

DOI: 10.5846/stxb201306101562

陈亚南, 马露莎, 张向茹, 杨佳佳, 安韶山. 陕西黄土高原刺槐枯落叶生态化学计量学特征. 生态学报, 2014, 34(15): 4412-4422.

Chen Y N, Ma L S, Zhang X R, Yang J J, An S S. Ecological stoichiometry characteristics of leaf litter of *Robinia pseudoacacia* in the Loess Plateau of Shaanxi Province. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(15): 4412-4422.

陕西黄土高原刺槐枯落叶生态化学计量学特征

陈亚南¹, 马露莎¹, 张向茹¹, 杨佳佳¹, 安韶山^{2,*}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 杨陵 712100;

2. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨陵 712100)

摘要: 生态系统元素平衡是当前全球变化生态学和生物地球化学循环研究的焦点和热点, 生态化学计量学结合了生物学、物理学和化学等基本原理, 是研究生物系统能量平衡与多重化学元素平衡的科学, 为研究元素在生物地球化学循环与生态过程中的规律及其之间的计量关系提供了一种综合的方法。以陕西黄土高原人工刺槐林为研究对象, 结合纬度和坡向两个因素, 分析了三原、淳化、耀州区、宜君、黄陵、洛川、富县、甘泉、宝塔区、安塞、米脂、神木 12 个县区的刺槐枯落叶生态化学计量学特征。结果发现, 阳坡刺槐枯落叶 C、N、P 含量的变化范围分别为 318.34—428.01 g/kg、13.27—24.07 g/kg、1.66—2.57 g/kg; 阴坡刺槐枯落叶 C、N、P 含量的变化范围分别为 306.70—433.68 g/kg、12.55—24.39 g/kg、1.62—2.99 g/kg。阳坡刺槐枯落叶 C:N、C:P、N:P 的变化范围分别为 14.23—24.61、148.67—215.92、7.37—14.47; 阴坡刺槐枯落叶 C:N、C:P、N:P 的变化范围分别为 16.87—26.54、130.06—234.41、7.05—13.22。随着纬度的升高, 刺槐枯落叶 C、N 显著下降, 刺槐枯落叶 P、C:N、C:P、N:P 无明显差异。刺槐枯落叶 C、N、P 之间呈显著正相关。刺槐枯落叶 C、N、P、C:N、C:P、N:P 在阴坡和阳坡之间无明显差异。研究区, 阴坡和阳坡的刺槐枯落叶 N:P 均较低, 刺槐林土壤的全氮平均含量也低于全国平均水平, 推测陕西黄土高原刺槐林的生长可能主要受到氮素的限制。

关键词: 黄土高原; 刺槐; 枯落叶; 生态化学计量学; 纬度; 坡向

Ecological stoichiometry characteristics of leaf litter of *Robinia pseudoacacia* in the Loess Plateau of Shaanxi Province

CHEN Yanan¹, MA Lusha¹, ZHANG Xiangru¹, YANG Jiajia¹, AN Shaoshan^{2,*}

1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract: The balance between various elements of the ecosystem has been the focus of research related to the ecology of global change and biogeochemical cycles. Ecological stoichiometry is the study of the balance of energy and elements in biological systems and is based on the general laws of physics, chemistry and biology. Ecological stoichiometry provides an integrated approach to investigating the stoichiometric relationships and rules in biogeochemical cycling and ecological processes. *Robinia pseudoacacia*, a leguminous tree, is the main species used for afforestation in the Loess Plateau of China. *R. pseudoacacia* has some special features, such as a rapid growth, being easy to propagate, being very adaptable to various environmental conditions and an strong ability to fix nitrogen in a biologically useful form, allowing it to be widely planted in the Loess Plateau. To explore ecological stoichiometric characteristics of leaf litter of *R. pseudoacacia* in the Loess Plateau, *R. pseudoacacia* forests scattered across 12 counties (listed below) on both sunny and shady slopes were selected for study.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41171226); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0473); 西北农林科技大学“优秀人才科研专项(QN2011049)”资助

收稿日期: 2013-06-10; 网络出版日期: 2014-03-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shan@ms.iswc.ac.cn

Data were collected at each site on latitude, slope and aspect, light conditions, temperature, water and soil conditions. The C, N, and P contents of *R. pseudoacacia* leaf litter were studied from sites scattered from south to north in the Loess Plateau of Shaanxi Province, including Sanyuan, Chunhua, Yaozhou, Yijun, Huangling, Luochuan, Fuxian, Ganquan, Baota, Ansai, Mizhi and Shenmu counties. The results showed that C, N, and P contents of *R. pseudoacacia* leaf litter from sites on sunny slopes range from 318.34 to 428.01 g/kg, 13.27 to 24.07 g/kg, and 1.66 to 2.57 g/kg, respectively. Leaf litter C, N, P content of shady slopes ranged from 306.70 to 433.68 g/kg, 12.55 to 24.39 g/kg, and 1.62 to 2.99 g/kg, respectively. Leaf litter C:N, C:P, N:P ratios on sunny slopes ranged from 14.23 to 24.61, 148.67 to 215.92, and 7.37 to 14.47, respectively. Leaf litter C:N, C:P, N:P ratios on shady slopes ranged from 16.87 to 26.54, 130.06 to 234.41, and 7.05 to 13.22, respectively. C and N contents decreased significantly in *R. pseudoacacia* leaf litter with increasing latitude in the 12 counties, although P content in the leaf litter did not change significantly among the 12 counties. The same trend was observed between *R. pseudoacacia* leaf litter and soil when latitude increased. The C, N and P content in *R. pseudoacacia* leaf litter were positively correlated to each other. The C:N, C:P, N:P ratios were not significantly different in *R. pseudoacacia* leaf litter among the 12 counties with increasing latitude. Slope aspect had no effect on the C, N and P content of *R. pseudoacacia* leaf litter and soil. The leaf N:P ratio can be used as an ecological indicator for shortages of these two nutrients at the individual plant and community levels. In this research, the ratios of N:P in *R. pseudoacacia* leaf litter on both sunny and shady slopes were small. In addition, the soil N content of this study area was less than average for all of China, which implies that available N was the main factor limiting the distribution of *R. pseudoacacia* in the Loess Plateau of Shaanxi Province. Further research should be conducted to determine whether this conclusion can be applied over a broader spatial scale.

