网络出版时间:2026-01-09 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.07.005

间伐强度对林下植物多样性和土壤性质的动态影响

王俊哲[1],陈文举[1],刘蓝鑫[2],王艳秋[1],郅宇超[1],王得祥[1]
(1 西北农林科技大学 林学院,陕西 杨凌 712100;2 赣州市林业局,江西 赣州 341000)

[摘 要] 【目的】探究不同间伐强度对林下植物多样性和土壤性质的动态影响,为森林的有效管理以及森林生物多样性保护提供科学依据。【方法】在秦岭次生林群落中设置5种间伐强度(未间伐、15%间伐强度、30%间伐强度、45%间伐强度和60%间伐强度),比较间伐前后3个时期(间伐前、间伐4年后和8年后)不同间伐强度下林下植物多样性和土壤性质的动态变化,并分析了植物多样性与土壤性质的相关性。【结果】①不同间伐强度下,灌木层和草本层的物种丰富度在间伐4年后总体达到最大值;相较于其他间伐处理,60%间伐强度处理间伐后的物种丰富度增幅较间伐前大。与间伐前相比,间伐4和8年后秦岭次生林林下灌木层和草本层的优势物种发生了明显变化。②除间伐8年后草本的Margalef丰富度指数外,3个时期不同间伐强度之间灌木和草本的4个多样性指标(Margalef丰富度指数、Simpson优势度指数、Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数)均无显著差异($P>0.05$)。③在0~20 cm土层,土壤有机碳、总氮、总磷、速效氮和速效磷含量在间伐4年后总体下降,在间伐8年后总体上升。④草本Margalef丰富度指数、Simpson优势度指数和Shannon-Wiener多样性指数均与土壤C∶N呈显著或极显著正相关。【结论】间伐后短期内(间伐4年后)林下植物种类数量有所提高,对植物多样性有正向影响;而间伐8年后,植物种类数量虽有所下降,但土壤养分有所恢复。其中60%间伐强度对林下植物种类数量的提高以及土壤养分恢复的影响更加明显。

[关键词] 间伐强度;林下植物多样性;土壤化学计量比;秦岭次生林
[中图分类号] S753.7+5 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)07-0034-12

Dynamic effects of thinning intensities on understory vegetation diversity and soil properties

WANG Junzhe[1], CHEN Wenju[1], LIU Lanxin[2], WANG Yanqiu[1],
ZHI Yuchao[1], WANG Dexiang[1]
(1 *College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*;
2 *Ganzhou Forestry Bureau, Ganzhou, Jiangxi* 341000, *China*)

Abstract: 【Objective】 This research aims to investigate the dynamic effects of different thinning intensities on understory vegetation diversity and soil properties, to provide a scientific basis for the effective management of forests and the conservation of forest biodiversity. 【Method】 In this study, five thinning intensities (no thinning, thinning intensity of 15%, 30%, 45% and 60%) were conducted in secondary forest communities in the Qinling Mountains to observe the dynamic changes in understory vegetation diversity and soil properties at three thinning periods (before thinning, 4 years after thinning, and 8 years after thinning), and to analyze the correlation between understory vegetation diversity and soil properties. 【Result】 ① Under different thinning intensities,

[收稿日期] 2025-05-09 [修回日期] 2025-07-15
[基金项目] 国家自然科学基金项目(32271861);陕西林业科技创新重点专项(SXLK2023-02-2);陕西秦岭北麓主体山水林田湖草沙一体化保护和修复工程项目(2203-610100-04-05-321562)
[作者简介] 王俊哲(2001—),女,河南许昌人,在读硕士,主要从事秦岭森林生态系统碳储量相关影响因素研究。E-mail:wjunzhe2001@163.com
[通信作者] 王得祥(1966—),男,青海海东人,教授,博士生导师,主要从事森林群落及其结构调控和森林健康经营研究。E-mail:wangdx66@126.com

the highest species richness of the shrub layer and herb layer was observed 4 years after thinning. Compared with other thinning treatments, the 60% thinning treatment showed the highest increment in species richness after thinning. The dominant species in the shrub and herb layers of the Qinling secondary forest changed significantly 4 and 8 years after thinning, compared with those before thinning. ② Except for the Margalef richness index of herb plants 8 years after thinning, there were no significant differences in the four diversity indices (Margalef richness index, Simpson dominance index, Shannon-Wiener diversity index, and Pielou evenness index) of shrub and plant plants among different thinning intensities at three thinning periods ($P>0.05$). ③ In the 0－20 cm soil layer, soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, available nitrogen, and available phosphorus content generally decreased 4 years after thinning and generally increased 8 years after thinning. ④ The Margalef richness index, Simpson dominance index, and Shannon-Wiener diversity index of herb plants were significantly or extremely significantly positively correlated with soil C∶N.【Conclusion】In the short term after thinning (4 years after thinning), the number of understory vegetation species increased, indicating a positive impact on vegetation diversity. However, a recovery in soil nutrient level was observed 8 years after thinning, although the number of vegetation species decreased, with the 60% thinning intensity showing a more pronounced effect on increasing the number of understory vegetation species and restoring soil nutrients.

Key words: thinning intensity; understory vegetation diversity; soil stoichiometric ratio; secondary forests of Qinling Mountains

间伐作为一项重要的森林管理措施，在优化林分结构、保护森林生物多样性、改善林分生长环境、维持生态功能、提高生态效益方面发挥着至关重要的作用[1-2]。间伐可以通过降低冠层郁闭度和改变森林小气候参数（光照、土壤水分和速效养分），直接或间接影响林下植被多样性，进而影响土壤养分循环[3-4]。

林下植物和土壤是森林生态系统的重要组成部分，其变化与间伐强度和间伐时间等密切相关[1,3]。研究发现，间伐1～2年后，林下灌木和草本植物多样性会增加，尤其是喜光植物[5-6]；徐雪蕾等[4]发现，间伐3年后，杉木（*Cunninghamia lanceolata*）人工林林下植被生物多样性、盖度和生物量均增加；有研究发现[7]，间伐6年后，不同间伐强度下油松（*Pinus tabulaeformis*）林林下植物多样性指数、均匀度指数均低于间伐后1和2年；DANG等[8]发现，间伐11年后，黄土高原油松人工林林下植物多样性有所提高；但也有研究指出，间伐12年后，间伐样地和未间伐样地的树种组成、林下植物多样性并无显著变化（$P>0.05$）[9]。可见，在间伐后短期内，林下植物多样性通常呈现上升趋势，植物种类更加丰富，林分生活型层次更加复杂[1]。但关于间伐对林下植物多样性的长期影响，目前尚无明确结论，还需进一步在时间尺度上开展深入的动态研究。

森林间伐后，土壤性质也会产生相应的变化[10-12]。王宏星等[2]发现，间伐1年后，与对照组相比，45%间伐强度可显著提高土壤有效养分含量，增加土壤多功能性。研究表明，间伐3年后，间伐会提高土壤养分含量[4]；但也有些研究表明，间伐后土壤养分会在短时间内流失，土壤有机碳（SOC）、总氮（TN）、总磷（TP）含量降低[10]。冯淑琴[11]发现，间伐8年后，马尾松（*Pinus massoniana*）人工林土壤全磷、全氮、速效钾、有机质、速效磷和水解氮含量提高，其中30%间伐强度的马尾松林土壤结构和肥力状况最优；HEDO等[12]发现，间伐12年后，间伐措施对土壤有机碳、总氮、pH值和碳氮比等理化性质均无显著影响。由此可见，在间伐后短期内，土壤养分含量呈增加或减少趋势；而随着时间的推移，土壤养分含量增加或无显著变化。尽管诸多学者已经研究了不同间伐强度对林下植物和土壤的影响，但大多数研究主要集中在间伐后的某个时期，而缺乏间伐后动态监测的相关研究。

