

DOI: 10.20103/j.stxb.202401090086

龚世豪, 查同刚, 张晓霞, 张恒硕, 高连炜, 于洋. 晋西黄土区典型林分凋落物-土壤养分对降雨再分配变化的响应. 生态学报, 2024, 44(17): 7748-7759.

Gong S H, Zha T G, Zhang X X, Zhang H S, Gao L W, Yu Y. Responses of litter-soil nutrients to rainfall redistribution in typical stand on loess area of western Shanxi Province. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17): 7748-7759.

晋西黄土区典型林分凋落物-土壤养分对降雨再分配变化的响应

龚世豪¹, 查同刚^{1,2,3,*}, 张晓霞⁴, 张恒硕⁵, 高连炜¹, 于 洋^{1,2,3}

1 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083

2 北京林业大学 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083

3 北京林业大学 水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083

4 中国建筑一局集团第三建筑有限公司, 北京 100161

5 黄河水利委员会黄河水利科学研究院河南省黄河流域生态环境保护与修复重点实验室, 郑州 450003

摘要: 降雨是影响黄土高原地区植被生长的主要限制因子, 但植被群落结构间存在的差异使其对凋落物和土壤养分的影响存在较大的不确定性。以黄土区油松人工纯林、刺槐人工纯林、油松-刺槐人工混交林、山杨-辽东栎天然次生林为对象, 研究了林冠对降雨的再分配特征、凋落物储量、土壤有机碳(SOC)、总氮(STN)、总磷(STP)含量随林型的变化, 分析了不同降雨分配特征对凋落物、土壤养分的影响。结果表明: (1) 4种林分类型间降雨再分配特征具有一定差异性, 油松林、刺槐林、油松刺槐林、次生林累计穿透雨率分别为 86.43%、85.37%、71.68%、64.77%, 树干径流率为 1.0%、1.6%、1.3%、3.2%, 树冠截流率为 12.48%、13.01%、27.00%、31.93%。(2) 不同林分类型 SOC、STN、STP 以及凋落物养分释放效率表现出显著差异性, 天然次生林养分含量整体上高于人工林。(3) 4种林分类型中, 刺槐林的土壤 C:N 最低, 其它 3 种林分的土壤 C:N 无显著差异; 天然次生林的土壤 N:P 和 C:P 最高, 油松林和刺槐林的土壤 N:P 无显著差异。(4) 穿透雨和林冠截流的变化能够影响土壤 N、P 组分和凋落物 C、N、P 元素释放率, 但对土壤 C 组分影响较小。综上所述, 黄土高原地区植被恢复过程中, 降雨能够提高土壤养分含量, 促进凋落物养分归还。天然次生林对改变降雨分配特征和土壤养分特征的潜力更大, 自然恢复更有利于土壤养分积累。

关键词: 降雨再分配; 土壤养分; 养分释放; 林分类型

Responses of litter-soil nutrients to rainfall redistribution in typical stand on loess area of western Shanxi Province

GONG Shihao¹, ZHA Tonggang^{1,2,3,*}, ZHANG Xiaoxia⁴, ZHANG Hengshuo⁵, GAO Lianwei¹, YU Yang^{1,2,3}

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

2 Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

4 The Third Construction Co., Ltd. of China Construction First Group, Beijing 100161, China

5 Yellow River Institute of Hydraulic Research, Henan Key Laboratory of Yellow Basin Ecological Protection and Restoration, Zhengzhou 450003, China

Abstract: Rainfall is the main limiting factor affecting vegetation growth on the Loess Plateau, but its effects on litter and soil nutrients are uncertain due to different vegetation community structures. This paper selected four typical vegetation types on the Loess Plateau as the research objects, including artificial *Pinus tabulaeformis* forest, artificial *Robinia pseudoacacia*

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32271967); 国家重点研发计划项目(2022YFF1302501)

收稿日期: 2024-01-09; **网络出版日期:** 2024-06-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhtg73@bjfu.edu.cn

forest, *Pinus tabulaeformis* × *Robinia pseudoacacia* mixed forest, *Poplar Populus* × *Quercus liaotungensis* natural secondary forest. We studied the redistribution characteristics of forest canopy to rainfall, litter storage and soil organic carbon (SOC), total nitrogen (STN), total phosphorus (STP) concentrations changed with forest type, and analyzed the effects of different rainfall distribution characteristics on litter and soil nutrients. The results showed that: (1) There were some differences in the characteristics of rainfall redistribution among the four stand types. The cumulative throughfall rates of *Pinus tabulaeformis* forest, *Robinia pseudoacacia* forest, *Pinus tabulaeformis* × *Robinia pseudoacacia* mixed forest and natural secondary forest were 86.43%, 85.37%, 71.68%, and 64.77%, respectively; the stemflow rates were 1.0%, 1.6%, 1.3%, and 3.2%, respectively. In addition, the interception rates were 12.48%, 13.01%, 27.00%, and 31.93%, respectively. (2) The concentrations of SOC, STN, STP, and litter nutrient release rate of different stand types showed significant differences. Nutrient concentrations of natural secondary forest was higher than that of the artificial forest. (3) Among the four stand types, The ratio of soil C:N in *Robinia pseudoacacia* forest was the lowest, and the ratio of soil C:N in other three stands was not significantly different. The ratios of soil N:P and C:P in the natural secondary forest were the highest, and the ratio of soil N:P in *Pinus tabulaeformis* forest and *Robinia pseudoacacia* forest was not significantly different. (4) The changes of throughfall and interception could affect the N and P components of soil and the release rates of C, N and P elements of litter, but had little effect on the C components of soil. In conclusion, in the process of vegetation restoration on the Loess Plateau, rainfall can increase the soil nutrient concentrations and promote the nutrient return of litter. The natural secondary forest has greater potential to change the characteristics of rainfall distribution and soil nutrients, and natural restoration is more conducive to soil nutrient accumulation.

Key Words: rainfall redistribution; soil nutrients; nutrient release; stand type

降雨是改变土壤养分空间分布格局的重要因素。森林生态系统中,降雨受到林冠层和灌草层的再分配,形成穿透雨、树干径流和植物截流,前两者又在枯落物层和土壤层的作用下转化为地表径流、枯落物截流和土壤入渗^[1]。林内降雨再分配的差异性是影响土壤养分变化的重要因素,降雨进入土壤后,在土层间的转移不可避免的会影响凋落物养分归还和土壤养分空间分布。一方面,降雨经过植物和凋落物表面,发生了淋溶作用^[2],将植物与凋落物表面附着的营养物质转移,进入土壤,并在重力作用下,在各土层间进行积累、分配和循环,从而改变了不同土层养分含量。另一方面,降雨进入土壤后,改变了土壤生态环境,土壤微生物代谢能力加强,加速了凋落物分解,从而促进凋落物养分归还效率。然而降雨再分配过后,形成的各降雨组分对土壤养分的影响仍具有不确定性^[3],因此,揭示土壤养分含量变化对降雨再分配特征的响应机制,对于优化黄土高原地区植被恢复模式和人工林生态系统可持续发展策略具有重要意义。

