

DOI: 10.5846/stxb202210062825

郭文芳,李鑫,陈艳梅,刘倩愿,王佳乐.太行山坡地不同管理措施植被-土壤系统耦合关系.生态学报,2023,43(15):6170-6181.

Guo W F, Li X, Chen Y M, Liu Q Y, Wang J L. Evaluation of the coupling relationship between vegetation and soil system under different management measures in Taihang Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6170-6181.

太行山坡地不同管理措施植被-土壤系统耦合关系

郭文芳,李鑫,陈艳梅*,刘倩愿,王佳乐

河北师范大学地理科学学院,河北省环境变化遥感识别技术创新中心,河北省环境演变与生态建设重点实验室,石家庄 050024

摘要:植被和土壤的耦合协调关系可以用来衡量生态系统的一致性和协调性程度。研究以河北省临城县太行山东麓丘陵坡地为研究区,以原生灌草地、不管理的人工核桃林、人工核桃林下清除灌草、人工核桃林下清除灌草并施肥等 4 种不同管理措施的植被-土壤系统为研究对象,建立由 4 个植被因子(Shannon-Wiener、Simpson、Margalef、Pielou 等指数)和 7 个土壤因子(土壤有机碳、全氮、全磷、全钾、pH、电导率、含水率等)组成的评价指标体系,采用层次分析法和熵权法确定各因子权重,以耦合协调度模型评价二者的协调程度。结果表明:(1)不同管理措施下,除植被因子 Pielou 指数外,其余植被和土壤因子均存在显著差异性($P<0.05$)。(2)土壤有机碳与 Simpson 指数呈显著正相关($P<0.05$),与 Shannon-Wiener、Pielou、Margalef 指数呈显著负相关($P<0.05$),土壤全氮与 Shannon-Wiener 和 Margalef 指数呈显著负相关($P<0.05$)。(3)不同管理措施下植被-土壤系统耦合协调程度总体处于失调发展状态,原生灌草地为严重失调发展模式的植被-土壤同步发展型,不管理的人工核桃林和林下清除灌草并施肥均属于中度失调发展模式的土壤滞后发展型,林下清除灌草属于轻度失调发展模式的植被滞后发展型。综上,种植人工核桃林并清除林下灌草有利于提升植被-土壤系统耦合协调度,但尚未达到最佳的协调状态。

关键词:太行山坡地;管理措施;植被-土壤系统;耦合协调

Evaluation of the coupling relationship between vegetation and soil system under different management measures in Taihang Mountains

GUO Wenfang, LI Xin, CHEN Yanmei*, LIU Qianyuan, WANG Jiale

College of Geographical Sciences, Hebei Normal University, Hebei Technology Innovation Center for Remote Sensing Identification of Environmental Change, Laboratory of Environmental Evolution and Ecological Construction of Hebei Province, Shijiazhuang 050024, China

Abstract: The coupling and coordination relationship between vegetation and soil can be used to measure the degree of coherence and coordination of the ecosystem. This study was conducted in the low hilly area at the eastern foot of the Taihang Mountains, Lincheng County, Hebei Province, taking four vegetation-soil systems with different managements as research objects, including native shrub-herbs land, unmanaged walnut plantation, walnut plantation with a removal of shrub-herbs, and walnut plantation with a removal of shrub-herbs and fertilization. The evaluation index system included four plant factors, i.e., Shannon-Wiener, Simpson, Margalef, and Pielou index, and seven soil factors, i.e., soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, pH, electrical conductivity, and water content. The weight value of each index was determined by an analytic hierarchy process and entropy method, and the model for the degree of coupling coordination between vegetation and soil was constructed. The results showed that: (1) under different managements, all the plant and soil factors were significantly different ($P<0.05$), except for the vegetation Pielou index. (2) Soil organic carbon was positively correlated with vegetation Simpson index ($P<0.05$), but negatively correlated with vegetation Shannon-Wiener, Pielou and Margalef indices ($P<0.05$). Soil total nitrogen was negatively correlated with vegetation

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB3901104)

收稿日期:2022-10-06; 采用日期:2023-02-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 330896729@qq.com

Shannon-Wiener and Margalef indices ($P < 0.05$). (3) The coordination degree of the vegetation-soil system under different managements was generally in a dysfunctional developmental state. The native shrub-herbs land was severely dysfunctional of synchronous vegetation-soil development. Unmanaged walnut plantation and the walnut plantation with a removal of shrub-herbs and fertilization belonged to the soil lagged behind vegetation development type of the moderately dysfunctional developmental pattern. The walnut plantation with a removal of shrub-herbs belonged to the vegetation lagged behind soil development type of the mildly dysfunctional developmental pattern. In conclusion, removing shrub-herbs under walnut plantations was conducive to improving the coordination of vegetation-soil systems, but it did not yet reach the optimum coordination.

Key Words: Taihang Mountain slope; management measures; vegetation-soil system; coupling coordination

植被-土壤是一个相互作用,相互影响的有机整体,两系统间存在着天然的耦合关系。土壤养分、水分为植物生长、发育、繁殖提供基础支撑^[1-3],植物也通过对土壤养分吸收、固定、积累和分解过程,改变土壤理化性质^[4-5]。坡地土层浅薄易侵蚀,地表植被覆盖物稀疏,植被-土壤耦合协调状况较差^[6-7],恰当的管理措施能改善坡地植被与土壤的恢复条件,增强坡面生境抗侵扰能力^[8],提高植被-土壤系统耦合度。因此,研究不同管理措施对坡面植被-土壤耦合关系的影响,对促进坡地植被-土壤资源的高效利用和区域可持续发展具有重要理论与现实意义。