Key Words: the Loess Plateau; *Robinia pseudoacacia*; leaf litter; ecological stoichiometry; latitude; slope aspect

生态化学计量学结合了生物学、物理学和化学等基本原理,是研究生物系统能量平衡与多重化学元素(主要是 C、N、P)平衡的一门学科^[1],目前,已广泛应用于种群动态、生物体营养动态、微生物营养、寄主—病原关系、生物共生关系、消费者驱动的营养循环、限制性元素的判断、生态系统比较分析和森林演替与衰退及全球 C、N、P 生物地球化学循环等研究^[2]。

枯落物是森林生态系统的重要组分,在营养循环、水源涵养、水土保持以及碳的固定等方面发挥着重要的生态功能^[3]。枯落物的凋落和分解是森林生态系统养分循环的基本过程,与土壤养分的累积、植物自身养分的吸收调控密切联系,枯落物的养分状况在一定程度上反映了土壤的养分供应状况以及植物的养分利用状况。研究枯落物的生态化学计量学特征对于揭示生态系统各组分之间的养分循环规律,阐明系统的稳定性以及促进生态化学计量学理论的发展具有重要的意义。

黄土高原是我国水土流失最为严重的地区之一,生态环境极其脆弱,直接影响了黄河流域的生态

安全。为了改善黄土高原的生态环境,以退耕还林还草为核心的生态环境建设迅速展开^[4]。作为

生态恢复与重建的主要手段,人工植被恢复对改善土壤性质有着显著作用^[5-7]。刺槐(*Robinia pseudoacacia*)作为黄土高原主要造林树种之一,由于生长快、适应性强、繁殖容易、固氮等特点^[8-9],20 世纪 70 年代末至 80 年代初,得到大面积栽植,为改善生态环境、调节黄河流域的水文状况起到了关键作用^[10]。目前,黄土高原针对刺槐的研究,主要集中在刺槐的生长特性^[11-16]、刺槐对土壤的水文效应及养分效应^[17-21],而涉及刺槐生态化学计量学方面的研究较少^[22]。纬度和坡向代表了不同的光照、温度、水分和土壤条件^[23-24],目前,国内关于纬度、坡向对植物叶片生态化学计量学特征影响的研究相对较少^[25-29],而结合纬度和坡向对植物枯落叶的研究还未曾报道。本文以陕西黄土高原从南到北 12 个县区的人工刺槐林为研究对象,探讨了阴坡和阳坡刺槐枯落叶 C、N、P 的生态化学计量特征,有助于阐明生态系统 C、N、P 平衡的元素化学计量比格局和 C、N、P 元素之间的相互关系,为黄土高原生态系统养

分循环的驱动机制奠定了基础,也为中国大区域尺度的元素计量学特征、陆地生态系统的生物地球化学循环提供了科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原中部,采样点由南向北分别为三原、淳化、耀州区、宜君、黄陵、洛川、富县、甘泉、宝塔区、安塞、米脂、神木(图 1)。该研究区域位于中纬度温带,34°43′—38°49′N,108°49′—110°22′E,海拔 853—1338 m,地貌为黄土塬梁丘陵沟壑地貌。年平均气温 7—9℃,年降雨量 350—650 mm,温度和降雨量由南到北递减,具有明显的地域性差异。

1.2 样地设置与取样

通过大量查阅刺槐相关文献资料以及走访陕西省林业相关部门领导及各地老农,于 2011 年 8 月确定了采样点。为保证各采样点的一致性,采样时间选择了刺槐生长的茂盛时期,各样点均选取林相整齐、林木分布较均匀、坡位一致的人工刺槐林(平均林龄 20a)为研究对象。每个采样点设置阴阳两个坡面,每个坡面设置 2 个 10 m×10 m 的大样方,在每个大样方内从坡上到坡下按照“S”型 5 点法选择

1 m×1 m 的小样方,重复 2 次,并在小样方内挑选出刺槐的枯落叶(包括可辨认的半腐解部分),分别混匀,四分法取部分装入牛皮纸袋;土壤的采集与枯落叶的采集相对应,用土钻从坡上到坡下按照“S”型 5 点法取 0—10 cm 土层,重复 2 次,充分混匀后用四分法取部分装入塑封袋带回。各采样点概况及林分状况(表 1,表 2)。