土壤 C、N、P 含量变化是评价土壤肥力的重要指标^[4]。植物通过吸收土壤养分,获取并转化这些元素,用于自身生长发育,而枯落物又能为土壤补给养分,实现养分归还,从而形成生态系统养分循环的平衡。在森林生态系统中,生态化学计量常用于评估、预测植物生长和养分限制状况^[5]。目前,关于降水分配与土壤、凋落物 C、N、P 及其化学计量特征的研究已广泛开展^[3,6-9]。Cao 等^[3]发现在刺槐植被恢复过程中,表层土壤(0—40 cm) N 含量受枯落物截流量的影响,而深层土壤(100—200 cm) N 含量则与降雨进入土壤中的水分相关。苏卓侠等^[8]通过对黄土高原地区刺槐林的研究表明,降水量增加,改变了土壤养分动态平衡,土壤 N:P 升高,促使植被生长由氮限制向磷限制转变。蔚剑飞等^[9]研究发现在黄土高原地区,由于降水量不足,营养元素滞留于枯落物,凋落物养分归还能力下降。然而,目前的研究仅仅只停留在降雨量、降雨频率等变化对土壤养分的影响,降雨再分配后形成的不同组成部分对土壤养分空间分布的影响尚不清楚^[3],鉴于此,有必要研究黄土高原地区不同植被类型下的降雨再分配特征变化对土壤生态化学计量特征的影响,以加强对研究区内土壤养分循环特征的认识。

黄土高原是我国典型的生态脆弱区,降水是限制黄土高原植被生长的重要影响因子,降水因子的变化对

于黄土高原地区植被生长与土壤养分调控具有重要影响^[10]。因此,本文以黄土高原地区 4 种典型植被群落为研究对象,通过对比不同林分间降雨再分配特征与凋落物养分释放效率和土壤 C、N、P 含量及其化学计量特征变化,分析两者间的相关性,以期深入了解森林降水再分配变化如何影响脆弱生态环境化学计量特征以及养分释放特征提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原东南部地区的山西吉县蔡家川流域(36°14'27"—36°18'23"N,110°39'45"—110°47'45"E),流域面积为 38 km²,海拔 870—1550 m,地势东高西低,是典型的晋西黄土残塬沟壑区。该地区属于暖温带半湿润区,气候为大陆性季风气候,光照充沛,季节变化明显。年平均温度 10 ℃,年平均降水量 568.6 mm,主要集中在 6—9 月,约占全年降水量的 80%,年均潜在蒸发量 1730 mm,年无霜期 172 d。土壤类型为碱性褐土,黄土母质,土层较厚,抗蚀性弱。区域内主要的土地利用类型有农地、果园、林地、灌草地等,主要林地类型包括山杨(*Populus davidiana*)、辽东栎(*Quercus wutaishanica*)等组成的天然次生林;油松(*Pinus tabulaeformis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等组成的人工林。林下植被包括黄刺玫(*Rosa xanthina*)、酸枣(*Ziziphus jujuba*)、细裂叶莲蒿(*Artemisia gmelinii*)等灌木和草本植物。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择

在研究区内选择具有代表性,且地形条件相近的油松人工纯林、刺槐人工纯林、油松刺槐人工混交林、山杨辽东栎天然次生林地 4 种典型林分作为研究对象,每种林分选择 3 个 20 m×20 m 的样地进行调查,调查样地共计 12 个。记录每个样地空间位置和地貌类型等信息,测量各样地内树木胸径、树高、林分密度、郁闭度、枯落物厚度、凋落物蓄积量等指标。在样地中心和四角设置 5 个 3 m×3 m 的灌木样方,调查灌木的种类、株数、盖度等指标;在灌木样方内设置 3 个 1 m×1 m 的草本样方,调查草本种类、数量等指标。不同林地基本特征见表 1。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of the research sites

植被类型 Vegetation type	海拔 Altitude/m	坡度 Slope degree/(°)	郁闭度 Canopy density/%	密度 Density/ (株/hm ²)	凋落物蓄积量 Volume of litter storage/ (t/hm ²)	枯落物厚度 Thickness of litter/cm	树高 Tree height/m	胸径 Diameter at breast height/cm
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	1065	21	63	1655	4.51	1.8	6.3	18.5
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	1156	22	72	1795	7.85	2.4	8.1	18.1
油松-刺槐 <i>Pinus tabulaeformis</i> - <i>Robinia pseudoacacia</i>	1166	31	68	1985	9.32	3.1	6.5	10.5
山杨-辽东栎 <i>Populus davidiana</i> - <i>Quercus wutaishanica</i>	1059	27	78	1845	10.41	3.5	7.6	14.1

数据为平均值

1.2.2 土壤、凋落物样品采集与测定

于 2023 年 8 月 26 日在不同林地内根据样地的上、中、下 3 个坡位各设置 1 个土壤剖面调查点,沿着土壤剖面 0—10、10—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm 采用环刀法分层取样;于 2023 年 7 月 2 日在林地内随机选取 3 块 0.5 m×0.5 m 的小样方,收集样方内的全部凋落物,并于 2023 年 8 月 26 日,重复上述步骤,再收集一次凋落物。将收集的样品带回实验室,风干、研磨、过筛、保存,用于有机碳、总氮、总磷等养分含量测定。

1.2.3 凋落物养分释放率测定

将每个小样方中收集回的枯落物用去离子水清洗,置于 65 °C 烘箱中烘干至恒重并称重、记录其质量。对不同凋落物在生长季养分释放情况进行分析,根据前后两次养分释放量与前一次初始养分总量比值的百分率计算养分释放率^[11],计算公式如式(1):

$$C = \frac{W_0 \times B_0 - W_1 \times B_1}{W_0 \times B_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, C 为养分释放率(%), W_1 为第 2 次采样时枯落物质量(g), W_0 为第 1 次采样时枯落物质量(g), B_1 为第 2 次采样时凋落物养分含量(g/kg), B_0 为第 1 次采样时凋落物养分含量(g/kg)。

1.2.4 林内降雨收集与测定

在林外空旷地安装 1 个内径为 25 cm 雨量收集器,用于收集林外降雨量;在每个林分所选择的 3 个 20 m×20 m 的样地中各随机安装 3 个内径为 25 cm 雨量收集器,用于收集穿透雨,穿透雨量计算如式(2):

$$TF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{S_i} \quad (2)$$

式中, TF 为穿透雨量(mm), n 为穿透雨采集桶的数量, V_i 为第 i 个采集桶收集到的降雨体积(mL), S_i 为漏斗面积(cm^2)。

根据样地调查获得的各树种的径级分布,每个样地内选择 3 棵树干通直、具有代表性的树种,用于监测树干径流量。对每株样树采用包裹式集水法^[12],在树干高 1.2 m 处将聚乙烯软管螺旋缠绕在树干上,轧带固定软管,利用玻璃胶密封,防止雨水泄露,下方使用 25 L 的集水桶收集。树干径流量计算如式(3):

$$SF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{A_i} \quad (3)$$

式中, SF 为树干径流量(mm), n 为选择的树木株数, V_i 为第 i 个集水桶收集到的降雨体积(mL), A_i 为第 i 棵树木的树冠投影面积(cm^2)。