目前,国内外学者从多角度揭示了植被群落与土壤间的耦合关系。白一茹^[9]等研究宁夏南部宁南山坡面在林地、灌木地、弃耕地、草地和农地等不同土地利用方式下植被-土壤系统的耦合协调状况,结果表明,不同利用方式下的植被-土壤系统耦合协调度不同,农地、草地的耦合协调度高于林地、灌木地,农地协调状况最好。徐明^[10]等、李豪^[11]等均以黄土高原沟谷地为研究区,分别探究不同植被恢复模式、不同微地形地貌类型对植被-土壤耦合协调关系的影响,研究发现不同植被恢复模式下刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林沟和柠条(*Caragana korshinskii*)灌丛沟的发展状况较好;不同地形地貌条件下植被-土壤系统处于完全不同的发展状况,其中切沟和塌陷的情况最好,而原状坡情况最差。王皓月^[3]等分析了九峰山侧柏(*Platycladus orientalis*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、山杨(*Pobulus davidiana*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)等不同林分类型下的植被-土壤间相互作用,研究发现土壤的发展状况整体优于植被的发展状况,且柠条(*Caragana korshinskii*)较其他林分能够较大提高植被-土壤系统的耦合协调度。上述相关研究成果探究了不同土地利用方式、不同植被恢复模式及不同微地貌类型下生态林、经济林植被-土壤系统的耦合协调度。此外,研究经济林下不同管理措施对植被-土壤系统的耦合协调度的研究也较丰富,如南国卫^[12]等探究黄土丘陵地区侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、榆树(*Ulmus pumila*)、柠条(*Caragana korshinskii*)等经济林在多树种混交及梯田改造等管理措施下对植被-土壤系统耦合协调度的改善效果,结果发现侧柏(*Platycladus orientalis*) + 油松(*Pinus tabulaeformis*)梯田模式对土壤环境和植被生长的改善作用最好;黄鑫龙等^[13]探讨安徽宁国县山核桃林(*Carya cathayensis* Sarg.)下种植紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、百喜草(*Paspalum notatum*)以及施除草剂等不同管理措施对植被-土壤系统的影响,分析得出种植百喜草(*Paspalum notatum*)能更好的促进林下植被生长、提高土壤质量,使植被-土壤耦合协调度提高。上述研究主要集中于中国西北部或南方地区,华北地区相关报道较少,且现有研究侧重分析不同类型管理措施对植被-土壤系统耦合关系的影响,涉及由原生灌草地到不管理的人工林、人工林下清除灌草、人工林下清除灌草并施肥的不同管理梯度的研究较少,开展此类型研究,有助于阐明植被-土壤系统恢复、改善的关键环节,便于优选最佳管理措施,有深入研究的空间和价值。

太行山东麓低山丘陵区自然生态基底敏感脆弱,长期人类活动导致该区坡地生态系统严重退化,目前仍是国家级水土流失重点治理区^[14]。自2000年起,为改善坡地生态环境和促进农民增收,该区域陆续实施大规模经济林建设工程,通过培植薄皮核桃(*Juglans regia* L.)、苹果(*Malus domestica*)等经济树种,使该区域森林覆盖率大幅度提升,取得了显著的生态和经济效益,但是也出现一些新问题,如林下水土流失、部分果树生

长情况较差等,经济林生态系统稳定性有待提升。本研究以太行山东麓丘陵坡地为研究区,探究原生灌草地、不管理的人工核桃林、人工核桃林下清除灌草、人工核桃林下清除灌草并施肥等 4 种不同管理措施下植被-土壤系统的耦合协调关系,重点解决以下问题:(1)不同管理措施下土壤理化性质和植物多样性存在什么显著特征?(2)土壤理化性质与植物多样性指标间存在哪些相关性?(3)不同管理措施下植被-土壤系统发展模式分别是什么?哪种管理措施下植被-土壤系统耦合协调度最高?

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于太行山东麓低山丘陵区,子牙河水系午河上游,河北省邢台市临城县绿蕾农林科技有限公司核桃基地内(114°29'16" E—114°30'1.4" E, 37°29'47" N—37°29'2.70" N),属于丘陵坡地,海拔高度 120—200 m。气候为暖温带大陆性季风气候,四季分明,年内温差大,年平均气温在 12℃—14℃,其中 1 月为最冷,平均气温在-2℃左右;7 月最热,平均气温为 27℃;降水多集中在 7—9 月,年均降水量 605 mm。主要土壤类型为棕壤和在花岗片麻岩等风化母质上发育而来的山地褐土,土质中性偏碱,土壤沙性强,土层浅薄且易侵蚀。现有天然植物主要为灌木和草本,低坡有人工种植的乔木,优势物种主要为核桃(*Juglans regia* L.)人工林和酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*)、荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)等。

1.2 实验设计与测定方法

1.2.1 样地布设

试验区内存在多个坡顶至坡脚为完整、典型的丘陵缓坡地,从 2003 年开始,该区内坡面大规模种植人工核桃林,形成由坡顶至坡底按原生灌草-人工乔灌草的植被布局。基于野外调查,在 2021 年 10 月选取试验区内西北部的坡度 9°、海拔 140—155 m 坡地为研究对象,在该坡地南坡向已经形成不同管理措施的核桃林和未受人为活动影响的原生灌草植被,在坡上选取 3 种采取管理措施的核桃林作为研究样地(T1、T2、T3),同时选定一块原生灌草地(S1)作为对照样地(表 1),每个样地大小为 50 m×50 m,4 种样地类型照片见图 1,在 4 个样地内进行植被调查和土壤样品采集。