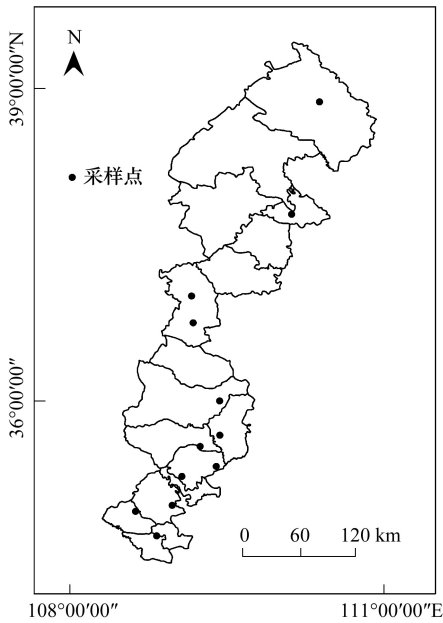


图 1 采样点分布
Fig.1 Distribution of sample sites

表 1 样地概况
Table 1 Survey of the plots

采样点 Sample site	坡向 Slope aspect	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	海拔 Altitude/m	坡位 Slope position	坡度 Gradient /(°)
三原	阳坡	108°49'29.69"	34°43'37.79"	935	中坡	32
	阴坡	108°49'38.59"	34°43'41.65"	852	中坡	24
淳化	阳坡	108°39'17.69"	34°55'4.21"	1318	中坡	33
	阴坡	108°39'26.13"	34°55'0.91"	1325	中坡	23
耀州区	阳坡	108°59'36.08"	35°00'0.85"	824	中坡	30
	阴坡	108°59'18.31"	35°00'14.12"	882	中坡	31
宜君	阳坡	109°04'3.13"	35°16'27.18"	1384	中坡	26
	阴坡	109°04'5.65"	35°16'28.4"	1292	中坡	34
黄陵	阳坡	109°14'34.79"	35°33'46.02"	969	中坡	13
	阴坡	109°14'54.15"	35°34'57.52"	893	中坡	20
洛川	阳坡	109°26'22.66"	35°42'33.7"	1003	中坡	23
	阴坡	109°26'13.31"	35°42'30.64"	1041	中坡	29
富县	阳坡	109°25'28.83"	35°59'58.1"	1015	中坡	31
	阴坡	109°25'46.96"	35°59'58.63"	1040	中坡	20
甘泉	阳坡	109°24'44.03"	36°21'22.08"	1132	中坡	21

续表						
采样点 Sample site	坡向 Slope aspect	经度 Longitude(E)	纬度 Latitude(N)	海拔 Altitude/m	坡位 Slope position	坡度 Gradient /(°)
宝塔区	阴坡	109°24'34.83"	36°21'27.94"	1109	中坡	18
	阳坡	109°09'48.48"	36°41'41.12"	1181	中坡	25
	阴坡	109°09'51.78"	36°41'40.76"	1182	中坡	32
安塞	阳坡	109°10'15.21"	37°00'22.4"	1191	中坡	30
	阴坡	109°09'39.2"	37°00'29.79"	1182	中坡	27
米脂	阳坡	110°09'47.96"	37°52'45.48"	945	中坡	31
	阴坡	110°11'0.22"	37°51'37.69"	1067	中坡	30
神木	阳坡	110°21'31.77"	38°47'47.7"	1167	中坡	32
阴坡	110°21'54.57"	38°48'35.17"	1119	中坡	25	

表 2 样地林分状况					
Table 2 Stand features of the plots					
采样点 Sample site	坡向 Slope aspect	树高 Height/m	胸径 Diameter at breast height/cm	林分密度 Stand density/ (株/hm ²)	林分年龄 Stand age/a
三原	阳坡	8.0±1.5	5.3±0.8	1400	18
	阴坡	12.0±1.1	4.6±0.7	2200	18
淳化	阳坡	9.6±1.4	6.4±1.2	2700	20
	阴坡	9.5±1.0	6.6±0.9	2400	20
耀州区	阳坡	8.1±0.5	4.7±0.6	2100	20
	阴坡	6.8±1.5	4.3±0.6	1200	17
宜君	阳坡	10.4±0.4	4.4±0.4	4700	21
	阴坡	9.2±0.8	4.7±0.6	4300	18
黄陵	阳坡	10.4±0.5	4.6±0.6	2600	19
	阴坡	8.7±0.8	4.1±0.4	1700	22
洛川	阳坡	9.6±0.8	5.0±1.0	1500	17
	阴坡	9.7±0.9	4.8±0.5	2300	21
富县	阳坡	10.1±0.4	4.0±0.3	3800	16
	阴坡	9.7±0.5	4.0±0.3	3400	18
甘泉	阳坡	9.3±0.3	4.7±0.4	2700	18
	阴坡	8.5±1.2	4.3±0.6	1400	18
宝塔区	阳坡	7.8±0.8	4.7±0.8	1100	20
	阴坡	9.2±0.2	4.9±1.7	1200	20
安塞	阳坡	9.6±0.6	5.1±0.8	1600	20
	阴坡	7.8±0.7	5.3±0.6	1200	20
米脂	阳坡	6.2±0.8	6.7±0.6	1700	17
	阴坡	6.6±0.6	3.9±0.8	1300	21
神木	阳坡	5.8±0.6	8.0±1.3	3200	24
	阴坡	6.5±0.8	4.0±0.8	2800	20