在每个样地内建立 4 块投影面积为 1.5 m×1.5 m 的径流小区,各小区布设均以具有典型代表性和地形条件基本一致为原则^[13]。每次降雨后,将集水桶中水样搅浑并收集桶内的径流泥沙混合样,小区内径流量计算如式(4):

$$RO = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{S_i} \quad (4)$$

式中, RO 为地表径流量(mm), n 为径流小区数量, V_i 为第 i 个径流小区产生的径流体积(mL), S_i 为径流小区面积(cm^2)。

每场降雨过后,前往样地选择并收集 0.5 m×0.5 m 小样方内全部枯落物,带回实验室进行烘干处理,枯落物截流量计算如式(5):

$$L = \frac{W_1 - W_0}{A} \quad (5)$$

式中, L 为枯落物截流量(mm), W_1 为枯落物干重(g), W_0 为枯落物鲜重(g), A 为样方面积(cm^2)。

植物截流量和土壤入渗量利用水量平衡公式计算,植物截流量为林外降雨量和穿透雨与树干径流的差值计算获得;土壤入渗量为穿透雨量和凋落物截流量与地表径流量差值计算获得。

每场降雨之后,收集大气降雨和各林分内穿透雨、树干径流、地表径流,装入 100 mL PVC 瓶中带回实验室,低温保存。样品收集完成后将雨量收集桶和径流小区下方的集水桶清扫干净,以避免对下次取样造成污染。

1.2.5 室内分析

土壤、凋落物有机碳采用重铬酸钾稀释热法测定^[14],全氮、全磷采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消解进行前处理后,使用

Smartchem 450 全自动化学分析仪测定^[15]。水样中总氮含量采用碱性过硫酸钾消解/紫外分光光度法测定^[16]。

1.2.6 数据处理与统计分析

对所取得的数据采用 Microsoft Excel 2016 软件进行整理和初步分析,利用 SPSS 26.0 软件对降雨再分配特征、凋落物养分释放特征和土壤 C、N、P 含量及其化学计量特征进行 Pearson 相关性分析和显著性检验,利用 Canoco5 进行冗余分析(Redundancy analysis, RDA),分析不同降雨再分配特征与凋落物养分释放效率、土壤 C、N、P 含量及其化学计量比之间的关系。显著性区间定义为 95%,图表数据采用平均值 $\pm$ 标准差表示。绘图采用 Origin2021 和 Adobe Illustrator 2022 软件。

2 结果与分析

2.1 不同植被群落降雨再分配特征

本研究测量了 2023 年 7 月 2 日—9 月 1 日的降雨情况,试验期间共观测到可产生穿透雨和树干径流的有效降雨事件 6 次,累计降雨量 133.71 mm,最大降雨量为 36.99 mm,最小降雨量为 7.13 mm。

在观测期间,油松林、刺槐林、油松刺槐混交林和天然次生林的累计穿透雨量为 115.57 mm、114.15 mm、95.85 mm、86.61 mm,分别占总降雨量的 86.43%、85.37%、71.68%、64.77%。树干径流量是降雨再分配过程中占比最小的组分,4 种林分累计树干径流量为 1.46 mm、2.17 mm、1.75 mm、4.29 mm,分别占总降雨量的 1.0%、1.6%、1.3%、3.2%。4 种林分累计植物截流量为 16.7 mm、17.4 mm、36.1 mm、42.7 mm,分别占总降雨量的 12.48%、13.01%、27.00%、31.93%。由图 1 可知,不同林分各降雨再分配类型占比存在一定的差异性,其中,次生林、油松刺槐混交林与其它林分之间存在显著差异性,但油松林和刺槐林之间的差异性不显著。

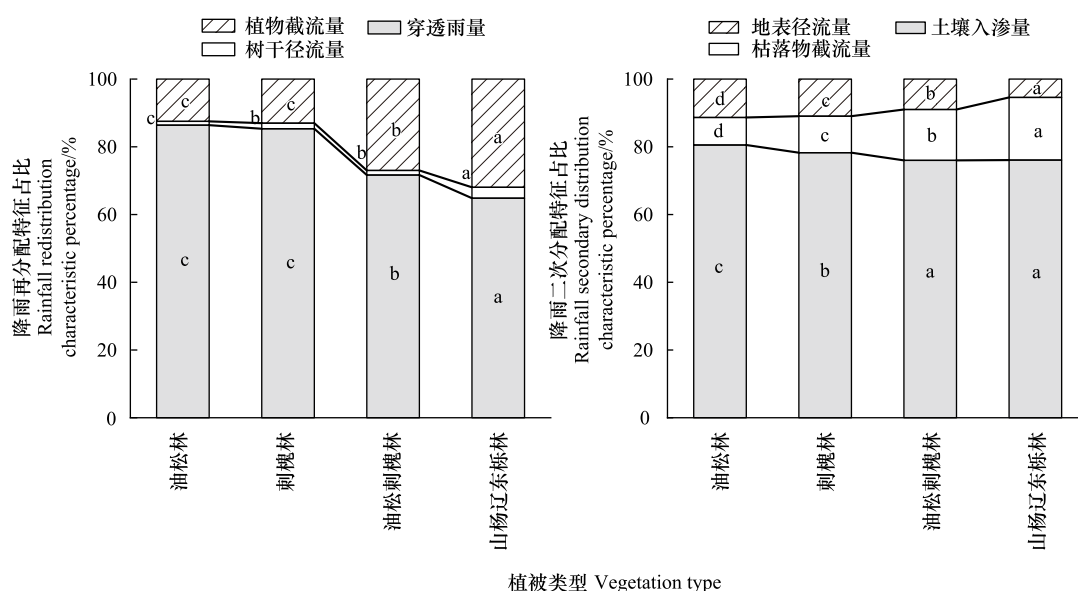


图 1 森林降雨分配特征占比图

Fig.1 Forest rainfall distribution ratio

不同小写字母表示不同林分类型同种降雨再分配类型间的差异显著性 ($P < 0.05$)

穿透雨和树干径流在枯落物层的作用下转化为土壤入渗量、枯落物截流量以及地表径流量,并且在不同林分间存在显著差异性。降雨主要以土壤入渗的形式进入土壤,不同林分的土壤入渗量分别为 93.07 mm、89.31 mm、72.83 mm、65.90 mm。地表径流量和枯落物截流量表现形式相反,不同林分地表径流量表现为油松林 (13.14 mm) > 刺槐林 (12.54 mm) > 油松刺槐混交林 (8.60 mm) > 次生林 (4.73 mm); 不同林分枯落物截流量表现为次生林 (15.98 mm) > 油松刺槐混交林 (14.42 mm) > 刺槐林 (12.30 mm) > 油松林 (9.36 mm)。

2.2 林内降雨氮素输入与地表氮素流失特征

由图 2 可知,林内降雨中氮含量最高的林分为天然次生林,穿透雨和树干径流中氮含量分别为 7.98 mg/L 和 8.03 mg/L。大气降雨经过林冠层再分配过程后,总氮的浓度趋势表现为大气降雨<穿透雨<树干径流。比较氮素输入量和流失量在不同林分中的差异,发现除油松林和刺槐林的穿透雨氮含量差异不明显外,其余在林分间均表现出差异显著性,不同林分氮素输入量表现为油松林<刺槐林<油松刺槐混交林<天然次生林,不同林分氮素流失量表现为天然次生林<油松刺槐混交林<刺槐林<油松林。

2.3 不同植被类型土壤 C、N、P 化学计量比特征及凋落物养分释放特征

根据单因素方差分析发现,土层深度对土壤有机碳(SOC)、总氮(STN)、总磷(STP)具有显著影响,整体变化趋势随土层深度的增加而减小。不同林分间土壤 C、N、P 含量也具有一定的差异性,不同林分 0—100 cm 土层 SOC 含量在 0.29—2.29 g/kg 之间,4 种林分类型的 SOC 含量整体水平差异较为明显,表现为刺槐林<油松刺槐混交林<油松林<天然次生林;STN 含量在 0.28—0.93 g/kg 之间,刺槐林、油松刺槐林、油松林 STN 含量差异不明显,而次生林的 STN 含量高于其它 3 种林分类型;STP 含量在 0.19—0.80 g/kg,4 种林分类型间 STP 含量差异均不明显。