表 1 研究样地基本特征

Table 1 Basic characteristics of the study plot

样地 Plot	采样位置 Sampling location	管理措施 Management measures	植被类型 Vegetation types	管理强度 Intensity of management
S1	原生灌草样地	无	灌木+草本	无
T1	人工核桃林草样地	栽种核桃林	乔木+灌木+草本	弱
T2	人工核桃林草样地	栽种核桃林 每 2 年清除林下灌木、林下株高≥20—30 cm 灌草植物	乔木+草本	中
T3	人工核桃林草样地	栽种核桃树 每 2 年清除林下灌木、林下株高≥20—30 cm 灌草植物 每 3 年施 1 次化肥,均施肥量约 620—650 kg/hm ²	乔木+草本	强

S1: 原生灌草样地 Native shrub-herbs land; T1: 未管理的人工核桃林草样地 Unmanaged walnut plantation; T2: 定期清除灌草的人工核桃林草样地 Walnut plantation with a removal of shrub-herbs; T3: 定期清除灌草并施肥的人工核桃林草样地 Walnut plantation with a removal of shrub-herbs and fertilization; 植被类型: 乔木主要为核桃树(*Juglans regia* L.); 灌木主要为荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)、酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*)等; 草本主要为狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv.)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、鹅绒藤(*Cynanchum chinense* R. Br)等

1.2.2 土壤样品采集及植被调查

2021 年 10 月对 4 块研究样地进行土壤样品采集和植物群落调查。在 4 块样地内均随机设置 1 个 10 m×10 m 的标准样方,在标准样方内采用等距取样法设置 4 个 1 m×1 m 的小样方,在每个小样方的 4 个角处设置 4 个采样点,用环刀和自封袋采集坡地 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 层土壤带回实验室,用于测定土壤理



图 1 样地基本情况

Fig.1 Basic information about the sample sites

化指标。因 4 块研究样地群落结构差异,故分别按灌木层、草本层进行调查采样。灌木层调查:在灌木群落外貌较为一致的 S1、T1 样地各设 4 个 2 m×2 m 标准样方,统计样方内灌木种类、数量、高度、灌木盖度等。草本层调查:在 4 块样地内各设 4 个 1 m×1 m 的标准样方,记录样方内草本种类、株数、株高、植被盖度等指标。

1.2.3 植物群落特征与土壤理化性质测定与分析

(1) 林下植物多样性

植物物种多样性是坡面植物群落生态系统完整性的重要功能与标志^[15-17],本研究通过对比分析,采用 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Simpson 优势度指数(C)、Margalef 丰富度指数(DMG)和 Pielou 均匀度指数(E)4 个指标进行坡面林下植物群落多样性计算^[18],计算公式如下:

$$\text{Shannon-Wiener 多样性指数: } H' = - \sum_{i=1}^s (P_i \times \ln P_i) \quad (1)$$

$$\text{Simpson 优势度指数: } C = 1 - \sum_{i=1}^s (P_i)^2 \quad (2)$$

$$\text{Margalef 丰富度指数: } \text{DMG} = \frac{S - 1}{\ln N} \quad (3)$$

$$\text{Pielou 均匀度指数: } E = \frac{H'}{\ln S} \quad (4)$$

式中, S 为物种数目; P_i 为第 i 种的相对个体数,即 $P_i = N_i/N$,其中 N 为样方内全部种的个体总数, N_i 为第 i 种的个体数。

(2) 土壤理化性质的测定

采用土壤剖面法在 4 块样地进行土壤样品采集,用于土壤基本理化性质测定。本研究选取了土壤含水率 (Soil water content, SWC)、pH、电导率 (Electrical conductivity, EC)、有机碳 (Soil organic carbon, SOC)、全氮 (Total nitrogen, TN)、全磷 (Total phosphorus, TP)、全钾 (Total potassium, TK) 进行分析测定。其中,土壤含水率采用烘干称量法测定;土壤 pH 值采用电极电位法测定;土壤电导率采用电导率仪测定;土壤有机碳和土壤

全氮采用 CN 元素分析仪测定^[19];土壤全磷含量采用钼锑抗比色法测定;土壤全钾采用原子吸收分光光度法测定。

1.3 植被-土壤耦合协调度评价法

为了准确评价不同管理措施下林草群落与土壤理化性质的关系,在设置评价指标体系时,借鉴相关研究成果^[11,20],构建能够反映不同管理措施植被-土壤耦合协调评判的 2 级次指标。本研究共选取植物指标 4 个,土壤指标 7 个,共计 11 个指标。

1.3.1 熵值综合权重法

植被-土壤耦合协调度评价涉及植被、土壤两个子系统,各系统的指标系数存在量纲不统一的问题,本研究采用熵值法来确定各指标的权重值。

(1) 构建评价指标的判断矩阵

$$R = (r_{ij})_{m \times n} \quad (5)$$

该矩阵中 m 为评价对象, n 为评价指标,其中 $(i=1, 2, 3, \dots, m; j=1, 2, 3, \dots, n)$

(2) 为了消除指标单位不同所带来的误差,使其数据具有可比性,采用极差法对研究数据进行标准化处理,公式为:

$$b_{ij} = (r_{ij} - r_{\min}) / (r_{\max} - r_{\min}) \quad (6)$$

$$b_{ij} = (r_{\max} - r_{ij}) / (r_{\max} - r_{\min}) \quad (7)$$

式中: b_{ij} , r_{ij} 分别为极差标准化后的指标数据、原始指标数据; r_{\max} , r_{\min} 分别为同一指标不同评价对象的最大值与最小值。公式(6)和公式(7)分别表示正向指标与负向指标。

(3) 各评价指标的熵(E_j)为:

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (8)$$

$$P_{ij} = b_{ij} / \sum_{i=1}^n b_{ij} \quad (9)$$

(4) 各评价指标的权重(W_j)为:

$$W_j = (1 - E_j) / \left(\frac{1}{\ln n} - \sum_{i=1}^n E_j \right) \quad (10)$$

计算出各个指标权重值(表 2):

1.3.2 植被-土壤耦合模型

(1) 耦合度模型

耦合度是度量系统或要素之间相互作用和影响程度的定量指标,本研究中分别用 $VCE(x)$ 和 $SCE(y)$ 表示植被系统和土壤系统,公式如下:

$$VCE(x) = \sum_{i=1}^m p_i x_i \quad (11)$$

$$SCE(y) = \sum_{j=1}^n q_j y_j \quad (12)$$

式中: $p_i x_i$ 为植被系统中第 i 个土壤要素的权重值和标准化值, $q_j y_j$ 为土壤系统中第 j 个土壤要素的权重值和标准化值。

植被-土壤系统的耦合度模型计算公式为:

$$C_{sp} = \frac{\sqrt{VCE(x) \times SCE(y)}}{\sqrt{VCE(x) + SCE(y)}} \quad (13)$$

式中: C_{sp} 为植被-土壤系统的耦合度; $0 \leq C_{sp} \leq 1$ 。当 C_{sp} 接近于 0 时,说明植被-土壤系统要素之间不存在明显关联,当 C_{sp} 接近于 1 时,说明植被-土壤系统要素之间存在明显耦合关联。

表 2 植被-土壤系统耦合协调度指标及权重

Table 2 Vegetation-soil system coupling coordination index and weight

目标层 Objective level	子目标层 Subgoal layer	指标层 Index level	权重 Weight
植被-土壤综合系统 Vegetation-soil integrated system	植被系统	Shannon-Wiener 多样性指数 H'	0.14
		Simpson 优势度指数 C	0.05
		Margalef 丰富度指数 DMG	0.09
		Pielou 均匀度指数 E	0.14
	土壤系统	土壤有机碳 SOC	0.12
		土壤全氮 TN	0.10
		土壤全磷 TP	0.10
		土壤全钾 TK	0.05
		土壤电导率 EC	0.09
		土壤 pH	0.05
		土壤含水率 SWC	0.07

H' : Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index; C : Simpson 优势度指数 Simpson dominance index; DMG: Margalef 丰富度指数 Margalef richness index; E : Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; TK: 全钾 Total potassium; EC : 电导率 Electrical conductivity; pH: 土壤 pH Soil pH; SWC: 土壤含水率 Soil water content

(2) 耦合协调度模型

为了弥补耦合度模型不能反映植被-土壤系统在整个系统中的“功效”和“协同”效应的缺陷^[20], 构建能反映植被-土壤系统相互作用的协调度模型:

$$T = \alpha VCE(x) + \beta SCE(y) \quad (14)$$

$$Dc = \sqrt{C_{sp} \times T} \quad (15)$$

式中: T 为植被-土壤系统的综合协调度系数; α, β 为土壤和植被系统的贡献率, 考虑到太行山区的实际情况, 认为土壤和植物系统在生态环境建设过程中处于同等重要的地位, 设 $\alpha = \beta = 0.5$ 。 Dc 为植被-土壤系统的综合协调度; $0 \leq Dc \leq 1$, 当 Dc 接近于 0 时, 说明植被-土壤系统的协调度越差, 当 Dc 接近于 1 时, 说明植被-土壤系统的协调度越好。

(3) 植被-土壤系统协调发展类型的判断标准

目前, 国内外研究对于耦合协调度等级划分缺乏统一标准, 本文参考前人的研究成果^[9], 根据耦合协调度数值 Dc 将植被-土壤系统的耦合协调模式进行分类, 根据植被-土壤耦合协调程度 $VCE(x)/SCE(y)$ 得出植被-土壤系统耦合协调特征, 最终评判出太行山坡地植被-土壤系统耦合协调状况。

1.4 数据分析

利用 Microsoft Excel 2010 对数据进行预处理; 用 SPSS 26.0 软件对数据进行单因素方差分析和 LSD 显著性检验; 用 Pearson 法对植物群落特征与土壤理化性质的相关性进行分析, 并进行显著性检验; YAAHP 11.2 进行层次分析法确定权重; 采用 Origin 2022 作图。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质特征

土壤电导率、含水率、pH 对 4 种不同管理措施呈现不同程度的响应(图 2)。不同管理措施 0—30 cm 土层土壤平均电导率为 78.01—114.23 us/cm, T1 显著高于 T2、S1 ($P < 0.05$), T3 与其他管理措施间差异不显著, 表明采取管理措施的土壤电导率较高。0—30 cm 土层土壤平均含水率存在显著性差异 ($P < 0.05$), 表现为 $T3 > T2 > S1 > T1$, 但 S1、T1、T2、T3 间差异不显著, 由此发现, 在栽植人工核桃林基础上, 定期清除林下灌草及施肥的土壤含水率较高, 表明随着管理程度增强, 土壤含水率大体呈增加趋势。不同管理措施 0—30 cm 土层土壤 pH 具有显著差异 ($P < 0.05$), 均呈现弱碱性, 其中 T2 土壤 pH 值最高, S1 则最低, T3 与其他管理措施间不存在