秦岭地处暖温带和亚热带之间的过渡地区，是中国植物物种最丰富的地区之一。在20世纪60年代和70年代，秦岭地区的森林遭受过度砍伐，形成多种天然次生林[13]。近几十年来，受益于“天然林保护计划”，秦岭次生林地区逐渐恢复，然而，这些次生林往往结构单一，其中大多是低质、低效的林分，生态系统稳定性也相对较差[14]。为提高林分质量，维持生态系统的稳定性，间伐已被作为该区域一种重要且常见的森林培育和经营管理手段。一些研究已经分析了秦岭次生混交林林下植被和土

壤性质的差异[15]。然而,其研究更多聚焦于间伐后某一特定时期或单一土层,对于不同间伐强度下林下灌草多样性和不同土层土壤性质的影响及其动态变化仍是研究的薄弱环节。因此,本研究探讨了5种间伐强度下以及间伐前后3个不同时期下秦岭次生林林下植物多样性和3个土层土壤养分的动态变化,评估植物多样性的动态变化,探究林下植被多样性与土壤养分之间的关系,明确森林管理的最佳间伐强度,以期为合理的森林管理和森林质量精准提升提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省宁陕县火地塘林场(33°25′—33°29′N,108°25′—108°30′E),地处秦岭南坡。该林场占地面积22 km^2,森林覆盖率为96.8%,海拔1 420~2 474 m。研究区域为亚热带湿润山地气候,年平均气温8~10 ℃,年均降水量900~1 200 mm,年均无霜期为170 d。土壤类型主要为棕壤、黄棕壤、暗棕壤,平均厚度约50 cm。植被类型主要为针阔混交林。研究区域林木资源丰富,共有524种,以华山松(*Pinus armandii*)、锐齿槲栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)、油松(*P. tabuliformis*)、铁杉(*Tsuga chinensis*)和红桦(*Betula albosinensis*)为主。由于20世纪过度砍伐,该地区的主要森林植被为天然次生林。

1.2 试验设计

通过对秦岭火地塘林区15林班次生林的综合调查,于2013年综合抚育后按其林分蓄积量计算出各林分对应的间伐强度,按照随机区组的方式,在15林班的次生林中设置20个样地(5个处理×4个重复)(表1)。

表1 不同间伐强度下秦岭次生林样地的基本情况(间伐前)

Table 1 Basic information of secondary forest plots in the Qinling Mountains under different thinning intensities (Before thinning)

处理 Treatment	样地 Plot	海拔/m Elevation	坡向 Aspect	坡度/(°) Slope	蓄积量/(m^3·hm^{-2}) Volume	胸径/cm DBH	树高/m Tree height	密度/(株·hm^{-2}) Density
CK	1	2 121	WS 12°	18	22.94	15.39	12.69	1 575
	2	2 039	WS 17°	18	27.87	17.62	15.83	1 400
	3	1 908	WS 17°	20	24.80	16.23	12.86	1 275
	4	2 134	WS 15°	19	20.79	20.36	15.21	1 325
T_1	1	1 957	WS 08°	18	20.45	15.43	13.64	900
	2	2 088	NE 20°	24	18.07	16.23	13.13	1 150
	3	2 169	WS 12°	19	18.80	21.56	15.37	1 150
	4	1 994	WN 3°	19	17.26	22.27	15.75	625
T_2	1	1 985	WS 11°	19	13.63	16.37	12.27	825
	2	2 082	NE 47°	20	12.81	17.00	14.33	675
	3	2 097	WS 12°	18	16.49	18.69	14.63	850
	4	1 966	WN 17°	18	13.48	20.85	14.28	525
T_3	1	2 122	WS 08°	15	9.73	16.37	12.70	575
	2	1 963	WS 11°	18	10.08	17.25	13.12	575
	3	2 063	WS 08°	17	11.38	15.14	11.56	750
	4	2 082	NE 57°	23	10.22	16.3	14.02	650
T_4	1	2 097	WS 18°	19	8.95	16.53	11.67	525
	2	2 002	WN 08°	27	6.64	19.00	13.20	350
	3	2 045	WS 11°	24	13.80	15.71	12.45	825
	4	2 021	WS 12°	18	10.38	16.32	11.96	625

注:CK. 未间伐;T_1. 15%间伐强度;T_2. 30%间伐强度;T_3. 45%间伐强度;T_4. 60%间伐强度。WS. 西南方向;NE. 东北方向;WN. 西北方向。下同。

Note: CK. No thinning; T_1. 15% thinning intensity; T_2. 30% thinning intensity; T_3. 45% thinning intensity; T_4. 60% thinning intensity. WS. Southwest direction; NE. Northeast direction; WN. Northwest direction. The same below.

5个处理分别包括未间伐(对照组,CK)、15%间伐强度(采伐15%的林分蓄积量,T_1)、30%间伐强度(采伐30%的林分蓄积量,T_2)、45%间伐强度(采伐45%的林分蓄积量,T_3)和60%间伐强度(采伐60%的林分蓄积量,T_4),每个样地的面积为20 m×20 m,样地周围设置宽度为5 m的缓冲区,以避免潜在的边缘效应。沿每个样地的对角线建立5个灌木样方(4 m×4 m)和5个草本样方(2 m×2 m),用于调查林下植物丰富度和重要值。

1.3 植物调查与土样采集

本研究分别于2013年(间伐前)、2017年(间伐4年后)、2021年(间伐8年后)的6—9月进行森林植

被调查。记录沿对角线的5个灌木样方和5个草本样方的物种名称、高度、丰度和盖度，计算灌木和草本植物多样性指数。

在进行森林植被调查的同时采集土样。在每个样地上，清除表层凋落物后采用“S”形取样法，用土钻（内径4 cm、高度20 cm）采集0～20，20～40和40～60 cm土层土样，共采集60个土样（5个处理×4个重复×3个土层）。将土样放入标好标签的塑料袋中，去除杂质（石头、植物凋落物和根）后，分别用1和0.15 mm网筛快速筛分，然后风干用于化学性质分析。

1.4　土壤化学性质测定

土壤有机碳（SOC）含量采用K_2CrO_7容量和外加热法测定；总氮（TN）含量采用Kjeldahl法测定；总磷（TP）含量用H_2SO_4-H_2O_2消解后采用钼锑比色法测定；速效磷（AP）含量采用0.5 mol/L碳酸氢钠提取法测定；速效氮（AN）含量采用碱解扩散法测定。

1.5　数据处理与分析

本研究对林下物种多样性进行了分析，具体指标有Margalef丰富度指数、Simpson优势度指数、Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数以及重要值，上述指标的计算参考刘蓝鑫[16]在秦岭天然次生林中的研究方法。

本研究中的数据以“平均值±标准误差”表示。原始数据用Excel 2016初步处理。使用SPSS 23.0软件（IBM Co.，Armonk，NY，USA）做进一步的统计分析。在5%显著性水平下采用单因素方差分析（ANOVA）和Duncan’s多重范围检验（DMRT）以及双因素方差分析（Two-way ANOVA），分析不同间伐强度和间伐时期对林下植物多样性指数和土壤性质的影响。使用Origin 2021绘制柱状图和相关性热图（采用Pearson’s相关分析，$P<0.05$）。

2　结果与分析

2.1　间伐强度对秦岭次生林林下物种组成及重要值的影响

间伐强度对秦岭次生林林下物种组成及重要值的影响见表2～表4。

表2　不同间伐强度下秦岭次生林林下灌木和草本植物的丰富度

Table 2　Richness of understory shrub and herb plants in secondary forests of the Qinling Mountains under different thinning intensities

林下植被 Understory vegetation	时期 Years	CK	T_1	T_2	T_3	T_4
灌木 Shrub	Y1	20	24	22	19	19
	Y4	27	31	27	26	30
	Y8	17	20	16	20	25
草本 Herb	Y1	23	21	25	24	13
	Y4	33	36	36	34	32
	Y8	30	31	28	31	34

注：Y1. 2013年（间伐前）；Y4. 2017年（间伐4年后）；Y8. 2021年（间伐8年后）。下同。

Note：Y1. The year 2013（before thinning）；Y4. The year 2017（4 years after thinning）；Y8. The year 2021（8 years after thinning）. The same below.