不同林分 0—100 cm 土壤 C:N 在 0.57—3.58 之间,从 4 种林分土壤 C:N 均值来看,刺槐林土壤 C:N 最小,平均值为 1.69;油松林、油松刺槐林、次生林的土壤 C:N 无显著差异,分别为 2.54、2.56、2.65;土壤 N:P 在 0.87—2.34 之间,4 种林分土壤 N:P 整体表现为油松刺槐林(1.10)<油松林(1.46)<刺槐林(1.47)<次生林(1.71),油松林和刺槐林之间无显著差异;土壤 C:P 在 0.81—6.58 之间,土壤 C:P 的变化趋势随土层深度的增加而表现为先增后减,在 10—40 cm 土层达到最大值,4 种林分 C:P 具有显著差异性,表现为刺槐林(2.63)<油松刺槐林(2.83)<油松林(3.79)<次生林(4.56)。

由图 4 可知,不同林分间以及同一林分内不同元素间元素释放速率存在显著的差异性,凋落物 C、N、P 释放量分别在 4.61%—9.14%、3.69%—4.89%、2.53%—7.86% 之间,油松林 3 种元素释放率之间存在明显的差异性,表现为 C>N>P;刺槐林 N 元素释放率最低,C 和 P 元素释放率之间无显著差异性;油松刺槐混交林和天然次生林 3 种元素释放率之间存在显著差异性,表现为 C>P>N。不同林分间凋落物养分释放规律表现为油松林<刺槐林<油松刺槐混交林<天然次生林。

2.4 不同林分降雨再分配特征与凋落物、土壤养分相关性分析和冗余分析

将不同林分降雨分配特征与不同土层和不同植物群落土壤、凋落物元素含量进行冗余分析和 Pearson 相关性分析,发现降雨分配特征与土壤养分含量和凋落物元素释放率存在一定的相关性。由图 5 可知,第一、第二主成分累计方差贡献率为 96.97%,说明第一、第二主成分能较好地解释凋落物、土壤养分与降雨再分配特征的关系。通过分析,发现 SFN 是最主要的贡献因子,贡献率达 86.0%;4 种林分中天然次生林和油松刺槐混交林在对降雨再分配变化的响应上具有相似性。STN、STP、NRR、CRR 与植物截流量、林内氮输入量均呈现出显著正相关($P<0.01$ 或 $P<0.05$),与穿透雨量均呈现出显著负相关($P<0.01$ 或 $P<0.05$);土壤入渗量与 STN、STP、N/P、NRR、CRR 表现为显著负相关($P<0.01$ 或 $P<0.05$);枯落物截流量与 N/P、NRR、PRR 率呈显著正相关($P<0.05$);地表径流量与 STN、STP、N/P、NRR 表现为显著负相关($P<0.01$ 或 $P<0.05$);地表氮流失量与 N/P、PRR 呈显著负相关($P<0.001$ 或 $P<0.05$);树干径流量与土壤、凋落物养分相关性较弱,SOC 及其相关化学计量比对林内降雨再分配特征响应不明显。

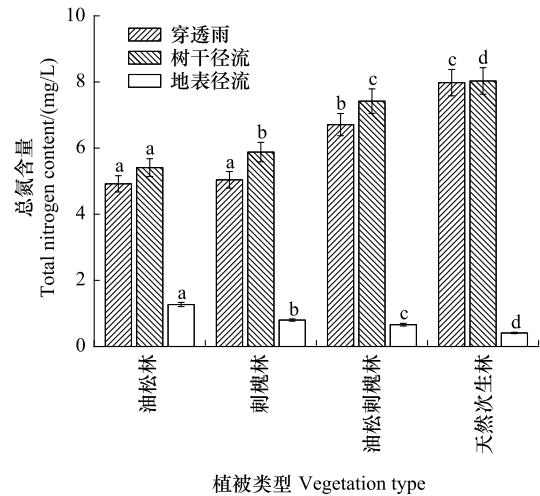


图 2 不同植被类型氮输入与氮流失特征图

Fig.2 Nitrogen input and nitrogen loss characteristics of different vegetation types

不同小写字母表示同一类型降雨分配特征的氮输入或流失量在不同林分类型间的差异显著性 ($P<0.05$)

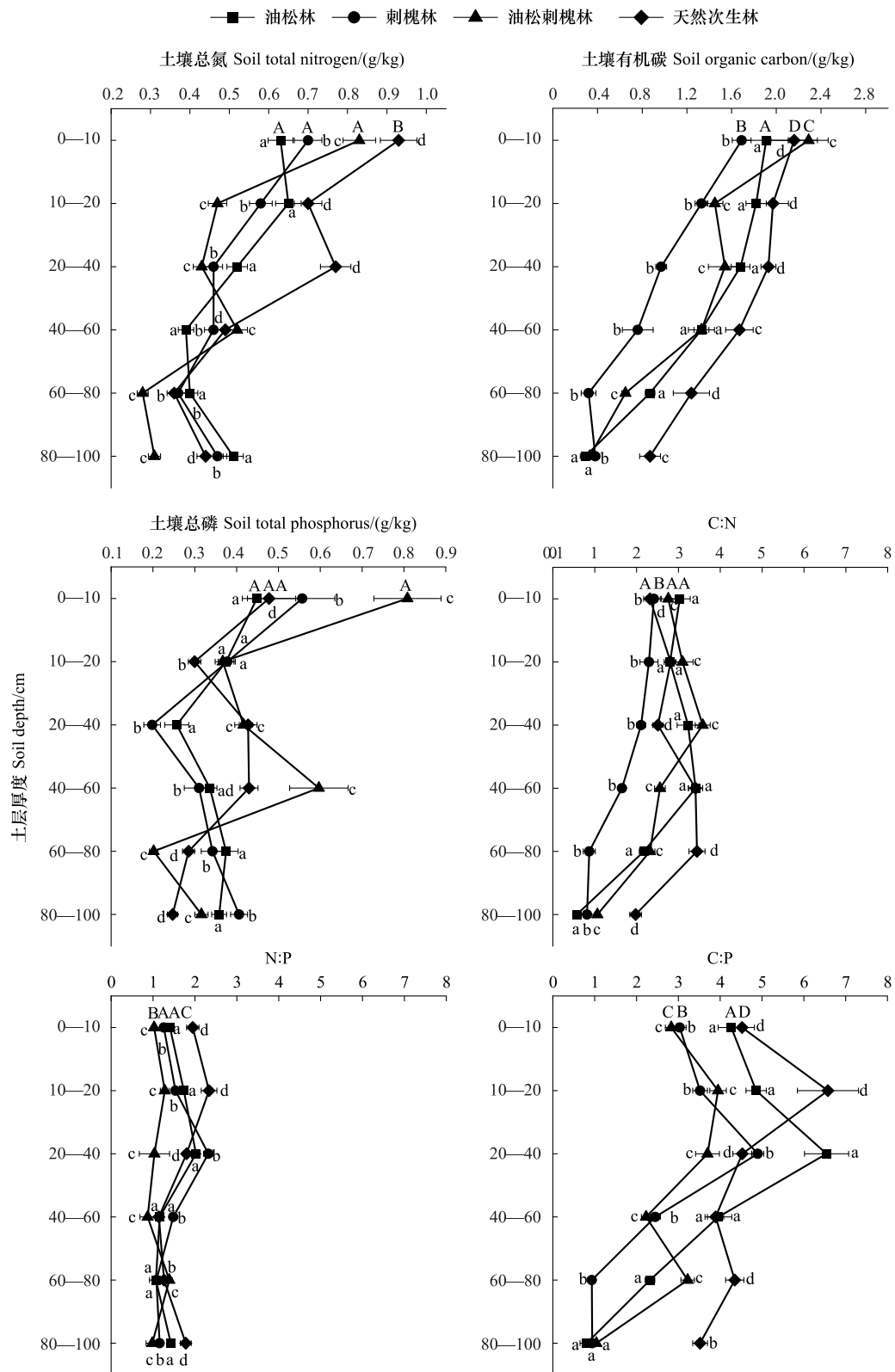


图3 不同林分 C、N、P 及化学计量特征的空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of C, N, P and stoichiometric characteristics of different stands

