好的地区,森林的自然恢复相比人工恢复能够更有效改善生态环境,由于人为活动会破坏其土壤结构,导致生态效益不能最大程度地提高。

土壤含水量的变化对生态体系中的植物构造及效用有关键作用,植被恢复对降水量、土壤含水量与土壤质地的响应也呈现出明显的地区差异性。土壤的物理性质及其植被属性对土壤养分含量的变化趋势影响较大,降水量所影响的土壤含水量变化对植物生长发育具有缓冲作用。在吉县,降水量对土壤含水量变化趋势解释度高达 87.06%,定西则是土壤理化性质与植被属性二者共同对土壤含水量变化趋势解释度最高为 43.53%,次之是降水量,对其解释程度为 26.72%。在吉县,降水多,土壤含水量高,使植被有充足的水分,从而使植被能够自然生长,因此,相较于人为恢复,自然恢复植被生长状态更好。在定西,由于降水少,所以在人为活动下,采用不同整地方式、工程措施和生物措施等增加土壤含水量使植被的生长效果才能达到最好<sup>[51]</sup>。

### 3.3 黄土高原两个小流域不同植被恢复模式下脆弱生态系统植被恢复的实践

黄土高原上不同小流域降水量与土壤含水量等环境特点对植被生长状态和植被恢复的生态效益有所影响<sup>[52]</sup>。例如,在吉县以自然恢复为主的植被(天然林),其土壤养分、土壤含水量等与人工恢复林(油松、侧柏)相比较都更加丰富,而在定西则是与之相反。本研究在不同黄土高原地区开展植被恢复方式的实践中,多雨条件的吉县地区的植被适合自然恢复,而相对于干旱的定西地区的植被则适合人工恢复,以达到更好的生态系统结构和功能。本文研究表明,植被人工恢复和自然恢复生长都能够提高土壤养分含量、改良土壤理化性质,对土壤养分的改善有较好的促进作用。总的来看,在吉县,由于降水丰富,植被恢复应相对减少人为干扰,并加之适当的植被保护,而在定西,降水少,土壤水分含量少,所以需要加强人为活动,不断促进森林群落的正向演替,从而提高黄土高原半干旱地区森林生态系统的稳定性和抗干扰性,有利于区域土壤养分的积累。

在黄土高原的不同小流域,环境特点对植被恢复的生态恢复效益产生了显著的影响<sup>[53]</sup>。所以,在水土保持和生态质量提升的实践工作中,应该注重植被恢复类型的选择,同时综合考虑地区如气候、降水量、水资源等环境特点,以确定最适合的植被恢复方式。此外,如果环境条件适宜,自然恢复是一种更为自然、经济、可持续发展的恢复方式。因此,在条件允许的情况下,应优先考虑采用自然恢复方式。在干旱条件下,尽管自然恢复下森林生态系统表现出强劲的生态恢复,但它们也表现出较差的复原力<sup>[54]</sup>,使得生态修复会受到限制。因此,选择适合的人工恢复方式,如采用灌溉、人工造林等方式来促进植被恢复,人工恢复会导致生态系统结构和功能的不同程度的改变,因此需要对恢复方式进行综合评估,以选择最适合的方式。

## 4 结论

在黄土高原上不同小流域,不同的植被恢复方式下,土壤的理化性质具有一定的差异,在六组样地中,吉县对照组林地中有机碳、全氮、速效氮含量最高,全磷、速效磷含量最高的是吉县油松林,全钾含量最高的是定西侧柏林、速效钾含量最高的是定西油松林。除此,吉县地区的降水量和土壤含水量都远远高于定西地区的,其中吉县天然对照组的土壤含水量最高,定西油松林土壤含水量最低。

在黄土高原不同小流域中影响土壤养分和水分含量的主要因素有所不同。在吉县蔡家川流域和定西龙滩流域影响土壤养分的主要因素分别为土壤物理性质和植被属性,解释度分别为 79.92%、55.3%;而影响土壤含水量的主要因素分别是降水量和土壤-植被共同作用,其解释度分别为 87.06%、43.53%。