1.3 枯落叶和土壤养分含量测定

将采集的刺槐枯落叶于 105 ℃ 下杀青 10 min, 80 ℃ 烘干至恒重, 粉碎后测定 C、N、P 含量; 枯落叶 C 的测定采用外加热重铬酸钾容量法; N、P 的测定采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 凯氏定氮法测定 N, 钒钼黄比

色法测定 P; 土壤样品于室内自然风干, 挑除动植物残体, 碎石等杂物, 磨细后过 0.15 mm 筛, 土壤 C、N、P 的测定分别采用重铬酸钾外加热法、钼锑抗比色法及凯氏定氮法^[30]。

1.4 数据处理

用 Microsoft Office Excel 2003 对数据进行整理和作图,用 SPSS 11.5 对数据进行统计分析。C、N、P 含量以单位质量的养分含量 (g/kg) 表示, C:N、C:P、N:P、C:N:P 采用质量比。刺槐枯落叶 C、N、P、C:N、C:P、N:P 作正态分布性检验,正态分布性检验采用 One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test,简称 K-S 检验;经检验,刺槐枯落叶 N、C:N、C:P 符合正态分布 ($P>0.05$), C、P、N:P 不符合正态分布 ($P<0.05$);采用两个独立样本 T 检验方法,比较阴坡和阳坡刺槐枯落叶及土壤的 C、N、P、C:N、C:P、N:P

的差异 ($P>0.05$)。

2 结果与分析

2.1 刺槐林土壤 C、N、P 随纬度的变化

阳坡土壤 C、N、P 变化范围分别为 4.23—24.62 g/kg、0.45—2.14 g/kg、0.90—1.56 g/kg, 平均值分别为 10.85、0.98、1.20 g/kg;阴坡土壤 C、N、P 变化范围分别为 2.40—15.0、0.16—1.74、0.48—1.61 g/kg, 平均值分别为 9.01、0.86、1.17 g/kg (表 3)。随着纬度的升高,阴坡和阳坡的土壤 C、N 均呈显著降低 ($P<0.01$),而土壤 P 无明显差异 ($P>0.05$) (表 4)。

表 3 刺槐林土壤 C、N、P 含量

Table 3 Soil C, N, and P contents of *Robinia pseudoacacia* forest (mean±SE)

采样点 Sample site	C 含量 Carbon content/(g/kg)		N 含量 Nitrogen content/(g/kg)		P 含量 Phosphorus content/(g/kg)	
	0—10 cm		0—10 cm		0—10 cm	
	阳坡 Sunny slope	阴坡 Shady slope	阳坡 Sunny slope	阴坡 Shady slope	阳坡 Sunny slope	阴坡 Shady slope
三原	24.62±0.80	12.77±0.15	2.14±0.10	1.74±0.11	0.93±0.08	1.61±0.01
淳化	17.29±3.97	16.7±0.10	1.64±0.30	1.48±0.03	1.11±0.09	0.91±0.04
耀州区	14.22±2.33	15.0±0.10	1.23±0.17	1.29±0.09	1.32±0.09	1.04±0.07
宜君	17.75±0.05	14.0±0.40	1.62±0.03	1.31±0.01	1.36±0.24	1.31±0.19
黄陵	6.85±0.19	8.40±1.40	0.52±0.04	0.76±0.10	1.56±0.39	1.47±0.14
洛川	11.60±0.21	8.21±0.71	1.12±0.02	0.83±0.04	1.20±0.04	1.24±0.13
富县	6.62±2.40	7.13±0.24	0.62±0.16	0.61±0.02	1.16±0.10	0.91±0.03
甘泉	8.29±1.09	7.01±2.06	0.80±0.03	0.65±0.02	1.22±0.09	1.41±0.12
宝塔区	6.25±0.15	5.97±0.11	0.54±0.09	0.52±0.05	1.28±0.07	1.17±0.01
安塞	4.23±1.25	6.35±0.27	0.51±0.10	0.61±0.01	1.21±0.09	1.23±0.07
米脂	5.32±2.95	4.39±0.58	0.45±0.18	0.41±0.13	1.13±0.12	1.20±0.02
神木	7.15±1.31	2.40±0.27	0.59±0.13	0.16±0.05	0.90±0.07	0.48±0.11

表 4 土壤 C、N、P 含量随纬度变化方程

Table 4 Functions of soil C, N, and P contents with the change of latitude

坡向 Slope aspect	方程 Function		
阳坡 Sunny slope	$y_C = 2.3098x^2 - 172.93x + 3240.6$ $R^2 = 0.8333^{**}$	$y_N = 0.1865x^2 - 13.997x + 263.01$ $R^2 = 0.7945^{**}$	$y_P = -0.066x^2 + 4.7842x - 85.457$ $R^2 = 0.4312$
阴坡 Shady slope	$y_C = 0.8346x^2 - 64.351x + 1243.4$ $R^2 = 0.8635^{**}$	$y_N = 0.1082x^2 - 8.2692x + 158.29$ $R^2 = 0.9072^{**}$	$y_P = -0.0755x^2 + 5.4128x - 95.723$ $R^2 = 0.4032$

x 表示纬度 (°), y_C 、 y_N 、 y_P 分别表示土壤 C、N、P 含量 (g/kg), ** 表示差异极显著 ($P<0.01$)