不同大写字母表示土壤 C、N、P 及其化学计量比的整体水平在不同林分类型间的差异显著性 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一土层深度土壤 C、N、P 及其化学计量比在不同林分类型间的差异显著性 ($P < 0.05$)

3 讨论

3.1 降雨再分配特征对不同植被类型的响应

在森林降雨再分配过程中,不同植被类型占比最大的为穿透雨,其次是植物截留,占比最小的是树干径流。4种植被群落林内降雨以穿透雨的形式下降到地表的占比均超过了60%,与大部分的研究规律相似^[17-18]。本研究中,油松林的穿透雨量占比最大,高于其它3种林分类型。然而一些研究结果发现,油松林的穿透雨量占比通常是小于刺槐林的, Ma 等^[19]对半干旱区油松和刺槐两种植物功能群落降雨分配的研究发现油松林穿透雨量占比(75.1%)小于刺槐林(81.8%);高柳威等^[20]关于油松和刺槐人工林的研究结果同样表明,刺槐林和油松林穿透雨量占比分别为71.79%和63.84%,林冠截流量占比分别为25.63%和35.36%,油松林冠层持水能力明显高于刺槐林。究其原因,可能是林下灌草的丰富度影响了林内降雨再分配过程,研究区内刺槐林的灌草丰富度明显高于油松林,并且油松林内部分林木枝条枯落,冠幅减小,这同样也是影响林内穿透雨量和林冠截流量的重要因素。

降雨进入林内又会进行二次分配,一部分经过枯落物层截流后进入土壤,另一部分以地表径流的形式流失。本研究中,不同林分类型的枯落物截流量与土壤入渗量表现规律为天然次生林>油松刺槐混交林>刺槐林>油松林,而地表径流量表现形式与之相反,这与大部分研究结果相同^[21-23]。通常情况下,天然次生林的降雨拦蓄能力是优于人工林的,这是由于次生林地地表枯落物、腐殖质厚实、微生物活动能力强、地下根系丰富,拦蓄能力强造成的结果。此外,次生林内山杨、辽东栎属于阔叶树种,叶片大,拦蓄量大,产流量小;刺槐人工林叶片蓬松柔软,叶片面积也小于山杨和辽东栎,拦蓄量与产流量几乎持平;而油松林,叶片细长、呈针状,且表面具有油脂,不易分解,拦蓄量小,产流量大,因此凋落物类型也是影响林内降雨拦蓄能力的重要因素。

3.2 不同林分林内降雨氮输入与氮流失特征

降雨是造成黄土高原地区水土流失的主要影响因子,也是补充地表氮流失的重要途径。不同森林类型的降雨在林内分配形式上具有一定的差异性,在降雨再分配过程中,树干径流中的总氮含量高于穿透雨中的总氮含量,且二者远高于区域内大气氮沉降水平,与王琮等^[24]的结论一致。这是因为大气降雨经过林冠层进入森林会产生淋洗效应,雨水会对林木表面的养分物质进行吸收、吸附、淋溶等过程^[25],而与穿透雨相比,树干径流与林木接触的时间更长,吸附的养分更多,因此树干径流中N元素养分浓度更高。4种林分类型间的对比发现,次生林淋洗的养分含量最高,其次是油松刺槐混交林和刺槐纯林,最后是油松纯林。造成这一结果的原因可能是因为氮输入量受到了植物群落的影响^[26],本研究发现,天然次生林的冠层面积大,积累的养分颗粒多,干沉降能力强,而刺槐林冠幅半径小于辽东栎林,叶型也小于山杨和辽东栎^[12],油松林叶片光滑、针状,叶面积小,养分固定能力远不及天然次生林。此外,由于影响森林水文效应的环境状况和气象条件复杂多变,同样造成了林分间氮输入量的差异。

地表径流是造成环境内土壤养分流失的主要原因^[27],不同植被群落下产生的地表径流造成养分流失的程度也表现出不同的差异。本研究中,地表径流引起的氮流失量表现为天然次生林<油松刺槐混交林<刺槐林<油松林。在森林生态系统物质循环过程中,枯落物层是控制森林养分流失的重要部分^[2],而天然次生林内枯落物

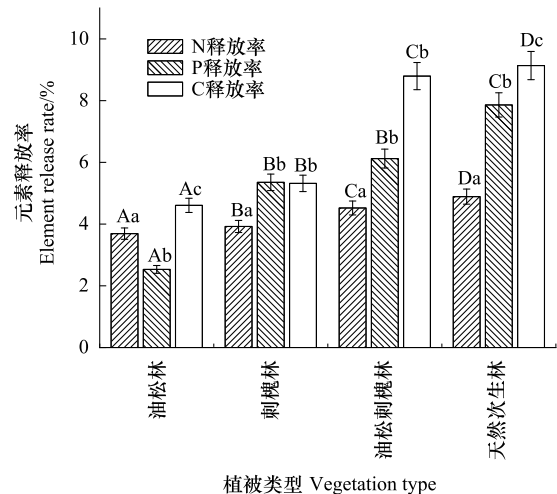


图4 不同树种凋落物 C、N、P 元素释放特征

Fig.4 Release characteristics of C, N and P elements in litter of different tree species

不同大写字母表示同种元素释放率在不同林分类型间的差异显著性($P < 0.05$),不同小写字母表示同种林分内不同元素间释放率的差异显著性($P < 0.05$)