显著性差异,不同管理措施对土壤 pH 影响程度较小。

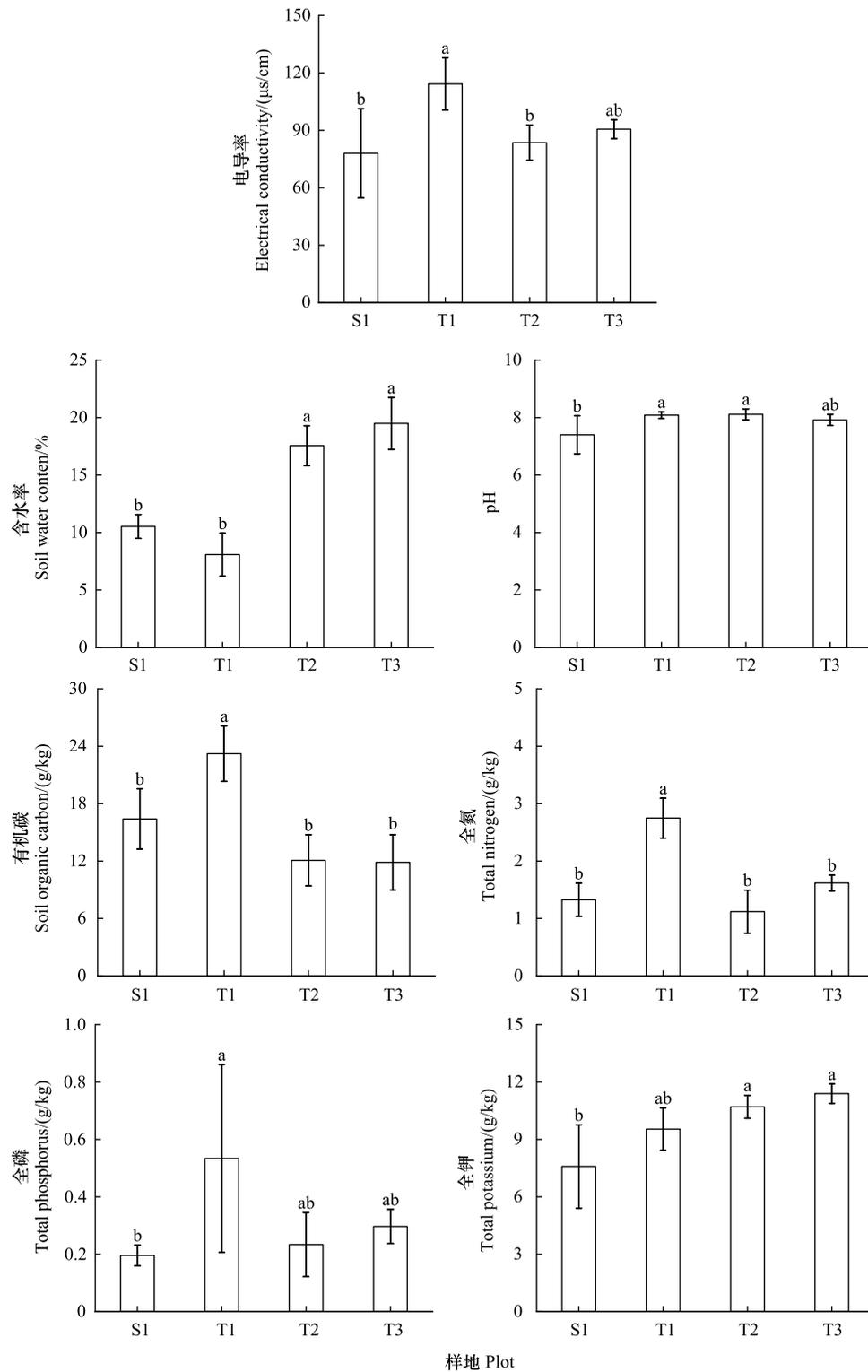


图2 不同管理措施下土壤理化性质特征

Fig.2 Characteristics of soil physicochemical properties under different management measures

图中不同小写字母表示不同管理措施间差异显著 ($P < 0.05$)

对不同管理措施下土壤养分含量分析表明,4种管理措施下0—30 cm 土层土壤有机碳、全氮、全磷、全钾

和 pH 存在显著差异 ($P < 0.05$), 但差异程度不一致。0—30 cm 土层土壤有机碳含量范围为 11.87—23.22 g/kg, 表现为 $T1 > S1 > T2 > T3$, $T1$ 与其他管理措施间存在显著差异 ($P < 0.05$), 且土壤有机碳含量整体呈随管理程度增强而下降的趋势。土壤全氮、全磷含量变化较为一致, 分别为 $T1 > T3 > S1 > T2$ 和 $T1 > T3 > T2 > S1$, 随管理程度增强, 均呈现先降低后增加的趋势, $T1$ 与其他管理措施存在显著差异 ($P < 0.05$), $S1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 含量较低且彼此间无显著差异。不同管理措施下土壤全钾含量范围为 7.59—11.39 g/kg, 由高到低依次为 $T3 > T2 > T1 > S1$, $T3$ 、 $T2$ 与 $S1$ 间差异显著 ($P < 0.05$), 人工种植核桃林、核桃林地内定期清除林下灌草、核桃林地内定期清除林下灌草并施肥的土壤全钾含量均较高, 且随管理程度增强呈增加趋势。由此可见, 不同管理措施对土壤养分含量的影响存在较大差异, $T1$ 的养分情况总体相对较好。