2.2 刺槐枯落叶 C、N、P 随纬度的变化

阳坡刺槐枯落叶的 C、N、P 的变化范围分别为 318.34—428.01 g/kg、13.27—24.07 g/kg、1.66—2.57 g/kg, 平均值分别为 374.55、18.89、2.05 g/kg;阴坡刺槐枯落叶 C、N、P 的变化范围分别为 306.70—

433.68、12.55—24.39、1.62—2.99 g/kg, 平均值分别为 380.18、18.90、2.05 g/kg;随着纬度的升高,阴阳坡枯落叶 C、N 呈显著降低 ($P<0.05$), 枯落叶 P 无明显差异 ($P>0.05$) (图 2)。

2.3 刺槐枯落叶与土壤 C、N、P 相关分析

土壤有机碳与土壤全氮显著正相关 ($P<0.05$),

土壤有机碳与枯落叶有机碳显著正相关($P<0.05$), (表 5)。
枯落叶有机碳、全氮、全磷之间显著正相关($P<0.05$)

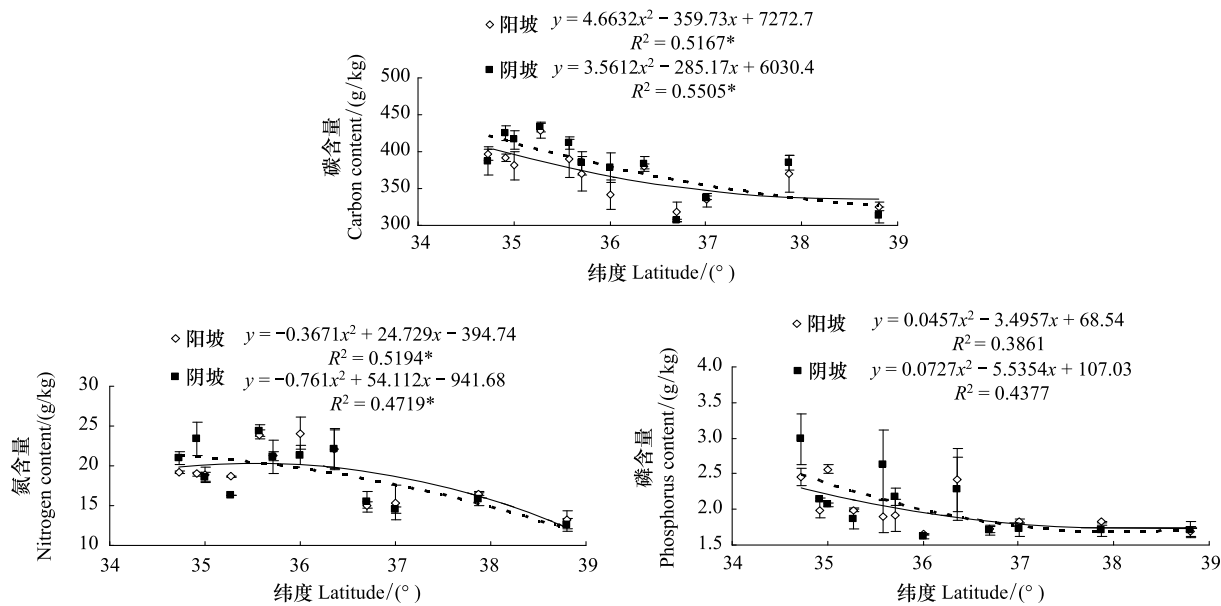


图 2 刺槐枯落叶 C、N、P 含量随纬度的变化
Fig.2 Variations of leaf litter C, N, and P contents of *Robinia pseudoacacia* with the change of latitude

表 5 枯落叶与土壤 C、N、P 的相关性

元素类型 Element types	元素类型 Element types					
	土壤 C Soil organic carbon	土壤 N Soil total nitrogen	土壤 P Soil total phosphorus	枯落叶 C Leaf litter organic carbon	枯落叶 N Leaf litter total nitrogen	枯落叶 P Leaf litter total phosphorus
土壤 C Soil organic carbon		0.980 *	0.174	0.736 *	0.346	0.659 *
土壤 N Soil total nitrogen	0.980 *		0.130	0.653 *	0.327	0.723 *
土壤 P Soil total phosphorus	0.174	0.130		0.445	0.441	0.465
枯落叶 C Leaf litter organic carbon	0.736 *	0.653 *	0.445		0.589 *	0.590 *
枯落叶 N Leaf litter total nitrogen	0.346	0.327	0.441	0.589 *		0.583 *
枯落叶 P Leaf litter total phosphorus	0.659 *	0.723 *	0.465	0.590 *	0.583 *	

* 表示显著性差异 ($P<0.05$)

2.4 刺槐枯落叶化学计量比随纬度的变化

阳坡刺槐枯落叶 C:N、C:P、N:P 的变化范围分别为 14.23—24.61、148.67—215.92、7.37—14.47, 平均值分别为 19.98、187.92、9.65; 阴坡刺槐枯落叶 C:N、C:P、N:P 的变化范围分别为 16.87—26.54、130.06—234.41、7.05—13.22, 平均值分别为 20.70、190.67、9.36; 随着纬度的增加, 刺槐枯落叶 C:N、C:P、N:P 均无明显变化($P>0.05$) (图 3)。