层紧实,被枯落物拦截的养分颗粒高于其它几种林分,因此次生林地表径流中的养分含量低于其它林分。

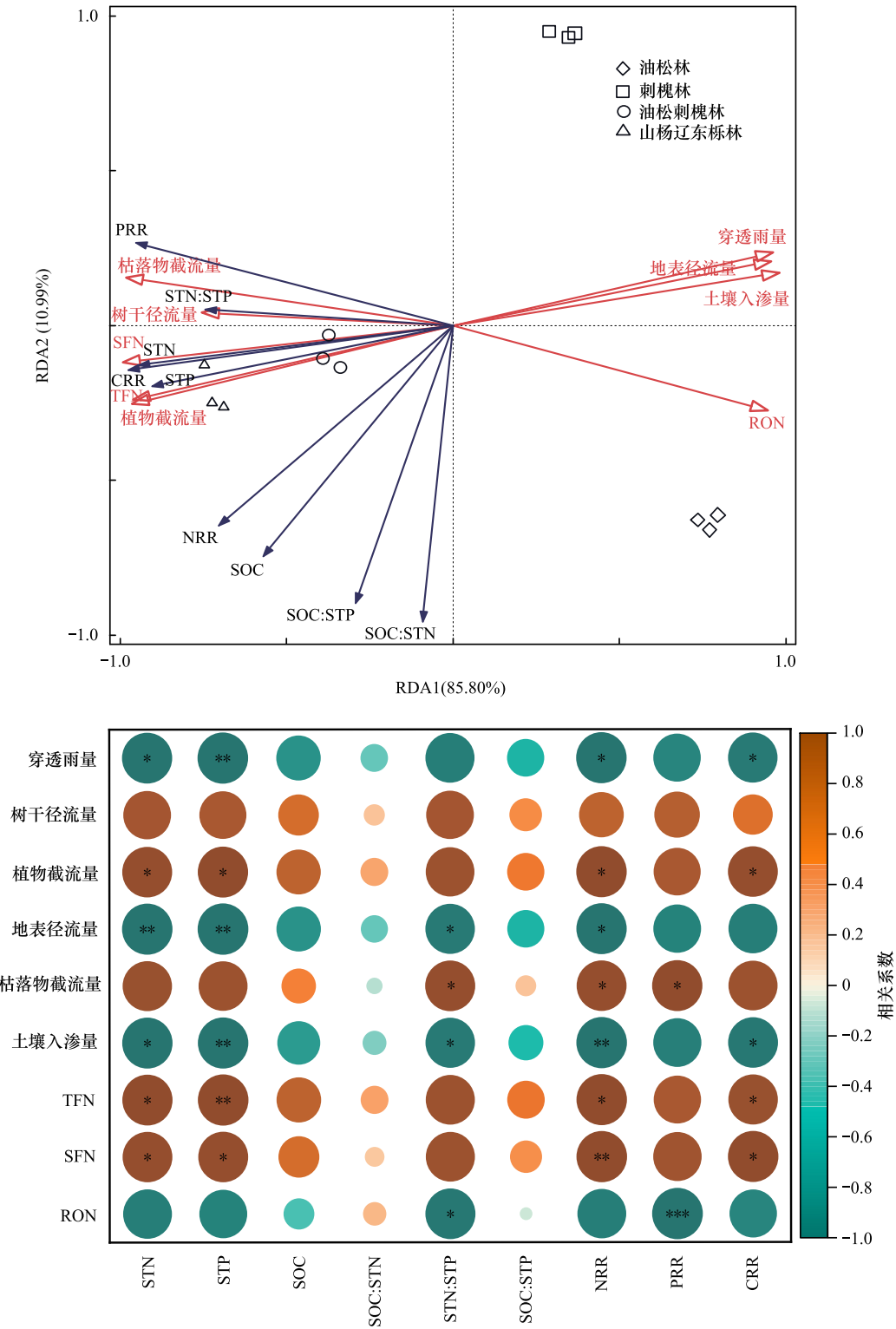


图5 土壤、凋落物 C、N、P 养分变化特征与降雨再分配特征的冗余分析和相关关系矩阵

Fig.5 Redundancy analysis and correlation matrix of soil, litter C, N, P nutrient change characteristics and rainfall redistribution characteristics
TFN: 穿透雨氮含量 Throughflow nitrogen; SFN: 树干径流氮含量 Stemflow nitrogen; RON: 地表径流氮含量 Runoff nitrogen; NRR: N 释放效率 Nitrogen release rate; PRR: 磷释放效率 Phosphorus release rate; CRR: C 释放效率 Carbon release rate; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; STN: 总氮 Soil total nitrogen; STP: 总磷 Soil organic phosphorus; * 表示显著相关 ($P < 0.05$); ** 和 *** 表示极显著相关 ($P < 0.01$ 和 $P < 0.001$)

3.3 不同植被类型的土壤养分及化学计量与凋落物养分释放效率的差异性

不同林分间土壤养分含量表现出一定的差异性,4种林分中,天然次生林的 SOC 和 STN 含量最高,与大部分的研究结果一致^[28—29]。这可能是因为次生林内枯落物蓄积量大,土壤容重小,微生物活性强,分解速率快,土壤表层积累的养分含量高。此外,地下根系也会提高土壤养分含量,一方面土壤根系能够分泌营养物质,提高土壤养分含量,另一方面,土壤中的死根会在微生物的作用下分解,形成土壤养分^[30]。而天然次生林表层土壤根系发达,土壤有机质积累和养分元素归还能力的大大加强。

土壤 C、N、P 化学计量比是评估土壤肥力和土壤质量的重要指标^[31]。土壤 C:N 是反映土壤矿化能力的重要特征,本研究发现,4种林分中,刺槐林的土壤 C:N 最低,其它三种林分无显著差异,这表明刺槐林的土壤矿化能力强,不利于有机质的积累^[32]。土壤 N:P 是评价植物生长的重要指标,常用于对比土壤养分受限情况^[33]。本研究发现,油松刺槐混交林土壤 N:P 最小,天然次生林最大,油松林和刺槐林之间无显著差异性,这表明油松刺槐林内植被生长更容易受土壤 N 元素的限制,同时研究区内四种林分土壤 N:P 低于全国平均水平^[34],也间接说明了黄土高原地区植被生长受土壤 N 元素的限制。土壤 C:P 是判断土壤微生物在矿化作用下释放 P 元素的重要依据。本研究中,4种林分间的土壤 C:P 差异显著,表现为刺槐林<油松刺槐林<油松林<天然次生林,与大部分研究结果相似^[35—36],这表明刺槐林内土壤 P 有效性高,土壤微生物矿化作用释放 P 的潜力大^[37]。

土壤养分主要来源于凋落物分解释放,凋落物分解过程中,养分释放主要分为淋溶-富集-释放、富集-释放和直接释放 3 种模式^[38]。目前的研究表明凋落物 C 元素释放模式主要为直接释放,而 N 元素释放模式表现为淋溶-富集-释放,P 元素释放模式尚不清楚^[39—41]。本研究发现,天然次生林、油松刺槐混交林和刺槐林的 N 元素释放率低于 C、P 两种元素,而油松林中,P 元素释放率最低,这可能就是因为在前 3 种林分中,P 元素主要为直接释放,而在油松林中,P 元素可能发生了富集作用。本研究还发现,不同林分间凋落物养分释放效率存在显著差异性,次生林凋落物养分释放率高于人工林,这可能是因为次生林中的土壤环境更有利于土壤动物和微生物的活动,林内凋落物分解能力和养分释放速率因此大大提升。

3.4 降雨再分配特征与土壤、凋落物养分含量之间的相互关系

不同植被类型引起的降雨再分配变化均会对土壤与凋落物养分特征造成一定的影响。本研究发现,降雨再分配特征能够影响土壤 N 和 P 元素含量,而对土壤 C 含量影响不大,并且 SFN 是影响养分变化的主要贡献因子,造成这样的结果一方面可能是因为大气降水是 N 元素进入森林群落的主要途径之一,降水进入森林后能够实现土壤 N 元素的补充和流动^[2];另一方面降雨进入森林后,形成的穿透雨和树干径流会对林冠层和枯落物层进行淋溶作用,雨水能够溶解、冲刷表层的营养物质,实现植被层与土壤层的养分转移,并且树干径流与树木表面接触时间更长,淋洗的营养物质更多。而土壤 C 主要通过微生物作用的凋落物分解来实现土壤养分归还,因此林内降雨再分配变化对土壤 C 含量影响不大,与王晖等^[42]的结论一致。本研究还发现,树干径流量对土壤养分的影响不明显,这可能是因为树干径流量在森林水文特征中占比极小,对土壤养分无法产生显著的变化。