2.2 植物多样性特征

通过对不同管理措施下的植物多样性指标进行分析发现(表 3), $T2$ 的 Shannon-Wiener 多样性指数显著高于其他管理措施 ($P < 0.05$), 且 $S1$ 、 $T1$ 、 $T3$ 之间无显著差异, 表明随管理程度增强, 植物物种多样性呈先增加后降低的趋势, 但均高于原生灌草地。在 Pielou 均匀度指数方面, 不同管理措施下的 Pielou 指数由高到低为 $T2 > T3 > T1 > S1$, 且相互之间不存在显著性差异, 说明种植核桃林以及定期除草、施肥等管理措施对植物群落物种分布均匀度的影响较小。不同管理措施下 Simpson 优势度指数范围为 0.28—0.68, 表现为 $S1 > T1 > T3 > T2$, $T2$ 与其他管理措施间存在显著性差异 ($P < 0.05$), 随管理程度增强, 优势度呈先降低后增加的趋势, 但均低于原生灌草地。不同管理措施 Margalef 丰富度指数由高到低依次为 $T2 > S1 > T3 > T1$, $T2$ 显著高于其他管理措施 ($P < 0.05$), 其他三种管理措施间则未呈现显著性差异。由此可知, $T2$ 的 4 种植物多样性指标与其他管理措施间均存在显著性差异 ($P < 0.05$), 植物群落的多样性、均匀度、丰富度指数较高, 但优势度指数较低。

表 3 不同管理措施下植物多样性特征

Table 3 Characteristics of vegetation diversity under different management measures

样地 Plot	Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index	Simpson 优势度指数 Simpson dominance index	Margalef 丰富度指数 Margalef richness index
S1	0.67±0.53b	0.42±0.27a	0.68±0.27a	0.89±0.37b
T1	0.62±0.39b	0.43±0.26a	0.65±0.23a	0.63±0.22b
T2	1.54±0.25a	0.76±0.18a	0.28±0.14b	1.83±0.19a
T3	0.71±0.10b	0.47±0.05a	0.64±0.07a	0.87±0.24b

同列不同小写字母表示不同管理措施间差异显著 ($P < 0.05$)

2.3 坡面植被-土壤系统因子间相关性分析

为进一步揭示植被-土壤各因子之间的相互关系, 应用 Origin 2022 进行相关分析(图 3)。在土壤系统因子方面, 土壤有机碳和全氮、电导率呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与土壤含水率呈显著负相关 ($P < 0.05$); 土壤全氮与全磷、电导率呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与土壤含水率呈显著负相关 ($P < 0.05$); 土壤全钾与土壤含水率呈显著正相关 ($P < 0.05$); 土壤电导率与土壤 pH 呈显著正相关 ($P < 0.05$)。在植物多样性方面, Shannon-Wiener 指数与 Pielou、Margalef 指数呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与 Simpson 指数呈显著负相关 ($P < 0.05$); Pielou 指数与 Margalef 指数呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与 Simpson 指数呈显著负相关 ($P < 0.05$); Simpson 指数与 Margalef 指数呈显著负相关 ($P < 0.05$)。在土壤因子与植物多样性关系方面, 土壤有机碳与 Simpson 指数呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与 Shannon-Wiener、Pielou、Margalef 指数呈显著负相关 ($P < 0.05$), 土壤全氮与 Shannon-Wiener 和 Margalef 指数呈显著负相关 ($P < 0.05$), 土壤系统其他因子则与植物多样性无显著相关性。

2.4 坡面植被-土壤系统耦合评价

各不同管理措施下坡面植被综合指数 $VCE(x)$ 、土壤综合指数 $SCE(y)$ 及植被-土壤系统耦合度 Dc 指标的计算结果如下(表 4)。总体上, $T1$ 、 $T3$ 具有较高的植被综合指数 $VCE(x)$, $T2$ 具有较高的土壤综合指数 $SCE(y)$ 和耦合度指数 Dc 。土壤综合指数具体表现为 $T2 > T3 > S1 > T1$, 说明给人工核桃林样地定期除草和施肥, 会在不同程度上改良土壤质量, 特别是给人工林定期清除林下灌草。植被综合指数具体表现为 $T1 > T3 >$

水分的同时,溶于水的无机盐类(如硫酸盐、硝酸盐以及钾、钙、镁等离子)也随水分被根系吸收,使得电导率值升高^[22]。相关研究发现,土壤含水量下降会降低土壤累积矿化氮量和净矿化速率,使 pH 上升,与施肥的作用相反^[23],这与田冬^[24]等人的研究结果相一致。

种植人工核桃林不管理措施下土壤有机碳、全氮、全磷、全钾等养分含量较高,而清除林下灌草并施肥土壤养分含量较低,主要是因为种植核桃林使植物种增加,凋落物及细根分解会增加土壤中有机碳、全氮、全磷等土壤养分含量^[25-26],在定期清理灌草及施肥后,核桃林下灌草植被、凋落物减少,细根消亡,坡面土壤抗雨水冲刷能力的下降,造成土壤侵蚀和养分流失,这与辽东山区^[27]间伐人工林能显著降低土壤养分元素含量的研究结果基本一致。

在植物多样性方面,本研究发现种植人工核桃林并清除灌草的林下植物 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数较高,Simpson 优势度指数较低,但不同管理措施对 Pielou 均匀度指数无较大影响。原因可能是林下除草侧重考虑林下植被高度,大部分清除的是灌木植物,反而提高了林下草本植物的高度和密度^[28]。

3.2 植物多样性与土壤有机碳、全氮之间相关性显著

在生态系统恢复过程中,植被的生长和分布会对土壤环境产生显著影响,而土壤环境的改变又会引起植被的特异性改变,进而影响植被的分布和结构^[29]。针对土壤与植物的相互关系,众多研究表明土壤水分、营养元素等与植物多样性具有显著相关性^[11, 30-31]。本研究中,植被和土壤因子的相关性主要体现在植物多样性特征与土壤有机碳、全氮之间。土壤有机碳、全氮含量增加会显著提高植被优势度,但会降低植物多样性、丰富度和均匀度,这是因为土壤有机碳和全氮可以影响土壤的潜在肥力,对植物的生长发育影响很大,而植物也能通过残体分解等方式对土壤有机碳和全氮进行补给,因此它们相互间较易建立相互联系,多数研究也得出了相似的结论^[32-33]。本研究中,土壤全磷、全钾与植物多样性之间不存在显著相关,这与濮阳雪华^[34]等人的研究结果相一致,但杨青青^[35]等研究发现土壤钾对林下植物多样性有显著影响,出现不同结果的原因可能与地上植被类型和植被-土壤系统的耦合发展状态有关^[11]。有学者研究发现,植物多样性并不是一直受到水分条件的直接影响,这与本研究结果较一致,可能是因为林下植物对环境产生抗逆性,是生态适应性的结果^[36-37]。