3 讨论

3.1 刺槐枯落叶 C、N、P 随纬度变化

随着纬度升高, 阴坡和阳坡刺槐枯落叶 C、N 显著降低 ($P<0.05$), 枯落叶 P 无明显差异 ($P>0.05$), 可能与本研究刺槐林地土壤养分有关; 随着纬度的升高, 刺槐林地土壤 C、N 极显著降低 ($P<0.01$), 土壤 P 无明显差异 ($P>0.05$) (表 4)。有研究认为, 地表

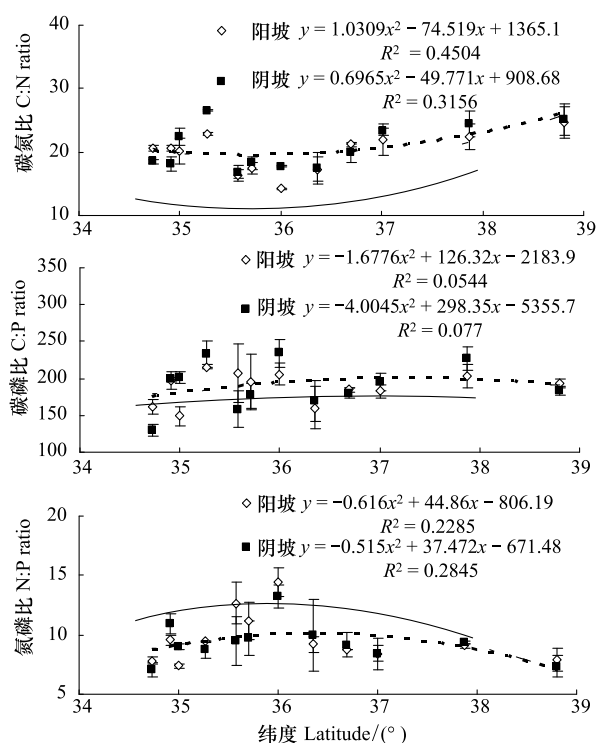


图3 枯落叶碳氮磷比随纬度的变化规律

Fig.3 Variations of litter C:N:P with the change of latitude

形成的枯枝落叶层是表层土壤 C 和 N 的重要来源,凋落物作为养分的基本载体,在养分循环中,连接着土壤与植物,因而在维持土壤肥力方面,起到关键作用^[31];还有研究认为人工林人为干扰与土壤侵蚀较弱,刺槐每年向林地提供大量的凋落物,经微生物腐解后归还土壤,使得土壤有机质提高,土壤有机质经逐步矿化,使得土壤 N 释放,故土壤有机质和土壤全 N 空间分布上存在一定的相似性^[32-35]。本研究发现土壤有机碳和土壤全 N 随纬度变化趋势一致(表 4),且存在显著正相关关系($P < 0.05$)(表 5)。陕西黄土高原由南向北,由于纬度升高,降雨量减少、温度降低,土壤类型由黄土和粘黄土向砂黄土转变^[36],黄土和粘黄土属于黄土母质^[37],有利于有机质的吸收,但砂黄土保肥性相对较差。因此,陕西黄土高原刺槐林由南向北,土壤有机质和全 N 显著下降($P < 0.01$),土壤能够提供给刺槐的有机质和全 N 减少,最终导致刺槐枯落叶 C、N 降低。而土壤全 P 随纬度变化不明显($P > 0.05$),可能与中国土壤 P 含量低于全球平均水平有关^[38],加之黄土高原地区土壤风蚀水蚀作用严重,加速了土壤 P 的淋溶。由于黄土高原土壤 P 整体上都低,故随着纬度升高,土壤 P 无明显差异($P > 0.05$),导致刺槐枯落叶 P 随纬度

变化也无差异。

3.2 刺槐枯落叶 C:N、C:P、N:P 随纬度变化

有研究表明,植物叶片 C:N 除了在不同功能群间有明显变异外,其它情况下非常稳定^[25, 39];也有研究发现,内蒙古、青藏高原、新疆 3 个不同气候区的草原植物叶片 C:N 极为稳定^[40]。本研究发现,随着纬度升高,刺槐枯落叶 C:N 差异不显著($P > 0.05$)。阳坡刺槐枯落叶的 C:N、C:P、N:P 分别为 19.98、187.92、9.65,阴坡分别为 20.70、190.67、9.36,相比喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物养分 C:N、C:P、N:P 25、427 和 18^[41]、浙江天童落叶阔叶林凋落物 C:N、C:P、N:P 的 26.1、334.7、12.8^[42]以及全球枯落物的 C:N、C:P、N:P 66.2、3144.1、45.5^[43]都要小,这可能与刺槐的特性有关;研究表明,生长速率较高的生物具有较低的 C:N、C:P 和 N:P^[43-44]。刺槐作为一种豆科速生树种,它对环境的适应力很强,能够很好地调节、平衡体内的各种元素的比例;本研究发现,随着纬度的升高,刺槐枯落叶的 C:N、C:P、N:P 都很稳定,可能与刺槐适应环境变化的策略有关。