表3　不同间伐强度下秦岭次生林林下灌木的主要种类及其重要值（排名前5）

Table 3　Species and the important values of understory shrub plants（Top 5）in secondary forests of the Qinling Mountains under different thinning intensities　%

物种 Species	Y1					Y4					Y8				
	CK	T_1	T_2	T_3	T_4	CK	T_1	T_2	T_3	T_4	CK	T_1	T_2	T_3	T_4
S1	17.4	7.6													
S2	16.4		20.5	21.8	14.2	32.1	20.9	30.0	32.6	21.2	30.6	21.6	32.9	34.3	18.0
S3	15.2	21.0	15.3	15.6	25.1	10.0	9.3	11.9	5.1	7.5					
S4	11.3	12.4	12.6	13.4	11.9	6.8	8.0	5.1			5.1	8.9	9.1	5.4	8.1
S5	6.6														
S6		9.5	14.2	14.2	11.9	4.1	6.6	9.0	4.8						
S7									5.3	5.9					
S8													6.6		
S9											4.5			4.3	
S10		9.5			10.9										

表3(续) Table 3(continued) %

物种 Species	Y1					Y4					Y8				
	CK	T_1	T_2	T_3	T_4	CK	T_1	T_2	T_3	T_4	CK	T_1	T_2	T_3	T_4
S11			6.3	6.7		15.2	18.4	15.5	13.1	16.8	19.3	18.4	18.1	20.7	19.0
S12										5.0					
S13											15.0		13.2		
S14												7.1			
S15															7.4
S16														6.9	9.1
S17												6.9			

注:S1. 秦岭箭竹;S2. 华中五味子;S3. 菝葜;S4. 卫矛;S5. 秀丽莓;S6. 南蛇藤;S7. 弓茎悬钩子;S8. 峨眉蔷薇;S9. 钝叶蔷薇;S10. 藤山柳;S11. 桦叶荚蒾;S12. 喜阴悬钩子;S13. 托柄菝葜;S14. 棣棠花;S15. 栒子;S16. 悬钩子;S17. 苦糖果。

Note: S1. *Fargesia qinlingensis*; S2. *Schisandra sphenanthera*; S3. *Smilax china*; S4. *Euonymus alatus*; S5. *Rubus amabilis*; S6. *Celastrus orbiculatus*; S7. *Rubus flosculosus*; S8. *Rosa omeiensis*; S9. *Rosa sertata*; S10. *Clematoclethra scandens*; S11. *Viburnum betulifolium*; S12. *Rubus mesogaeus*; S3. *Smilax discotis*; S14. *Kerria japonica*; S15. *Cotoneaster hissaricus*; S16. *Rubus fockeanus*; S17. *Lonicera fragrantissima*.

表4 不同间伐强度下秦岭次生林林下草本植物的主要种类及其重要值(排名前5)

Table 4 Species and the important values of understory herb plants (Top 5) in secondary forests of the Qinling Mountains under different thinning intensities %

物种 Species	Y1					Y4					Y8				
	CK	T_1	T_2	T_3	T_4	CK	T_1	T_2	T_3	T_4	CK	T_1	T_2	T_3	T_4
H1	38.9	30.3	31.3	40.7	53.8	14.8	20.8	17.7	18.8	21.2	27.9	21.2	31.8	23.8	24.0
H2	16.3	16.5	15.1	10.1	8.3	9.0	6.8	12.7	6.4		4.3				
H3	6.6	7.1	8.6	6.2	8.7	7.1	6.8	5.3		9.0					3.5
H4	5.7	13.1		6.7	5.3										
H5	4.7													4.1	
H6						10.9						4.2			
H7		5.4	5.0									3.8			
H8				6.5											
H9			5.5		6.0										
H10						11.6		12.4	13.9	12.4					
H11							7.7		6.0	9.0					
H12							4.9		7.6	11.6	15.5	17.4	18.2	26.0	27.2
H13								6.6							
H14											5.7				3.0
H15											4.2			3.6	
H16												4.5			
H17															5.7
H18													4.6		
H19													4.1		
H20													3.7	4.4	

注:H1. 白颖薹草;H2. 单叶细辛;H3. 双蝴蝶;H4. 光叶粉花绣线菊;H5. 酢浆草;H6. 过路黄;H7. 活血丹;H8. 雀舌草;H9. 褐鞘毛茛;H10. 中华荚果蕨;H11. 灰叶堇菜;H12. 中华蹄盖蕨;H13. 水毛茛;H14. 小窃衣;H15. 落新妇;H16. 双花堇菜;H17. 勾儿茶;H18. 三脉紫菀;H19. 耧斗菜;H20. 老鹳草。

Note: H1. *Carex duriuscula*; H2. *Asarum himalaicum*; H3. *Tripterospermum chinense*; H4. *Spiraea japonica*; H5. *Oxalis corniculata*; H6. *Lysimachia christiniae*; H7. *Glechoma longituba*; H8. *Stellaria alsine*; H9. *Ranunculus sinovaginatus*; H10. *Pentarhizidium intermedium*; H11. *Viola delavayi*; H12. *Athyrium sinense*; H13. *Batrachium bungei*; H14. *Torilis japonica*; H15. *Astilbe chinensis*; H16. *Viola biflora*; H17. *Berchemia sinica*; H18. *Aster trinervius*; H19. *Aquilegia viridiflora*; H20. *Geranium wilfordii*.

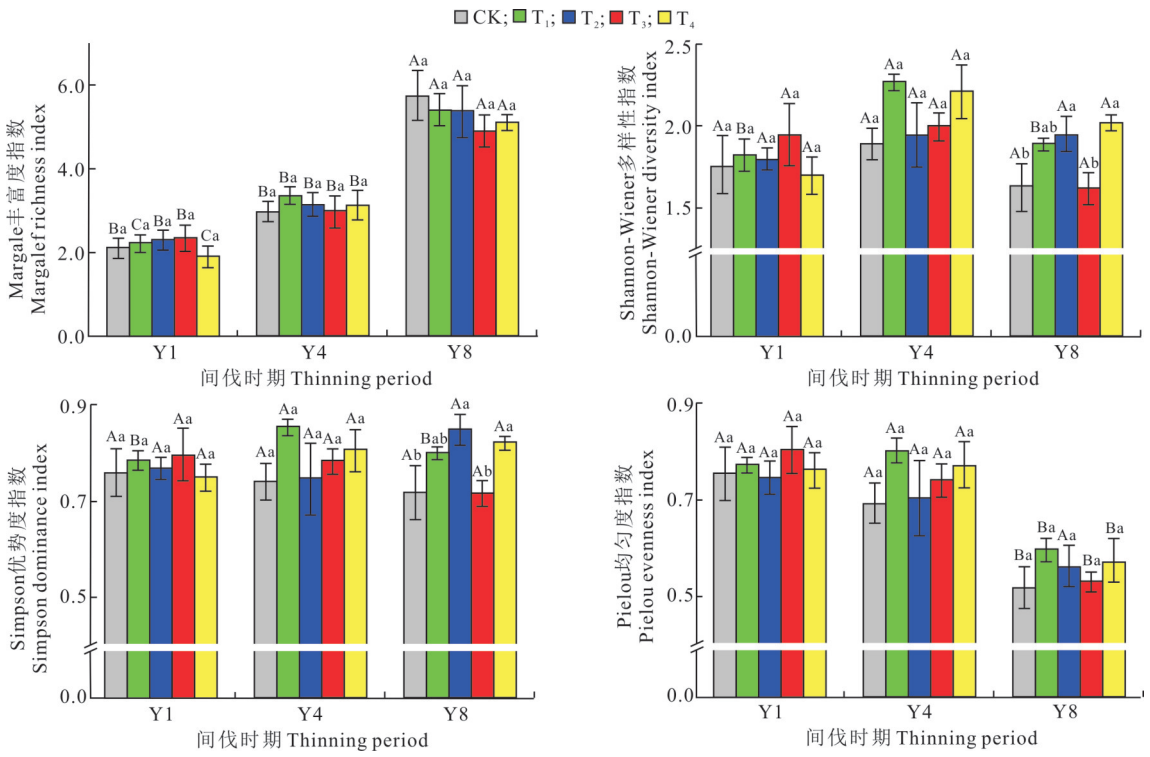
从表2和表3可以看出,与间伐前相比,灌木层物种丰富度在间伐4年后均呈上升趋势,而在间伐8年后则呈下降趋势。间伐4和8年后,60%间伐强度下灌木层的物种丰富度增长幅度最大,较间伐前分别增加了57.9%和31.6%。间伐前灌木优势种为菝葜、华中五味子和卫矛等。间伐4年后,华中五味子、桦叶荚蒾在灌木植物中占有优势地位。除这2种灌木植物外,在各间伐强度下重要值排名前5的灌木植物还有菝葜,对照组和15%,30%,45%,60%间伐强度下以上3种优势灌木的重要值之和分别为57.3%,48.6%,57.4%,50.8%,45.5%。由此可知,相比对照组,除30%间伐强度处理外,其他