降雨对不同植被类型凋落物养分释放效率同样具有显著相关性,本研究结果发现,降雨分配变化对凋落物 C、N、P 元素释放会产生不同的影响,与大部分研究结果相同^[43—46]。这可能是因为随着林内降雨量的增加,凋落物表面可溶性营养物质不断淋洗,养分得到释放,同时,降雨进入土壤,增加了土壤含水量,土壤环境发生改变,微生物代谢能力增强,促进凋落物分解与养分释放^[47]。并且本研究根据冗余分析得出,天然次生林和油松刺槐混交林凋落物养分释放效率对降雨再分配特征变化的响应更为相似,可能是因为相比于刺槐林和油松林,这两种林分内植被群落及产生的凋落物种类更为丰富,森林环境复杂多变,受到降雨的影响程度更相似^[43]。然而,一些研究表明降水量对凋落物 C 释放量的影响不明显^[48],与本研究结论不一致,这可能与土壤物理性质差异相关,降雨进入枯落物层和土壤层后,枯落物间隙与土壤孔隙度减小,土壤与空气间的气体交换能力减弱,抑制土壤微生物呼吸,导致 C 释放效率有所减缓^[49],也有研究认为 C 作为结构性元素,受环境变

化的影响较小^[50]。此外,凋落物养分释放效率也和凋落物自身特性相关,凋落物 N、木质素含量以及凋落物的养分释放模式都是影响凋落物养分释放的重要因素^[51—52]。

本研究对黄土高原地区 4 种典型林分降雨分配特征与土壤、凋落物养分进行了相关性分析,发现降雨再分配变化能够改变区域内土壤养分状况,因此在未来植被恢复过程中应根据研究区内实际情况,选择合适的树种,以提高植物与土壤养分含量,促进生态系统养分循环能力,从而优化森林生态系统植被恢复模式和森林生态系统管理措施。但本研究仍存在不足之处,本研究只对植物生长季内大气和林内降雨进行了观测,观测时间较短,未来仍需继续进行更深入、更长期的研究。此外,本研究还发现降雨再分配特征主要受植被结构的影响,因此后续的研究中,应考虑植被结构变化对降雨分配特征与土壤养分特征的影响。

4 结论

(1) 4 种林分类型降雨再分配特征存在显著差异性,油松林、刺槐林、油松刺槐林、次生林累计穿透雨率分别为 86.43%、85.37%、71.68%、64.77%,树干径流率为 1.0%、1.6%、1.3%、3.2%,树冠截流率为 12.48%、13.01%、27.00%、31.93%。降雨受林冠层和枯落物层淋溶作用,林内氮输入量明显高于大气氮输入量,林内植被结构是影响降雨再分配过程的重要因素。

(2) 不同林分类型之间 SOC、STN、STP 含量及化学计量比具有一定的差异性,不同林分 SOC 和 STN 含量表现为天然次生林>人工林,STP 含量差异不明显。研究区内刺槐林的土壤 C:N 最低,其它 3 种林分无显著差异性,刺槐林土壤矿化能力强;天然次生林的土壤 N:P 和 C:P 最高,油松刺槐林的土壤 N:P 最低,油松刺槐林内植物生长与微生物活动受 N 元素限制。

(3) 降雨再分配特征与土壤、凋落物养分特征具有一定的相关性,降雨通过淋溶作用以及改变土壤环境影响土壤 N、P 含量以及凋落物养分释放效率,但对土壤 C 含量影响不显著。

参考文献 (References):

- [1] Ding W B, Wang F, Han J Q, Ge W Y, Cong C Y, Deng L Q. Throughfall and its spatial heterogeneity in a black locust (*Robinia pseudoacacia*) plantation in the semi-arid loess region, China. *Journal of Hydrology*, 2021, 602: 126751.
- [2] 康希睿, 张涵丹, 王小明, 陈光才. 北亚热带 3 种典型森林群落对降水中氮、磷、硫的截留及分配特征. *生态学报*, 2020, 40(19): 6958-6968.
- [3] Cao L, Xu M P, Liu Y S, Yu Z C, Sun L, Tian X F, Zhang Y, Shi J Y, Han X H, Yang P Z, Zhang W. Response of soil nitrogen components and its vertical distribution to rainfall redistribution during *Robinia pseudoacacia* forest restoration on the Loess Plateau. *Ecological Indicators*, 2023, 155: 111036.
- [4] 刘婕, 勾晓华, 刘建国, 杨海江, 李改香, 李琴霞, 瓦锦明, 刘改香. 甘南黄河流域 4 种典型林分土壤 C、N、P 化学计量特征. *生态学报*, 2023, 43(13): 5627-5637.
- [5] 赵一娉, 曹扬, 陈云明, 彭守璋. 黄土丘陵沟壑区森林生态系统生态化学计量特征. *生态学报*, 2017, 37(16): 5451-5460.
- [6] 脱云飞, 沈方圆, 杨翠萍, 马继敏, 郭锁娜, 张岛, 吴耀中. 滇中高原降雨对不同地类土壤磷素、有机质和 pH 变化的影响. *生态环境学报*, 2020, 29(5): 942-950.
- [7] 郭宁, 姜基春, 王国强, 焦峰. 黄土丘陵区不同降水梯度对草地群落化学计量学特征的影响. *水土保持通报*, 2020, 40(2): 1-8.
- [8] 苏卓侠, 苏冰倩, 上官周平. 黄土高原刺槐叶片-土壤生态化学计量参数对降雨量的响应特征. *生态学报*, 2020, 40(19): 7000-7008.
- [9] 尉剑飞, 王誉陶, 张翼, 张昊, 李建平. 黄土高原典型草原植被及土壤化学计量对降水变化的响应. *草地学报*, 2022, 30(3): 532-543.
- [10] Nielsen U N, Ball B A. Impacts of altered precipitation regimes on soil communities and biogeochemistry in arid and semi-arid ecosystems. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1407-1421.
- [11] 李媛媛, 任少华, 黄宗胜, 龙世林, 范传华, 刘海燕. 贵州喀斯特地区不同海拔常见树种枯落物分解及养分释放特征. *生态学杂志*, 2023, 42(6): 1316-1322.
- [12] 王淑春, 程然然, 杜盛. 黄土丘陵区 2 种典型林分降雨分配特征及其主要影响因素. *水土保持学报*, 2022, 36(3): 173-180.
- [13] 吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄. 三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制. *环境科学*, 2015, 36(10): 3825-3831.
- [14] 吴才武, 夏建新, 段峥嵘. 土壤有机质测定方法述评与展望. *土壤*, 2015, 47(3): 453-460.
- [15] 陈剑磊, 谢文霞, 崔育倩, 张艳. SmartChem140 全自动化学分析仪测定土壤全氮全磷的研究. *分析科学学报*, 2016, 32(1): 84-88.
- [16] 贾岳清, 周昊, 殷惠民, 张姃, 杨勇杰. 水中总氮测定方法的研究进展. *工业水处理*, 2020, 40(2): 1-5.
- [17] 孙天妙, 阳辉, 曹建生. 太行山区不同植被降雨再分配特征. *中国生态农业学报: 中英文*, 2023, 31(9): 1471-1481.
- [18] 卫三平, 王力, 吴发启. 黄土丘陵沟壑区刺槐林冠的水文特征. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2008, 32(1): 43-48.
- [19] Ma C K, Yao Q, Meng H B, Zhou B B, Wang Q J, Luo Y. Rainfall partitioning by evergreen and deciduous broad-leaved xerophytic tree species: influence of rainfall, canopy characteristics, and meteorology. *Water*, 2022, 14(22): 3723.