在山西省吉县,由于降水充沛,植被丰富,土壤养分充足,植被能够很好生长,以自然恢复为主的林分土壤养分及含水量等优于人工恢复的林分。而在甘肃省定西,干旱少雨,林下植被稀少,以自然恢复为主的水养状况相对于人工恢复较差。因此,多雨条件的吉县地区的植被适合自然恢复,而相对于干旱的定西地区的植被则适合人工恢复。为了植被能够更好地生长,在选择植被恢复类型时遵从适地适树,因地制宜的原则。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 金钊. 黄土高原小流域退耕还林还草的生态水文效应与可持续性. 地球环境学报, 2022, 13(2): 121-131.
- [ 2 ] 杨正礼. 我国退耕还林研究进展与基本途径探讨. 林业科学研究, 2004, 17(4): 512-518.
- [ 3 ] 王超, 甄霖, 杜秉贞, 孙传淳. 黄土高原典型区退耕还林还草工程实施效果实证分析. 中国生态农业学报, 2014, 22(7): 850-858.
- [ 4 ] Dang H, Li J H, Xu J S, Chu G C, Zhang J, Yu Y L, Jin Z. Differences in soil water and nutrients under catchment afforestation and natural restoration shape herbaceous communities on the Chinese Loess Plateau. Forest Ecology and Management, 2022, 505: 119925.
- [ 5 ] 薛亚永, 王晓峰. 黄土高原森林草原区退耕还林还草土壤保持效应评估. 干旱地区农业研究, 2017, 35(5): 122-128.
- [ 6 ] Feng T J, Wei T X, Keesstra S D, Zhang J J, Bi H X, Wang R S, Wang P. Long-term effects of vegetation restoration on hydrological regulation functions and the implications to afforestation on the Loess Plateau. Agricultural and Forest Meteorology, 2023, 330: 109313.
- [ 7 ] 马心雨, 田雪, 过怡婷, 林勇明. 中国西南地区植被恢复对土壤化学计量特征的影响——基于 Meta 分析. 应用与环境生物学报, 2023, 29(5): 1058-1067.
- [ 8 ] 刘玉林, 朱广宇, 邓蕾, 陈磊, 上官周平. 黄土高原植被自然恢复和人工造林对土壤碳氮储量的影响. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2163-2172.
- [ 9 ] 王雅, 刘爽, 郭晋丽, 刘兵兵. 黄土高原不同植被类型对土壤养分、酶活性及微生物的影响. 水土保持通报, 2018, 38(1): 62-68.
- [ 10 ] 杨君珑, 李小伟, 曹兵, 张维江. 六盘山生态移民迁出区不同植被恢复模式对土壤养分和土壤酶活性的影响. 西南林业大学学报: 自然科学, 2018, 38(5): 13-19.
- [ 11 ] 安芳娇, 牛子儒, 刘婷娜, 苏永中. 西北荒漠绿洲过渡带土壤细菌结构和氮代谢对梭梭恢复的响应. 生态学报, 2023, 43(20): 8454-8464.
- [ 12 ] 陈鸿. 不同土壤类型绿竹林笋营养特征研究. 安徽农学通报, 2007, 13(18): 194-195, 184.
- [ 13 ] 陈军, 张红霞, 钟文, 李玉忠, 王春季. 黄土丘陵区人工造林对不同土壤类型理化特性的影响. 水土保持研究, 2011, 18(1): 42-47.