间伐强度会削弱这3种灌木植物重要值之和的贡献度。间伐8年后，灌木植物的优势种为华中五味子、桦叶荚蒾、卫矛等。

从表2和表4还可以看出，除60%间伐强度外，其他处理草本层物种丰富度在间伐4年后达到最高。与间伐前相比，间伐4年后60%间伐强度下草本物种数量增长幅度最高(146.2%)，其次为15%间伐强度(71.4%)和对照组(43.5%)。与间伐前相比，间伐8年后，60%间伐强度下物种丰富度增长率依然最高，物种丰富度也最高。间伐前草本植物的优势种为白颖薹草、单叶细辛、双蝴蝶等。间伐4年后，白颖薹草仍为第一优势种，但其重要值普遍下降。间伐8年后，白颖薹草与中华蹄盖蕨为草本植物主要优势种，对照组，15%，30%，45%和60%间伐强度下二者重要值之和分别为43.4%，38.6%，50.0%，49.9%，51.2%。间伐8年后，与对照组(15.5%)相比，中华蹄盖蕨的重要值随间伐强度增大明显提升，15%，30%，45%和60%间伐强度下的重要值分别为17.4%，18.2%，26.0%，27.2%，其中，60%间伐强度下中华蹄盖蕨的重要值首次超越白颖薹草(24.0%)。

2.2　间伐强度对秦岭次生林林下植被多样性的影响

2.2.1　*灌木层物种多样性及其动态变化*　图1显示，间伐4年后，5个处理间的4个多样性指标(Margalef丰富度指数、Simpson优势度指数、Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数)均无显著差异($P>0.05$)。间伐8年后，各处理间的Margalef丰富度指数虽无显著差异，但均显著高于间伐前($P<0.05$)，其中60%间伐强度的Margalef丰富度指数增幅最大(166.0%)。相反，间伐8年后各处理的Pielou均匀度指数均显著低于间伐前，其中60%间伐强度下降幅度最大(25.1%)。



图柱上标不同大写字母表示同一间伐处理的3个时期之间差异显著($P<0.05$)；不同小写字母表示同一时期不同间伐处理之间差异显著($P<0.05$)。下同。

The different uppercase letters denote significant differences among the three periods under the same thinning treatment ($P<0.05$); while the lowercase letters show significant differences among the different thinning treatments within the same period ($P<0.05$). The same below.

图1　不同间伐强度对秦岭次生林林下灌木多样性指数的影响

Fig. 1　Effects of different thinning intensities on the diversity index of understory shrubs in secondary forests of the Qinling Mountains

2.2.2　*草本层物种多样性及其动态变化*　图2显示，间伐8年后，所有处理的Margalef丰富度指数均显著高于间伐前和间伐4年后，仅对照组与60%间伐强度间的Margalef丰富度指数存在显著差异($P<0.05$)；相较于间伐前，间伐8年后60%间伐强度下Margale丰富度指数显著增加331.0%，其次为15%间伐强度(178.0%)、45%间伐强度(132.2%)、30%间伐强度(119.6%)和对照组

(117.3%)。同一间伐时期下各处理的 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数均无显著差异。

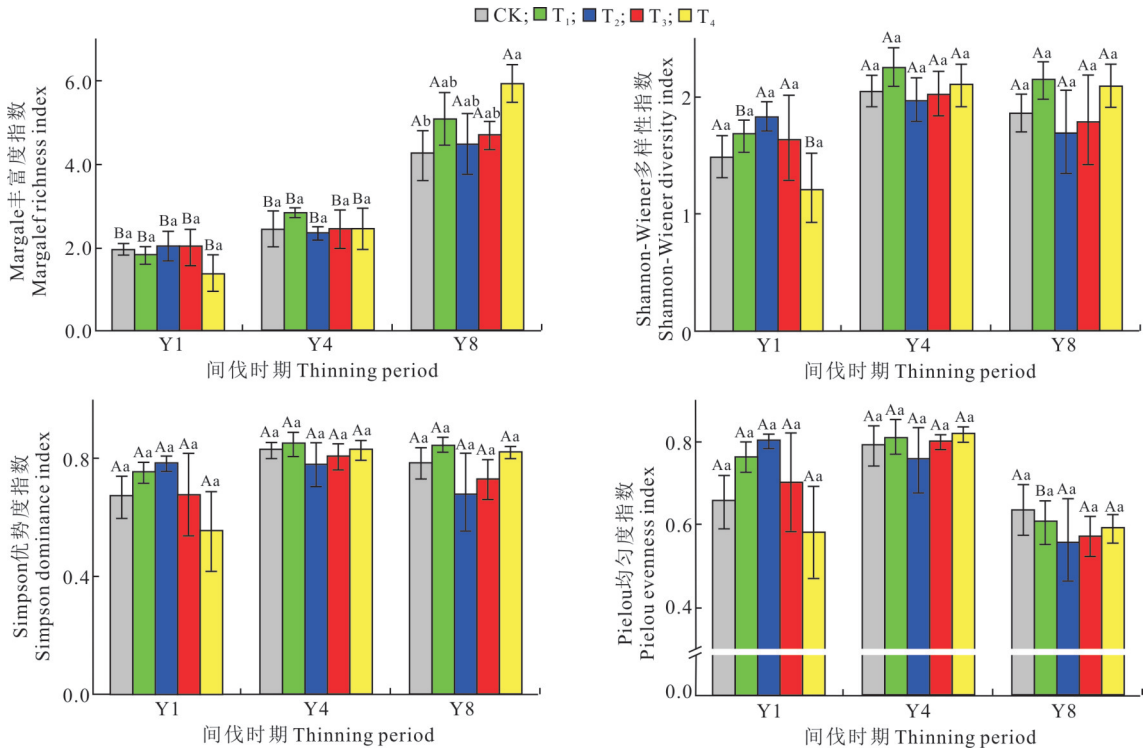


图 2 不同间伐强度对秦岭次生林林下草本植物多样性指数的影响

Fig. 2 Effects of different thinning intensities on the diversity index of understory herbs in secondary forests of the Qinling Mountains

2.3 间伐强度对秦岭次生林土壤养分含量及化学计量比的影响

2.3.1 土壤全量养分含量 不同间伐强度对秦岭次生林土壤全量养分含量的影响如图 3 所示。从图 3 可以看出,间伐前,同一土层各间伐处理间的 SOC、TN、TP 含量均无显著差异。间伐 4 年后,在同一土层,随着间伐强度的增加,SOC、TN 和 TP 含量总体下降;与间伐前相比,30%,45% 和 60% 间伐强度 0~20 cm 土层的 SOC 和 TN 分别显著降低 63.9%,64.9%,69.4% 和 68.7%,60.6%,75.4%($P<0.05$)。间伐 8 年后的 SOC、TN 和 TP 含量与间伐 4 年后相比总体增加,其中 60% 间伐强度 20~40 和 40~60 cm 土层中的 TP 含量分别显著增加了 136.4% 和 263.2%。