- [20] 高柳威, 冀晓东, 韩朝, 吴春冰. 人工模拟林冠降雨截留试验. 中国水土保持科学, 2020, 18(1): 68-78.
- [21] 陈晶亮, 杨慧, 刘超, 王博, 黄磊. 宁夏罗山自然保护区 3 种典型林分凋落物和土壤层水源涵养能力综合评估. 生态学报, 2023, 43(19): 7987-7997.
- [22] 马晓至, 毕华兴, 王珊珊, 崔艳红, 赵丹阳, 云慧雅, 侯贵荣. 晋西黄土区典型林分枯落物层水文生态特性研究. 水土保持学报, 2020, 34(6): 77-83, 88.
- [23] 刘畅, 张建军, 张海博, 刘俊廷, 高思远, 胡亚伟, 施政乐, 徐勤涛. 晋西黄土区退耕还林后土壤入渗特征及土壤质量评价. 水土保持学报, 2021, 35(5): 101-107.
- [24] 王琮, 王善祥, 范志平, 李法云, 涂志华, 王琨. 辽东山区溪流岸线群落特征对降雨再分配及其养分特征的影响. 水土保持学报, 2019, 33(3): 129-137.
- [25] Geng S, Chen Z, Ma S, Feng Y, Zhang L, Zhang J H, Han S J. Throughfall reduction diminished the enhancing effect of N addition on soil N leaching loss in an old, temperate forest. Environmental Pollution, 2020, 261: 114090.
- [26] 薛婷, 盛后财, 石磊. 城市樟子松人工林降雨分配过程中养分变化特征. 东北林业大学学报, 2021, 49(3): 15-20.
- [27] 徐巧翠, 胥超, 熊德成, 倪祥银, 谭思懿, 袁朝祥, 岳楷. 中亚热带不同森林类型对地表径流磷动态的影响. 应用与环境生物学报, 2023, 29(1): 138-144.
- [28] 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.
- [29] 殷有, 阎品初, 井艳丽, 魏亚伟, 倪鹏跃, 刘源跃, 周永斌. 辽东山区 3 种林分土壤理化性质和微生物特性研究. 沈阳农业大学学报, 2018, 49(5): 552-558.
- [30] 倪惠菁, 苏文会, 范少辉, 曾宪礼, 金艺. 养分输入方式对森林生态系统土壤养分循环的影响研究进展. 生态学报, 2019, 38(3): 863-872.
- [31] Piaszczyk W, Błofska E, Lasota J, Lukac M. A comparison of C: N: P stoichiometry in soil and deadwood at an advanced decomposition stage. CATENA, 2019, 179: 1-5.
- [32] 朱燕, 翟博超, 孙美美, 罗伶书, 王瑛, 杜盛. 黄土丘陵区不同密度刺槐和油松人工林土壤理化性质与化学计量特征. 水土保持研究, 2023, 30(6): 160-167.
- [33] 吴丹, 温晨, 卫伟, 张钦弟. 黄土高原小流域不同植物群落土壤生态化学计量的垂直变化特征. 广西植物, 2023, 43(5): 923-935.
- [34] 温晨, 杨智姣, 杨磊, 李宗善, 卫伟, 张钦弟. 半干旱黄土小流域不同植被类型植物与土壤生态化学计量特征. 生态学报, 2021, 41(5): 1824-1834.
- [35] 王岩松, 马保明, 高海平, 王百田, 李莎, 董秀群. 晋西黄土区油松和刺槐人工林土壤养分及其化学计量比对林分密度的响应. 北京林业大学学报, 2020, 42(8): 81-93.
- [36] 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.
- [37] 郭鑫, 魏天兴, 陈宇轩, 沙国良, 任康, 于欢. 黄土丘陵区典型退耕恢复植被土壤生态化学计量特征. 干旱区地理, 2022, 45(6): 1899-1907.
- [38] 杨万勤, 邓仁菊, 张健. 森林凋落物分解及其对全球气候变化的响应. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2889-2895.
- [39] 张晓曦, 胡嘉伟, 王丽洁, 米皓皓, 回虹燕, 李利平. 不同林龄刺槐林地凋落物分解及养分释放对氮沉降的响应差异. 植物资源与环境学报, 2021, 30(6): 10-18.
- [40] 张雨鉴, 宋娅丽, 王克勤, 郑兴蕊, 潘禹, 梁阳森. 模拟氮沉降对滇中高山栎林凋落物碳氮磷释放和生态化学计量特征的影响. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2022, 50(11): 70-80, 92.
- [41] 刘晶, 谢婉余, 张巧明, 徐少君. 黄土丘陵区不同植物凋落物叶片的分解及养分释放特性. 草业学报, 2018, 27(9): 25-33.
- [42] 王晖, 王健, 杨予静, 陈琳, 刘世荣. 穿透雨减少对红椎人工林土壤有机碳含量和化学组分的影响. 北京林业大学学报, 2022, 44(10): 102-111.
- [43] 张娜, 刘兴诏, 李坤, 褚国伟, 闫俊华. 南亚热带三种主要森林降雨及其再分配过程中的养分差异规律. 生态学报, 2011, 30(2): 193-200.
- [44] 王云霞, 刘桂要, 邓强, 时新荣, 袁志友. 黄土丘陵区人工林刺槐和油松凋落物在不同降雨时期的分解特征. 生态学报, 2020, 40(19): 6872-6884.
- [45] Kulka D D, Filgueiras B K C, dos Santos A B, Locatelli A C P, Domingos de França J, Lins S R M, Tabarelli M. Increased aridity and chronic anthropogenic disturbance reduce litter productivity in a Caatinga dry forest. Forest Ecology and Management, 2024, 553: 121640.
- [46] You Y Y, Xiang W H, Ouyang S, Zhao Z H, Chen L, Zeng Y L, Lei P F, Deng X W, Wang J R, Wang K L. Hydrological fluxes of dissolved organic carbon and total dissolved nitrogen in subtropical forests at three restoration stages in Southern China. Journal of Hydrology, 2020, 583: 124656.
- [47] 谭向平, 申卫军. 降水变化和氮沉降影响森林叶根凋落物分解研究进展. 生态学报, 2021, 41(2): 444-455.
- [48] 许艺馨, 康扬眉, 韩翠, 余海龙, 黄菊莹. 降水量对荒漠草原凋落物-土壤碳氮磷生态化学计量学特征的影响. 中国草地学报, 2022, 44(4): 21-31.
- [49] 邓钰婧, 李小雁, 胡霞, 吴秀臣, 王佩. 高寒草甸生态系统降雨事件对不同深度土壤碳释放的试验分析. 生态学报, 2022, 42(8): 3315-3324.
- [50] 牛得草, 董晓玉, 傅华. 长芒草不同季节碳氮磷生态化学计量特征. 草业科学, 2011, 28(6): 915-920.
- [51] Erdenebileg E, Wang C W, Yu W Y, Ye X H, Pan X, Huang Z Y, Liu G F, Cornelissen J H C. Carbon versus nitrogen release from root and leaf litter is modulated by litter position and plant functional type. Journal of Ecology, 2023, 111(1): 198-213.
- [52] Pei G T, Liu J, Peng B, Gao D C, Wang C, Dai W W, Jiang P, Bai E. Nitrogen, lignin, C/N as important regulators of gross nitrogen release and immobilization during litter decomposition in a temperate forest ecosystem. Forest Ecology and Management, 2019, 440: 61-69.