- [ 14 ] Wu X, Niu Y B, Xun M Y, Jin J Y, Tang Y K, Chen Y M. Soil carbon, nitrogen, and phosphorus storages and their stoichiometry due to mixed afforestation with *Hippophae rhamnoides* in the Loess Hilly Region, China. Forests, 2021, 12(12): 1718.
- [ 15 ] 刘小娥, 苏世平, 李毅, 王维. 黄土高原地区人工林营造—混交林模式生态效益研究. 干旱区研究, 2021, 38(2): 380-391.
- [ 16 ] 胡亚伟, 孙若修, 申明爽, 施政乐, 刘畅, 徐勤涛, 刘俊廷, 张建军. 晋西黄土区土地利用方式对土壤 C:N:P 化学计量特征及土壤理化性质的影响. 干旱区研究, 2021, 38(4): 990-999.
- [ 17 ] 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.
- [ 18 ] 张维伟, 尹代皓, 雷雨婷, 韩晓婷, 彭潔莹, 赵忠. 黄土高原南部麻栎不同群落类型中重要乔木种群结构及演替模拟. 生态学报, 2024, 44(6): 2572-2581.
- [ 19 ] 李鹏, 刘晓君, 刘苑秋, 张志坚, 莫兴悦, 肖廷琦. 退化红壤区不同植被恢复模式的土壤养分空间分布特征. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(8): 113-124.
- [ 20 ] 彭舜磊, 陈昌东, 李磊, 廖秉华, 赵干卿. 宝天曼自然保护区栓皮栎林人工恢复与天然恢复效果比较. 水土保持研究, 2016, 23(6): 265-270.
- [ 21 ] 王小红, 杨智杰, 刘小飞, 杨玉盛, 吴君君, 付林池, 陈坦, 李伟. 天然林转换成人工林对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响. 水土保持学报, 2014, 28(6): 177-182, 189.
- [ 22 ] Luan J W, Xiang C H, Liu S R, Luo Z S, Gong Y B, Zhu X L. Assessments of the impacts of Chinese fir plantation and natural regenerated forest on soil organic matter quality at Longmen Mountain, Sichuan, China. Geoderma, 2010, 156(3/4): 228-236.
- [ 23 ] Jin Z, Li X R, Wang Y Q, Wang Y, Wang K B, Cui B L. Comparing watershed black locust afforestation and natural revegetation impacts on soil nitrogen on the Loess Plateau of China. Scientific Reports, 2016, 6: 25048.
- [ 24 ] 刘宥延, 刘兴元, 张博, 李妙莹. 黄土高原丘陵区人工灌草生态系统水土保持功能评估. 水土保持学报, 2020, 34(3): 84-90, 97.
- [ 25 ] 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.
- [ 26 ] 冯天骄, 卫伟, 陈利顶, 陈蝶, 于洋, 杨磊. 黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性. 环境科学, 2017, 38(9): 3860-3870.