2.3.2 土壤速效养分含量 不同间伐强度对秦岭次生林土壤速效磷(AP)和速效氮(AN)含量的影响如图 4 所示。从图 4 可以看出,不同间伐处理对土壤 AP 和 AN 影响不同。在 0~20 cm 土层,所有处理的土壤 AP 含量均随间伐时间的增加总体减少。间伐 4 年后,45% 间伐强度 0~20 和 20~40 cm 土层中的 AP 含量与间伐前相比分别显著减少 58.6% 和 42.4%。随着时间的推移,0~20 cm 土层中所有处理的土壤 AN 含量总体呈上升趋势。间伐 8 年后,60% 间伐强度 0~20 cm 土层的 AN 与间伐前相比显著增加 133.6%,表明高间伐强度可以提高表层土壤 AN 含量。各处理 20~40 和 40~60 cm 土层 AP 和 AN 含量均低于 0~20 cm 土层。

2.3.3 土壤化学计量比 图 5 显示,不同土层土壤化学计量比有不同的变化趋势。在 0~20 cm 土层,间伐前和间伐 8 年后所有处理的土壤化学计量比(C:N、C:P、N:P)均无显著差异。间伐 4 年后,所有土层的 C:N 随时间的增加总体呈上升趋势。间伐 8 年后,所有土层的 N:P 表现为 45% 间伐强度>30% 间伐强度>15% 间伐强度>对照组>60% 间伐强度,表明适当的间伐可以提高土壤 N:P。间伐 8 年后,与对照组相比,60% 间伐强度下 0~20,20~40 和 40~60 cm 土层的 N:P 分别减少 3.8%,11.6% 和 27.9%。各处理 3 个土层的 C:N 变化较小,但 0~20 cm 土层的 C:P 和 N:P 总体高于 20~40 和 40~60 cm 土层。

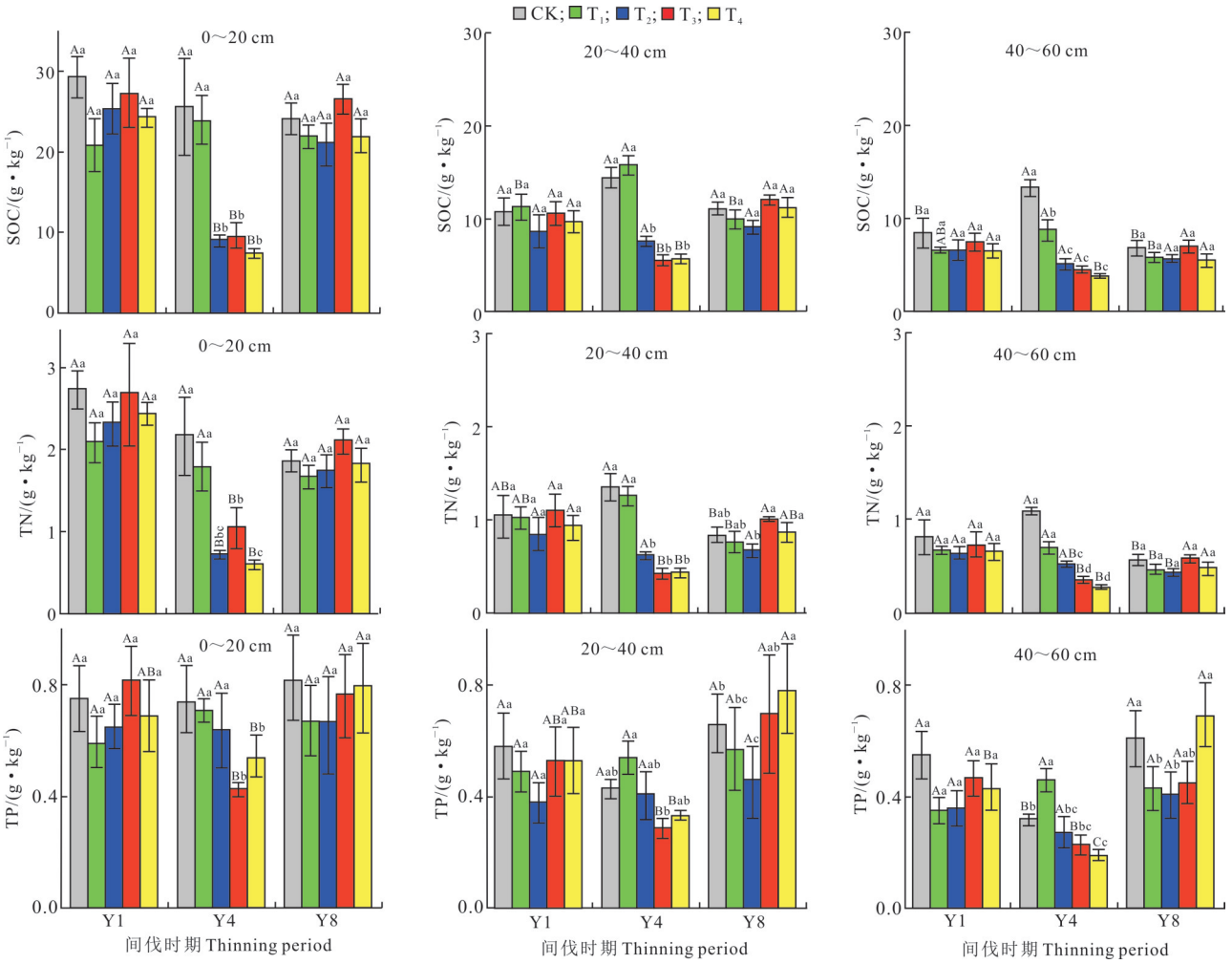


图 3　不同间伐强度对秦岭次生林土壤全量养分含量的影响

Fig. 3　Effects of different thinning intensities on total nutrient content in secondary forest soils of Qinling Mountains.

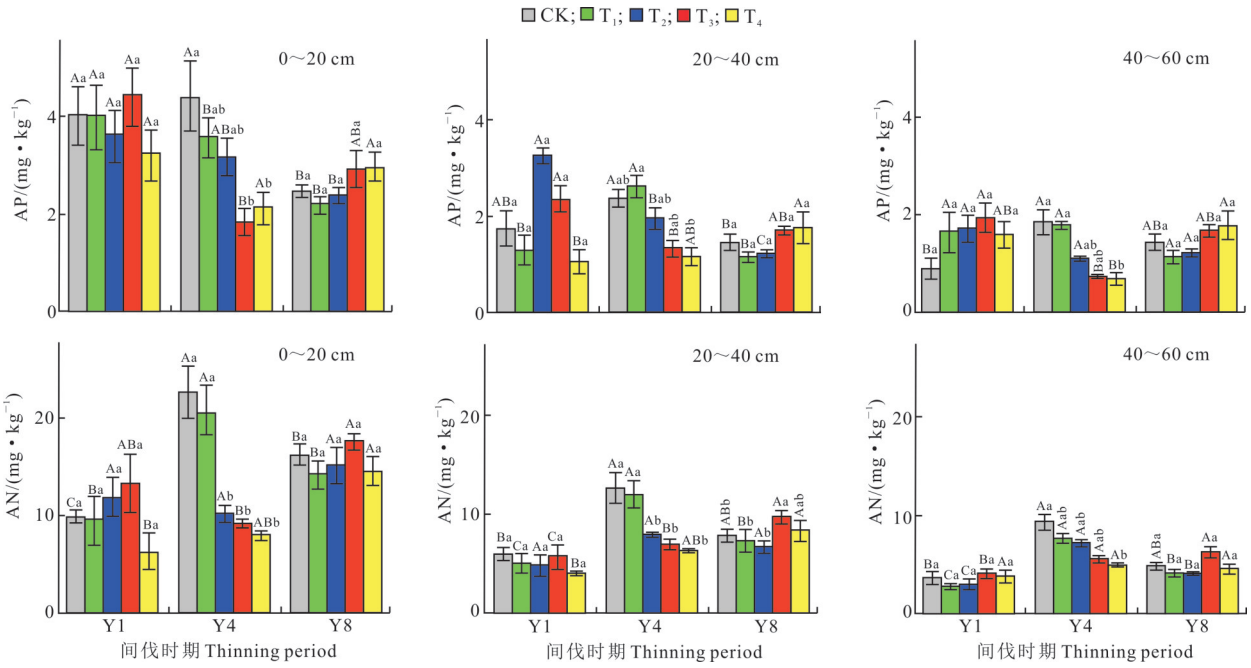


图 4　不同间伐强度对秦岭次生林土壤速效磷（AP）和 速效氮（AN）含量的影响

Fig. 4　Effects of different thinning intensities on AP and AN content in secondary forests of Qinling Mountains