3.3 人工核桃林下定期清除灌草的植被-土壤耦合协调关系较好

太行山坡地不同管理措施下植被-土壤系统耦合协调关系存在差异,总体处于失调发展模式,涵盖从严重失调到轻度失调 3 种类型。本研究发现,种植核桃林的耦合协调度均高于未管理的原生灌草地,这与王皓月等^[3]发现种植人工林能改善植被恢复与土壤环境的耦合协调性的研究结果相一致。不同管理措施下植被-土壤系统耦合协调状况较好的是定期清除林下灌草的人工核桃林,属于轻度失调发展模式植被滞后发展型,因林下定期除株高 $\geq 20-30$ cm 灌草植物,导致植被状况相对较差,林下植被减少,对土壤水分、养分需求减少,土壤发展状况优于植被发展状况。在未管理的核桃林区土壤状况相对较差,主要原因是该区域属于丘陵坡地,土壤环境本底贫瘠,种植核桃林后未进行任何管理,核桃树长势较差,多数与灌木、高草高度类似,加速了土壤水分的消耗,削弱了土壤养分的更新能力,导致土壤系统综合得分较低。

4 结论

(1) 不同管理措施下土壤理化性质和植物多样性特征差异显著。不管理人工核桃林草样地的土壤含水率较低,电导率和 pH 较高,土壤有机碳、全氮、全磷等养分含量较高;定期除草不施肥的人工核桃林草样地的土壤含水率较高;定期除草并施肥的人工核桃林草样地的土壤 pH 较低。在植物多样性方面,定期除草不施肥的人工核桃林草样地的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数较高,Simpson 优势度指数较低,但不同管理措施下 Pielou 均匀度指数无显著差异。

(2) 植被和土壤因子的相关性主要体现在植物多样性特征与土壤有机碳、全氮之间。土壤有机碳与

Simpson 优势度指数呈显著正相关,与 Shannon-Wiener 多样性、Pielou 均匀度、Margalef 丰富度指数呈显著负相关,土壤全氮与 Shannon-Wiener 多样性和 Margalef 丰富度指数呈显著负相关,土壤系统其他因子则与植物多样性无显著相关性。

(3)不同管理措施下植被-土壤系统耦合协调总体处于失调发展模式,涵盖从严重失调到轻度失调 3 种类型,原生灌草样地为严重失调发展模式植被-土壤同步发展型,不管理的人工核桃林草地及定期除草并施肥的人工核桃林草地同属于中度失调发展模式土壤滞后发展型,定期除草不施肥的人工核桃林草样地的植被-土壤系统耦合协调状况最好,属于轻度失调发展模式植被滞后发展型。

参考文献(References):

- [1] 崔宁洁,张丹桔,刘洋,张健,欧江,张捷,邓超,纪托未.不同林龄马尾松人工林林下植物多样性与土壤理化性质.生态学杂志,2014,33(10):2610-2617.
- [2] Wan J Z, Yu J H, Yin G J, Song Z M, Wei D X, Wang C J. Effects of soil properties on the spatial distribution of forest vegetation across China. *Global Ecology and Conservation*, 2019, 18: e00635.
- [3] 王皓月,郭月峰,徐雅洁,祁伟,卜繁靖,祁慧娟.九峰山不同林分类型生态恢复植被-土壤系统耦合关系评价.生态环境学报,2021,30(12):2309-2316.
- [4] Wang B W, Zhang G H, Duan J. Relationship between topography and the distribution of understory vegetation in a *Pinus massoniana* forest in Southern China. *International Soil and Water Conservation Research*, 2015, 3(4): 291-304.
- [5] Nie X D, Guo W, Huang B, Zhuo M N, Li D Q, Li Z W, Yuan Z J. Effects of soil properties, topography and landform on the understory biomass of a pine forest in a subtropical hilly region. *CATENA*, 2019, 176: 104-111.
- [6] 刘根华,查轩,周文芳,白永会,康佩佩,王庚,黄少燕.严重侵蚀退化马尾松林地植被恢复土壤养分的制约性因子.水土保持通报,2016,36(5):34-39.
- [7] 张劲峰,宋洪涛,耿云芬,周鸿.滇西北亚高山不同退化林地植被与土壤养分特征.生态学杂志,2008,27(7):1064-1070.
- [8] 唐国勇,高成杰,李昆.植被恢复对干热河谷退化土壤改良的影响.生态学报,2015,35(15):5157-5167.
- [9] 白一茹,阮晓晗,包维斌,王幼奇,夏子书,杨帆.宁南山区坡面不同土地利用方式下植被-土壤耦合关系评价.水土保持研究,2021,28(4):251-258.
- [10] 徐明,张健,刘国彬,邱甜甜,郑明清.不同植被恢复模式沟谷地植被-土壤系统耦合关系评价.自然资源学报,2016,31(12):2137-2146.
- [11] 李豪,卢纪元,魏天兴,朱清科.陕北黄土高原不同微地形下植被-土壤系统耦合特征研究.四川农业大学学报,2019,37(2):192-198,214.
- [12] 南国卫,赵满兴,王月月,荣华倩,戴丽莎.不同退耕类型土壤-植被系统耦合协调关系评价.干旱区资源与环境,2021,35(5):157-162.
- [13] 黄鑫龙,孟艳琼,傅松玲,黄勃,吴志辉,戴超,王哲.不同人工植被恢复模式对山核桃林地土壤理化性质的影响.中国农学通报,2014,30(22):64-68.
- [14] 刘洋,侯占山,赵爽,齐国辉,张雪梅,郭素萍.太行山片麻岩山区造地边坡植被恢复过程中植物多样性与土壤特性的演变.生态学报,2018,38(15):5331-5339.
- [15] 李裕元,邵明安.子午岭植被自然恢复过程中植物多样性的变化.生态学报,2004,24(2):252-260.
- [16] 齐丹卉,杨洪晓,卢琦,褚建民,袁祺,甘红豪,赵帅,陈加伟,徐晓庆.浑善达克沙地植物群落物种多样性及环境解释.中国沙漠,2021,41(6):65-77.
- [17] 白晓航,张金屯,曹科,王云泉,Shrishi Sadia,曹格.小五台山亚高山草甸的群落特征及物种多样性.草业科学,2016,33(12):2533-2543.
- [18] 曾歌花,张万军,宋以刚,璩芳,赵昕.河北太行山低山丘陵区植被恢复过程中物种多样性与土壤养分变化.生态学杂志,2013,32(4):852-858.
- [19] 王巧环,任玉芬,孟龄,李虹,傅慧敏,王华锋.元素分析仪同时测定土壤中全氮和有机碳.分析实验室,2013,32(10):41-45.
- [20] 彭晚霞,宋同清,曾隼平,王克林,杜虎,鹿士杨.喀斯特峰丛洼地退耕还林还草工程的植被土壤耦合协调度模型.农业工程学报,2011,27(9):305-310.
- [21] 赵云鹏,白一茹,陆学娥,张兴,包维斌,王幼奇.宁夏不同种植年限下晒砂瓜土壤干燥化效应研究.水土保持研究,2019,26(1):273-279.
- [22] 李铸,文勇立,张云,艾翳,泽让东科.若尔盖盆地不同退化阶段草甸土壤含水率、pH 及电导率的变化.生态环境学报,2016,25(5):