- [27] 刘黎, 赵永华, 韩磊, 韩玲, 王茜, 汤剑秋. 基于土地资源分区的黄土高原水土热资源时空变化和生态功能区划. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2021, 49(6): 86-97.
- [28] 李德丽, 蔡国军, 莫保儒, 林琳, 丁爱强. 半干旱黄土丘陵区不同立地柠条光合特性研究. 西北林学院学报, 2023, 38(6): 38-45.
- [29] 王子婷. 龙滩小流域生态经济系统健康评价[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2011.
- [30] 满洲. 半干旱黄土丘陵区不同恢复人工林土壤碳组分分异性研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
- [31] 李志东. 黄土高原丘陵沟壑区油松林的健康管理. 林业实用技术, 2012(10): 21-22.
- [32] 江大勇, 付晓燕, 周超, 李微微. 河北省地区油松和侧柏植物群落研究. 林业科技情报, 2022, 54(2): 34-38.
- [33] 王国宏, 方精云, 郭柯, 谢宗强, 唐志尧, 沈泽昊, 王仁卿, 王襄平, 王德利, 强胜, 于丹, 彭少麟, 达良俊, 刘庆, 梁存柱. 《中国植被志》研编内容与规范. 植物生态学报, 2020, 44(2): 128-178.
- [34] Li Y Y, Shao M A. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China. *Journal of Arid Environments*, 2006, 64(1): 77-96.
- [35] 蒋婧, 宋明华. 植物与土壤微生物在调控生态系统养分循环中的作用. 植物生态学报, 2010, 34(8): 979-988.
- [36] Wang J, Zhao W W, Wang G, Yang S Q, Pereira P. Effects of long-term afforestation and natural grassland recovery on soil properties and quality in Loess Plateau (China). *The Science of the Total Environment*, 2021, 770: 144833.
- [37] 杨阳, 刘良旭, 张萍萍, 吴凡, 周媛媛, 宋怡, 王云强, 安韶山. 黄土高原土壤水分-有机碳-微生物耦合作用研究进展. 生态学报, 2023, 43(4): 1714-1725.
- [38] 张凡, 李长生. 气候变化影响的黄土高原农业土壤有机碳与碳排放. 第四纪研究, 2010, 30(3): 566-572.
- [39] 朱玉荷, 肖虹, 王冰, 吴颖, 白永飞, 陈迪马. 蒙古高原草地不同深度土壤碳氮磷化学计量特征对气候因子的响应. 植物生态学报, 2022, 46(3): 340-349.
- [40] 王凯, 齐悦彤, 刘建华, 焦向丽, 刘焕彬. 油松与榆树人工林植物-凋落叶-土壤碳、氮、磷化学计量特征. 生态学杂志, 2022, 41(3): 427-434.
- [41] 董秀群, 王百田, 武中鹏, 王旭虎. 晋西黄土区三种林地土壤养分随林分生长的变化. 林业科学研究, 2018, 31(2): 69-76.
- [42] 刘希瑶, 刘澎, 刘驰. 典型黑土中有机质和养分元素的变化分析. 地质与资源, 2022, 31(4): 500-507.
- [43] 赵敏, 马宝有, 赵江平, 陈峰峰, 孙亚荣, 王亚娟, 陈云明. 黄土丘陵沟壑区不同林龄刺槐叶片氮、磷重吸收特征. 应用与环境生物学报, 2023, 29(2): 401-407.
- [44] 许窈孜, 叶彩红, 张耕, 张中瑞, 朱航勇, 何茜, 丁晓纲. 北江中下游不同林分类型土壤 C、N、P 生态化学计量特征. 应用生态学报, 2023, 34(4): 962-968.
- [45] 吴鹏, 崔迎春, 赵文君, 舒德远, 侯贻菊, 丁访军, 杨文斌. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤化学计量特征. 北京林业大学学报, 2019, 41(3): 80-92.
- [46] 李娜, 赵娜, 王娅琳, 魏琳, 张骞, 郭同庆, 王循刚, 徐世晓. 高寒人工草地不同植被类型下表层土壤有机碳和无机碳变化及土壤理化因子. 草地学报, 2023, 31(8): 2361-2368.
- [47] 张茹, 李建平, 张翼, 井乐, 王婷. 封育对黄土高原草地深层土壤 pH 的影响. 生态科学, 2020, 39(1): 72-77.
- [48] 杨智姣, 温晨, 杨磊, 李宗善, 卫伟, 张钦弟. 半干旱黄土小流域不同恢复方式对生态系统多功能性的影响. 生态学报, 2020, 40(23): 8606-8617.
- [49] 王长庭, 王根绪, 刘伟, 马力, 胡雷. 高寒草甸不同类型草地土壤机械组成及肥力比较. 干旱区资源与环境, 2013, 27(9): 160-165.
- [50] 刘茜茹, 冯天骄, 王平, 张羽飞, 熊瑛楠, 高琦, 白杨. 晋西黄土区长期植被恢复对土壤表层入渗与水分储量差异的影响. 水土保持通报, 2023, 43(2): 50-59.
- [51] 于洋, 卫伟, 陈利顶, 冯天骄, 杨磊, 陈蝶. 黄土丘陵区小流域典型造林整地工程土壤水分特征曲线模拟. 生态学报, 2018, 38(18): 6511-6520.
- [52] 李婷, 吕一河, 任艳姣, 李朋飞. 黄土高原植被恢复成效及影响因素. 生态学报, 2020, 40(23): 8593-8605.
- [53] 郑姗姗, 蔡丽平, 邹秉章, 吴鹏飞. 森林植被恢复与环境生态因子互作关系研究进展. 生态科学, 2020, 39(5): 227-232.
- [54] Guo S J, Hua Y H, Zhang W, Han X H, Yang G H, Xu Y D, Huang J Y. Differences in the soil and hydrology responses of two revegetation chronosequences in the Loess Plateau, China. *Catena*, 2024, 237: 107785.