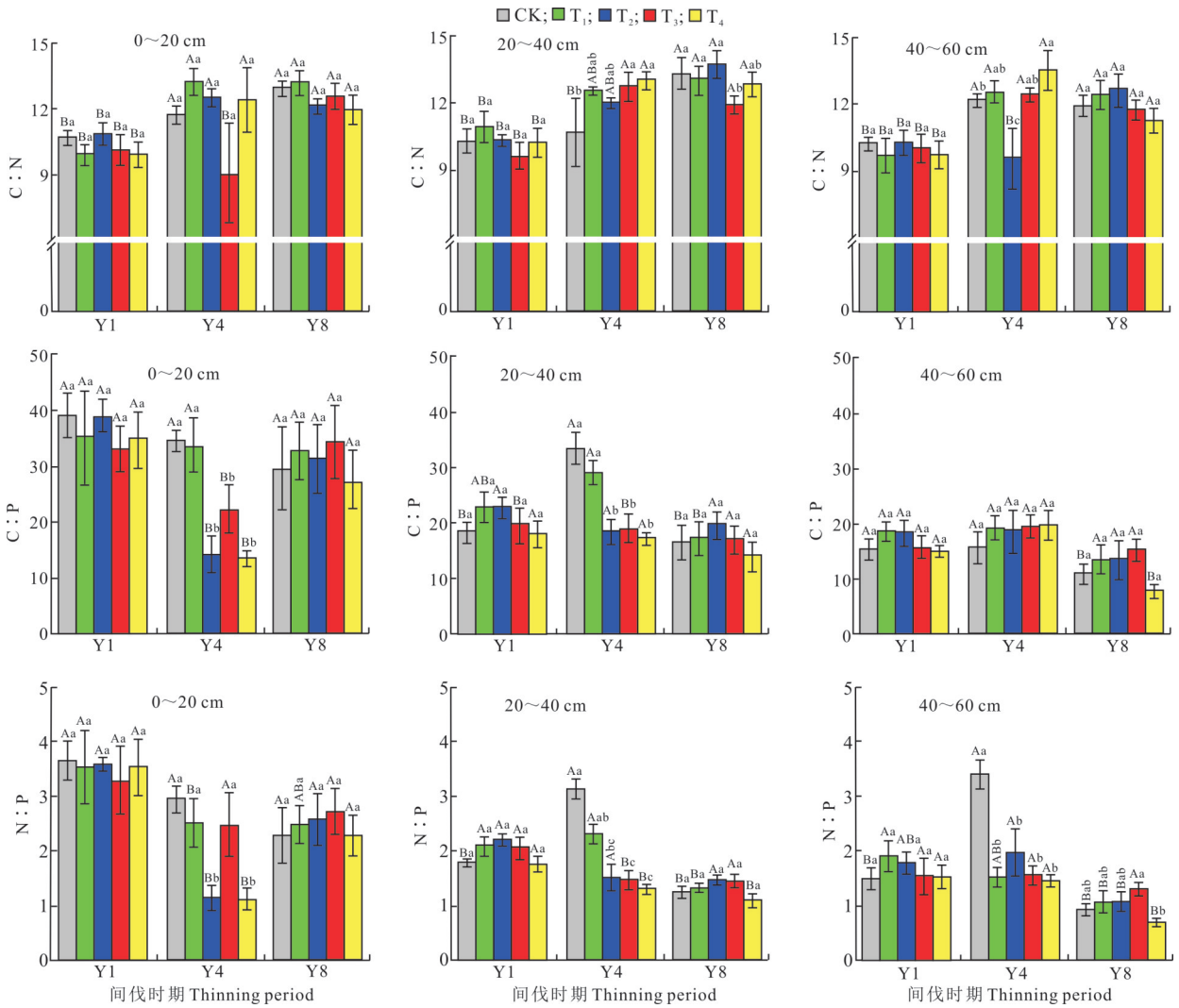


图 5 不同间伐强度对秦岭次生林土壤 C∶N、C∶P 和 N∶P 的影响

Fig. 5 Effects of different thinning intensities on soil C∶N, C∶P, and N∶P ratios in secondary forests of Qinling Mountains.

2.4 植物多样性指数、土壤养分含量与化学计量比之间的相关性

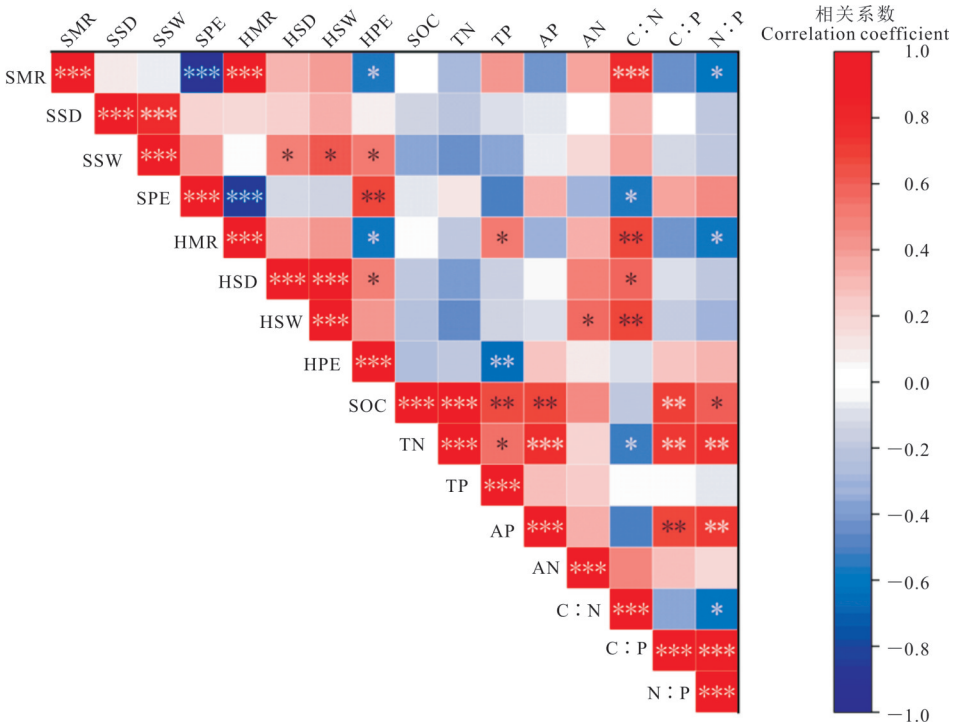
图 6 显示,36 对指标间存在显著相关,其中包括 26 对正相关和 10 对负相关。其中灌木 Margalef 丰富度指数(SMR)与土壤 C∶N 呈显著正相关,而与土壤 N∶P 呈显著负相关;草本 Margalef 丰富度指数(HMR)、草本 Simpson 优势度指数(HSD)和草本 Shannon-Wiener 多样性指数(HSW)均与土壤 C∶N 呈显著或极显著正相关。此外,HMR 与土壤 TP 含量呈显著正相关,HSW 与土壤 AN 含量呈显著正相关,SOC 与土壤 TN、TP 和 AP 含量均呈极显著正相关,4 个多样性指数与土壤 SOC 含量之间相关性不显著。