N 和 P 作为植物生长最重要的限制元素,共同参与了植物体的基本生理生化过程。在自然条件下,由于受到外界环境的影响相同,因而表现出较高的一致性,使得 N:P 较为稳定^[45]。有研究表明,植物 C、N 和 P 的含量变化表现出明显的相关关系^[39],与本研究结果一致。C:N 与 N:P 是影响凋落物的分解和养分归还速率的重要因素,较低的 C:N 与 N:P 易于凋落物分解^[41, 46]。从 N:P 的认知水平看,较低的 N:P 指示植物生长主要受到 N 的限制得到普遍认可^[47]。郑淑霞和上官周平对黄土高原地区 126 个植物样品叶片作了研究,发现植物生长主要受到 P 的限制^[45],而王凯博和上官周平对黄土丘陵区燕沟流域 8 种典型植物叶片的研究^[22],发现植物生长可能主要受到 N 或 N、P 的共同限制。本研究,阴坡和阳坡刺槐林土壤有机碳及全 N 平均含量较全国平均水平^[48]偏低,且刺槐枯落叶 N:P 也较低,推测陕西黄土高原刺槐的生长可能主要受到氮素的限制。尽管刺槐是豆科固氮植物,如果土壤氮素供应不足,其生长也有可能受到氮素的限制。本研究与王凯博和上官周平的研究^[22]较为一致,而与郑淑霞和上官周平^[45]的研究不一致,可能与本研究

侧重点是刺槐枯落叶且研究区采样点布设更多更均匀有关。综上所述,可以为陕西黄土高原刺槐林的管理与施肥提供一定建议,即在整体上注重氮肥施用,南部地区还要结合磷肥的施用。

3.3 坡向对刺槐枯落叶生态化学计量学特征的影响

坡向代表了不同的光照、温度、水分和土壤条件^[24],不同坡向生长的植物,太阳辐射量、温度土壤水分状况均会有差异。由于阴坡水分条件好于阳坡,因此,阴坡的植物生长状况往往好于阳坡,阴坡的叶片养分含量也应大于阳坡。本研究中,阴坡和阳坡刺槐林的土壤 C、N、P 差异不显著($P>0.05$),这与连纲等^[49]的研究一致。由于阴坡和阳坡的土壤 C、N、P 差异不显著,因此,阴坡和阳坡的刺槐枯落叶 C、N、P 差异也不显著($P>0.05$)。

4 结论

陕西黄土高原刺槐枯落叶 C、N 随纬度升高显著下降,刺槐枯落叶 P 随纬度升高无明显变化,这与刺槐林土壤 C、N、P 随纬度变化趋势一致。刺槐枯落叶 C、N、P 之间显著正相关;刺槐枯落叶 C:N、C:P、N:P 较低,且随着纬度升高,无明显变化。刺槐枯落叶 C、N、P、C:N、C:P、N:P 在阴坡和阳坡之间差异不显著。本研究,阴坡和阳坡的刺槐枯落叶 N:P 均较低,且刺槐林土壤全氮平均含量低于全国水平,推测陕西黄土高原刺槐林的生长可能主要受到氮素的限制。

References:

- [1] Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [2] Zeng D H, Chen G S. Ecological stoichiometry: a science to explore the complexity of living systems. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(6): 1007-1019.
- [3] Mo F, Wang Y H, Xiong W, Yu P T, Pan W, Wang J, Xu L H. Spatial variation of litter mass for pure plantation of *larix principis-rupprechtii* in the Liupan Mountains. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(9): 1-5.
- [4] Ma X H, Jiao J Y, Bai W J, Jiao F, Wen Z M. Contribution of soil nutrient in abandoned lands to vegetation restoration in hilly and gully regions on the Loess Plateau. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2005, 25(2): 328-335.
- [5] Fu X L, Shao M A, Wei X R, Horton R. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in northern Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2010, 155(1/2): 31-35.
- [6] Peng W Y, Zhang K L, Chen Y, Yang Q K. Research on soil quality change after returning farmland to forest on the loess sloping croplands. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(2): 272-278.
- [7] Wang K B, Shi W Y, Shangguan Z P. Effects of natural and artificial vegetation types on soil properties in Loess Hilly region. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(15): 80-86.
- [8] Zhang S Q, Wang G D, Liu J J, Guo M C. Soil hydro-physical properties of *Robinia pseudoacacia* plantation forestland in Loess Plateau. *Journal of Northwest Forestry University*, 2004, 19(3): 11-14.
- [9] Qin J, Shangguan Z P. Leaf nutrient contents and photosynthetic physiological characteristics under *Ulmus pumila* and *Robinia pseudoacacia* mixed plantation. *Ecological Science*, 2012, 31(2): 121-126.
- [10] Wang L, Shao M A, Li Y Y. Study on relationship between growth of artificial *Robinia pseudoacacia* plantation and soil desiccation in the Loess Plateau of northern Shaanxi Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(1): 84-91.
- [11] Wang D H, Zhao Z, Li J. Difference of surface area of fine roots of *Robinia pseudoacacia* in the different climate regions of Loess Plateau. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(5): 70-76.
- [12] Zhao Z, Cheng X R, Xue W P, Wang D H, Yuan Z F. Difference of fine root vertical distribution of *Robinia pseudoacacia* under the different climate regions in the Loess Plateau. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(11): 1-7.
- [13] Hu X N, Zhao Z, Yuan Z F, Li J, Guo M C, Wang D H. A model for fine root growth of *Robinia pseudoacacia* in the Loess Plateau. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(4): 126-132.
- [14] Zheng S X, Shangguan Z P. Photosynthetic physiological adaptabilities of *pinus tabulaeformis* and *Robinia pseudoacacia* in the Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(1): 16-22.
- [15] Zheng Y, Zhao Z, Zhou H, Zhou J J. Effects of sunny and cloudy days on photosynthetic and physiological characteristics of black locust. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(5): 60-67.
- [16] Zheng Y, Zhao Z, Zhou H, Zhou J J. Spatial heterogeneity of canopy photosynthesis in black locust plantations. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(23): 6399-6408.
- [17] Hao W F, Han R L, Shan C J, Liang Z S. Study on the variation law of soil water in artificial locust woodland under different habitats of Loess Plateau in northern Shaanxi. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, 23(6): 964-968.
- [18] Zhao Z, Li J, Yuan Z F, Hu X N, Cao Y, Wang D H. A model used to describe vertical change of soil moisture of *Robinia pseudoacacia* plantations growing in the loess gully slope. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(10): 9-13.