752-759.

- [23] 胡冬雪. 氮素调控对羊草生产性能、品质及土壤理化性质的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2017.
- [24] 田冬, 高明, 徐畅. 土壤水分和氮添加对3种质地紫色土氮矿化及土壤pH的影响. 水土保持学报, 2016, 30(1): 255-261.
- [25] 彭晓, 方晰, 喻林华, 项文化, 黄志宏. 中亚热带4种森林土壤碳、氮、磷化学计量特征. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(11): 65-72.
- [26] 刘倩, 郑翔, 邓邦良, 郑利亚, 黄立君, 王书丽, 张令, 郭晓敏. 武功山草甸不同海拔对土壤和植物凋落物磷含量的影响. 草业科学, 2017, 34(11): 2183-2190.
- [27] 张景普, 于立忠, 刘利芳, 张金鑫, 高尚林, 张文儒, 刘成宇. 不同作业方式对落叶松人工林土壤养分及酶活性的影响. 生态学杂志, 2016, 35(6): 1403-1410.
- [28] 高承芳, 张晓佩, 李兆龙. 放牧对土壤理化性状及植被多样性的影响. 中国农学通报, 2020, 36(8): 98-104.
- [29] Ehrenfeld J G, Ravit B, Elgersma K. Feedback in the plant-soil system. Annual Review of Environment and Resources, 2005, 30: 75-115.
- [30] Cortois R, Schröder G T. Ecology Research; Researchers from Institute of Ecology Describe Findings in Ecology Research (Plant-soil feedbacks: role of plant functional group and plant traits). Ecology Environment & Conservation, 2016, 104(6): 1608-1617.
- [31] 梁香寒, 张克斌, 乔夏. 半干旱黄土区柠条林土壤水分和养分与群落多样性关系. 生态环境学报, 2019, 28(9): 1748-1756.
- [32] 焦菊英, 马祥华, 白文娟, 焦峰, 温仲明. 黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落与土壤环境因子的对应分析. 土壤学报, 2005, 42(5): 744-752.
- [33] Ge J M, Wang S, Fan J, Gongadze K, Wu L H. Soil nutrients of different land-use types and topographic positions in the water-wind erosion crisscross region of China's Loess Plateau. CATENA, 2020, 184: 104243.
- [34] 濮阳雪华, 王月玲, 赵志杰, 黄娟, 杨宇. 陕北黄土区不同植被恢复模式植被与土壤耦合关系研究. 草业学报, 2021, 30(5): 13-24.
- [35] 杨青青, 杨众养, 薛杨, 陈小花, 余雪标, 崔喜博, 李然, 高刘. 海南文昌滨海台地不同森林林下灌草多样性及其与土壤因子关联分析. 热带作物学报, 2015, 36(12): 2238-2244.
- [36] Darrouzet-Nardi A, Steltzer H, Sullivan P F, Segal A, Koltz A M, Livensperger C, Schimel J P, Weintraub M N. Limited effects of early snowmelt on plants, decomposers, and soil nutrients in Arctic tundra soils. Ecology and Evolution, 2019, 9(4): 1820-1844.
- [37] Sardans J, Bartrons M, Margalef O, Gargallo-Garriga A, Janssens I A, Ciais P, Obersteiner M, Sigurdsson B D, Chen H Y H, Peñuelas J. Plant invasion is associated with higher plant-soil nutrient concentrations in nutrient-poor environments. Global Change Biology, 2017, 23(3): 1282-1291.