3 讨 论

3.1 间伐对林下植物组成的影响

间伐是森林经营的一项重要措施,它可以通过增加冠层开阔度和透光性来调节森林结构,从而影响森林内的光照环境和水分条件等,为林下植被创造更多的生存空间,有利于植被的生长和更新[1,10]。本研究中,除 60% 间伐强度的草本植物外,其他处理秦岭次生林林下灌木和草本植物的物种丰富度在间伐 4 年后有所增加,而在间伐 8 年后则有所减少,这与马履一等[7]的研究结果一致。这是因为森林突然遭受砍伐后,更多的光照到达地面,促进了新植物物种在间伐后短时间内的出现,尤其是喜光植物物种数明显增加[13,17]。此外,本研究中,与间伐前相比,间伐 4 年后,60% 间伐强度下秦岭次生林林下植物物种数量增长最明显,这与李俊杰等[1]在马尾松人工林的研究结果基本吻合,这是因为重度间伐强度下,林分郁闭度较低,更多的光照能够进入林内,植物光合作用增强,也为林下植物的生长提供了更充足的空间和资源。本研究中,随着时间的

推移，林下植物种类数量有所减少，可能是间伐会促进林下优势物种的生长，而优势物种与其他物种争夺养分，从而导致林下植物物种数量减少[17]。与草本层植物相比，间伐8年后灌木的物种数量减少得更多，可能是随着时间推移，林分密度增大，而灌木植物株高更高，距离乔木层更近，对光照更加敏感，反应更加迅速[18]。



SMR. 灌木Margalef丰富度指数；SSD. 灌木Simpson优势度指数；SSW. 灌木Shannon-Wiener多样性指数；SPE. 灌木Pielou均匀度指数；HMR. 草本Margalef丰富度指数；HSD. 草本Simpson优势度指数；HSW. 草本Shannon-Wiener多样性指数；HPE. 草本Pielou均匀度指数；SOC. 土壤有机碳；TN. 全氮；TP. 全磷；AP. 速效磷；AN. 速效氮。*、**和***分别表示在$P<0.05$，$P<0.01$，$P<0.001$水平显著相关。SMR. Shrub Margalef richness index；SSD. Shrub Simpson dominance index；SSW. Shrub Shannon-Wiener diversity index；SPE. Shrub Pielou evenness index；HMR. Herb Margalef richness index；HSD. Herb Simpson dominance index；HSW. Herb Shannon-Wiener diversity index；HPE. Herb Pielou evenness index；SOC. Soil organic carbon；TN. Total nitrogen；TP. Total phosphorous；AP. Available phosphorous；AN. Available nitrogen. *，**，and *** indicate significant correlation at the $P<0.05$，$P<0.01$，and $P<0.001$ levels，respectively.

图6　秦岭次生林林下植物多样性指数、土壤养分含量与化学计量比之间的相关性

Fig. 6　Correlation between the diversity index of understory plants，soil nutrient content，and stoichiometric ratios in secondary forests of Qinling Mountains

本研究中，间伐4年后喜光植物桦叶荚蒾重要值较间伐前明显增加；间伐8年后，耐阴植物中华蹄盖蕨成为林下草本植物优势种，且随间伐强度的增大其重要值明显增大，这种变化趋势与马履一等[7]的研究结果相似，表明间伐后秦岭次生林林下植被从以喜光植物为主向耐阴植物逐渐演替的趋势，反映了森林生态系统在干扰后的自我调节和恢复能力，有助于优化森林生态系统的资源分配和物质循环，促进生态系统的健康发展。

3.2　间伐对林下植物多样性和土壤性质的影响

本研究发现，不同的间伐强度处理对秦岭次生林林下灌木和草本植物的多样性总体无显著影响，这与LEI等[9]的研究结果一致。但也有研究表明，间伐对林下植物多样性会产生积极或消极影响[4,19]。其原因可能与研究区的气候、植物竞争、植物群落结构和土壤性质等存在差异有关[10]。从理论上讲，生物和非生物因素对林下植被多样性的影响是复杂的，人工间伐并不是影响植物生长的唯一因素。秦岭地区的气候具有一定的稳定性和均质性，即使在间伐后，虽然研究区局部小气候发生了一些变化，但大气候背景相对稳定，使得植物多样性没有显著变化。

本研究中，在0～20 cm土层，30%，45%和60%间伐强度处理的土壤全量养分（SOC、TN和TP）含量在间伐4年后明显低于间伐前，但在间伐8年后有所恢复，这与前人研究结果[5,10]一致，但也与部分研究结果[3]相悖。造成这种结果的原因是间伐后短期内土壤的枯落物较少，导致枯落物分解和转化形

成的土壤养分含量下降[20]。研究发现,间伐可以通过改变林内郁闭度来调控土壤温度,而适宜的土壤温度可以增强土壤微生物活动以及土壤酶活性,从而促进了凋落物的分解,加速养分循环,随着间伐时间的延长,土壤养分含量不断增长[21],这与本研究中间伐8年后土壤养分含量有所增加的结果一致。

土壤C:N是反映土壤有机质腐殖化和氮矿化能力的良好指标,C:N越低(<25),净氮矿化度越高[14]。本研究中,0~20 cm土层的平均C:N(10.3)低于中国平均水平(11.9),而20~40 cm土层C:N(12.2)和40~60 cm土层C:N(12.8)高于中国平均水平[22],表明本研究区域内表层土壤氮矿化的主导作用高于深层土层。此外,0~20,20~40和40~60 cm土层的平均C:P分别为33.9,23.5和17.1,平均N:P分别为2.9,2.0和1.5,均低于中国C:P(60)和N:P平均水平(5.1)[22]。表明秦岭地区的土壤C、N、P含量相对较低,可能是因为研究区域经历过度间伐,带走大量有机质,导致土壤C、N、P含量降低[14]。

3.3 林下植物多样性与土壤性质的关系

土壤是影响森林生态系统物质循环的关键因素,对植物多样性有重要影响[3]。本研究中,SOC含量与林下灌木和草本多样性的相关性均不显著,这表明SOC不是林下植被生长的限制因素。土壤C:N是反映土壤质量和养分循环的重要指标[23]。在本研究中,草本Shannon-Wiener多样性指数(HSW)与土壤C:N呈极显著正相关,这可能是由于间伐后短期内凋落物减少,而随着林分年龄的增加,促进了凋落物的积累,从而促进了土壤氮的积累[21]。本研究中,土壤TP含量与草本Margalef丰富度指数呈显著正相关,这与李婷婷等[24]结果类似,这可能是因为较高的土壤TP含量能够为草本植物提供更多养分,促进其生长和繁殖,从而增加了草本植物的种类。此外,SOC与土壤TN、TP和AP含量均呈极显著正相关,可能是因为表面积大、孔隙结构发达的SOC具有很强的吸附能力,可以保留更多的养分[25]。

4 结 论

本研究结果表明,森林间伐可在短期内(间伐4年后)提高秦岭次生林林下灌木层和草本层的物种丰富度,其中以60%间伐强度效果最佳,桦叶荚蒾等喜阳植物优势度上升;随着恢复时间的延长(间伐8年后),灌木层和草本层物种丰富度均有所下降,中华蹄盖蕨等耐阴植物重要值明显增加,白颖薹草在间伐前后始终是林下的优势物种。灌木和草本多样性指数在不同间伐时期总体无显著差异。在0~20 cm土层,土壤养分(SOC、TN、TP、AP和AN)含量总体在间伐4年后减少,在间伐8年后总体略有增加,土壤C:N总体也呈上升趋势。相关性分析进一步揭示,土壤C:N与草本Shannon-Wiener多样性、Margalef丰富度及Simpson优势度均呈显著或极显著正相关,表明间伐可以通过影响土壤氮的积累,进而影响草本多样性,土壤C:N也间接反映了林下草本多样性的变化趋势。本研究仅对秦岭次生林间伐8年后的情况进行了分析,但间伐对森林多样性和土壤性质的影响是一个长期过程,因此有必要对其进行长期动态监测,为森林管理奠定更坚实的理论基础。

[参考文献]

[1] 李俊杰,韩梦豪,赵家豪,等. 间伐对马尾松人工林林下植物多样性的动态影响[J]. 生态学杂志,2023,42(4):788-795.
LI J J,HAN M H,ZHAO J H,et al. Temporal effects of thinning on understory plant diversity in *Pinus massoniana* plantations[J]. Chinese Journal of Ecology,2023,42(4):788-795.

[2] 王宏星,孙晓梅,陈东升,等. 适度间伐对日本落叶松人工林生物多样性和土壤多功能性影响[J]. 林业科学,2023,59(6):1-11.
WANG H X,SUN X M,CHEN D S,et al. Effects of moderate thinning on biodiversity and soil multifunctionality in *Larix kaempferi* plantations[J]. Scientia Silvae Sinicae,2023,59(6):1-11.

[3] 周璇,刘凯利,胡佳怡,等. 川西柳杉幼林间伐后林下植被和土壤特征变化[J]. 西北林学院学报,2024,39(1):44-51.
ZHOU X,LIU K L,HU J Y,et al. Understory vegetation and soil characteristic variations of young *Cryptomeria japonica* var. *sinensis* plantations after thinning in western Sichuan[J]. Journal of Northwest Forestry University,2024,39(1):44-51.

[4] 徐雪蕾,孙玉军,周华,等. 间伐强度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响[J]. 林业科学,2019,55(3):1-12.
XU X L,SUN Y J,ZHOU H,et al. Effects of thinning intensity on understory growth and soil properties in Chinese fir plantation[J]. Scientia Silvae Sinicae,2019,55(3):1-12.

[5] 季荣飞,周世兴,黄从德,等. 间伐强度对柏木低效人工林灌草多样性的影响[J]. 东北林业大学学报,2015,43(5):68-74.
JI R F,ZHOU S X,HUANG C D,et al. Effects of different thinning intensity on the understory diversity within *Cupressus funebris* low-efficiency plantation[J]. Journal of Northeast Forestry University,2015,43(5):68-74.

[6] 祝顺万，刘利霞，胡雪凡，等．华北落叶松混交林林下植物群落特征对间伐的响应[J]．森林工程，2024，40(3)：47-55.
ZHU S W，LIU L X，HU X F，et al. The effects of different thinning intensities on the understory vegetation characteristics of mixed forests of *Larix principis-rupprechtii*[J]. Forest Engineering，2024，40(3)：47-55.

[7] 马履一，李春义，王希群，等．不同强度间伐对北京山区油松生长及其林下植物多样性的影响[J]．林业科学，2007，43(5)：1-9.
MA L Y，LI C Y，WANG X Q，et al. Effects of thinning on the growth and the diversity of undergrowth of *Pinus tabulaeformis* plantation in Beijing mountainous areas[J]. Scientia Silvae Sinicae，2007，43(5)：1-9.

[8] DANG P，GAO Y，LIU J L，et al. Effects of thinning intensity on understory vegetation and soil microbial communities of a mature Chinese pine plantation in the Loess Plateau[J]. Science of The Total Environment，2018，630：171-180.

[9] LEI X D，LU Y C，PENG C H，et al. Growth and structure development of semi-natural larch-spruce-fir (*Larix olgensis-Picea jezoensis-Abies nephrolepis*) forests in Northeast China：12-year results after thinning[J]. Forest Ecology and Management，2007，240(1/2/3)：165-177.

[10] YU J T，ZHANG X N，XU C Y，et al. Thinning can increase shrub diversity and decrease herb diversity by regulating light and soil environments[J]. Frontiers in Plant Science，2022，13：948648.

[11] 冯淑琴．不同间伐强度对马尾松人工林土壤理化性质的影响[J]．防护林科技，2023(4)：48-50.
FENG S Q. Effects of different thinning intensity on soil physical and chemical character in *Pinus massoniana* plantation[J]. Protection Forest Science and Technology，2023(4)：48-50.

[12] HEDO DE SANTIAGO J，LUCAS-BORJA M E，WICBAENA C，et al. Effects of thinning and induced drought on microbiological soil properties and plant species diversity at dry and semiarid locations[J]. Land Degradation & Development，2016，27(4)：1151-1162.

[13] 霍雪莹．秦岭两种典型次生林群落构建及其稳定性研究[D]．陕西杨凌：西北农林科技大学，2024.
HUO X Y. Study on plant community assembly and stability of two typical secondary forests in Qinling Mountains[D]. Yangling，Shaanxi：Northwest A&F University，2024.

[14] PANG Y，TIAN J，WANG D X. Response of multi-ecological component stoichiometry and tree nutrient resorption to medium-term whole-tree harvesting in secondary forests in the Qinling Mountains，China[J]. Forest Ecology and Management，2021，498：119573.

[15] REN C J，ZHANG W，ZHONG Z K，et al. Differential responses of soil microbial biomass，diversity，and compositions to altitudinal gradients depend on plant and soil characteristics[J]. Science of The Total Environment，2018，610：750-758.

[16] 刘蓝鑫．秦岭天然次生林结构和土壤养分动态对抚育间伐的响应[D]．陕西杨凌：西北农林科技大学，2022.
LIU L X. Response of natural secondary forests structure and soil nutrients dynamics to thinning in the Qinling Mountains[D]. Yangling，Shaanxi：Northwest A&F University，2022.

[17] TRENTINI C P，CAMPANELLO P I，VILLAGRA M，et al. Thinning of loblolly pine plantations in subtropical Argentina：impact on microclimate and understory vegetation[J]. Forest Ecology and Management，2017，384：236-247.

[18] 汪娅琴，王德炉，吴丽丽．间伐强度对光皮桦天然次生林天然更新及植物多样性的影响[J]．东北林业大学学报，2021，49(9)：19-24，32.
WANG Y Q，WANG D L，WU L L. Effect of thinning intensity on vegetation diversity and seedling regeneration in natural secondary *Betula luminifera* forests[J]. Journal of Northeast Forestry University，2021，49(9)：19-24，32.

[19] METLEN K L，FIEDLER C E. Restoration treatment effects on the understory of ponderosa pine/Douglas-fir forests in western *Montana*，USA[J]. Forest Ecology and Management，2006，222(1/2/3)：355-369.

[20] ZHOU T，WANG C K，ZHOU Z H. Thinning promotes the nitrogen and phosphorous cycling in forest soils[J]. Agricultural and Forest Meteorology，2021，311：108665.

[21] 肖文娅，刁娇娇，费菲，等．不同强度间伐对杉木人工林凋落物分解速率的影响[J]．生态环境学报，2016，25(8)：1291-1299.
XIAO W Y，DIAO J J，FEI F，et al. Effects of different intensity thinning on litter decomposition in Chinese fir plantations[J]. Ecology and Environmental Sciences，2016，25(8)：1291-1299.

[22] TIAN H Q，CHEN G S，Zhang C，et al. Pattern and variation of C∶N∶P ratios in China's soils：a synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry，2010，98：139-151.

[23] 高郯，权红，卢杰，等．藏东南高山松林表层土壤养分含量及其化学计量比特征[J]．西北农林科技大学学报(自然科学版)，2021，49(4)：62-70，80.
GAO T，QUAN H，LU J，et al. Characteristics of topsoil nutrients and their stoichiometry in *Pinus densata* forest in Southeast Tibet[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)，2021，49(4)：62-70，80.

[24] 李婷婷，唐永彬，周润惠，等．云顶山不同人工林林下植物多样性及其与土壤理化性质的关系[J]．生态学报，2021，41(3)：1168-1177.
LI T T，TANG Y B，ZHOU R H，et al. Understory plant diversity and its relationship with soil physicochemical properties in different plantations in Yunding Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica，2021，41(3)：1168-1177.

[25] CHEN W J，LI P P，LI F，et al. Effects of tillage and biochar on soil physiochemical and microbial properties and its linkage with crop yield[J]. Frontiers in Microbiology，2022，13：929725.

（责任编辑：李小平）