- [19] Wang Z, Liu G B, Xu M X. Effect of revegetation on soil organic carbon concentration in deep soil layers in the hilly Loess Plateau of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(14): 3947-3952.
- [20] Ma X X, Xu M X, Yang K. Soil organic carbon mineralization of black locust forest in the deep soil layer of the hilly region of the Loess Plateau, China. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2012, 33(11): 3893-3900.
- [21] Zhang J Q, Su Y Q, Kang Y X, Xu X M, Qin Y. Carbon sequestration of young *Robinia pseudoacacia* plantation in Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(12): 2911-2916.
- [22] Wang K B, Shangguan Z P. Seasonal variations in leaf C, N, and P stoichiometry of typical plants in the Yangou watershed in the loess hilly gully region. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(17): 4985-4991.
- [23] Li J Y, Yu J J, Ye X F, Shi S S, Wang L, Ma J H, Wang W N. Correlation between tobacco leaf chemical compositions and latitude in Sichuan Tobacco Region. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(11): 1494-1499.
- [24] Liu J G, Xue J H. Effects of slope aspect on plant community characteristics of vetiveria zizanioides slope-protection land. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(3): 384-388.
- [25] Han W X, Fang J Y, Guo D L, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377-385.
- [26] Ren S J, Yu G R, Tao B, Wang S Q. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 654 terrestrial plant species in NSTEC. *Environmental Science*, 2007, 28(12): 2665-2673.
- [27] Ren S J, Yu G R, Tao B, Guan L L, Fang H J, Jiang C M. Spatial patterns for variations in leaf nutrient contents of Dahurian Larch (*Larix gmelinii* Rupr.). *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 1989-1906.
- [28] Liu M X, Wang G. N and P stoichiometry of plant and soil on slope direction gradient of sub-alpine meadows. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2012, 48(3): 70-75.
- [29] Liu M X, Ma J Z. Study on plant leaf N:P stoichiometry features from shady slope to sunny slope gradient. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(3): 139-145.
- [30] Bao S D. *Soil and Agro-Chemistry Analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [31] Lin B, Liu Q, Wu Y, Pang X Y, He H. Effect of forest litters on soil physical and chemical properties in subalpine coniferous forests of western Sichuan. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2003, 9(4): 346-351.
- [32] Qiu Y, Fu B J, Wang J, Chen L D. Spatiotemporal variation and influencing factors of soil nutrients of small watershed in Loess Plateau. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(3): 294-299.
- [33] Zhang S Q, Wang G D, Zhang L. Time-space distributive feature of soil nutrient and chemical characteristics of *Robinia pseudoacacia* L. plantation forestland in Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(5): 91-95.
- [34] Dang Y A, Li S Q, Wang G D, Shao M A. Distribution characteristics of soil total nitrogen and soil microbial biomass nitrogen for the typical types of soils on the Loess Plateau. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(6): 1020-1027.
- [35] Wang J, Fu B J, Qiu Y, Chen L D, Yu L. Spatial distribution patterns of soil nutrients in a small catchment of the Loess Plateau—Kriging method. *Geographical Research*, 2003, 22(3): 373-379.
- [36] Tu X M, Cao J J, Han Y M, Shen Z X, Zhang B C. Storage and spatial distribution of organic and inorganic carbon in the topsoil of Loess Plateau. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(2): 114-118.
- [37] Xu M X, Liu G B. The characteristics and evolution of soil nutrient in artificial black locust (*Robinia pseudoacacia*) forest land in the hilly Loess Plateau. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(1): 40-46.
- [38] Zhang C, Tian H Q, Liu J Y, Wang S Q, Liu M L, Pan S F, Shi X Z. Pools and distributions of soil phosphorus in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(1): GB1020, doi: 10.1029/2004GB002296.
- [39] McGroddy M E, Daufresne T, Hedin L O. Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial redfield-type ratios. *Ecology*, 2004, 85(9): 2390-2401.
- [40] He J S, Fang J Y, Wang Z H, Guo D L, Flynn D F B, Geng Z. Stoichiometry and large-scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grassland biomes of China. *Oecologia*, 2006, 149(1): 115-122.
- [41] Pan F J, Zhang W, Wang K L, He X Y, Liang S C, Wei G F. Litter C:N:P ecological stoichiometry character of plant communities in typical Karst Peak-Cluster Depression. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(2): 335-343.
- [42] Yan E R, Wang X H, Guo M, Zhong Q, Zhou W. C:N:P stoichiometry across evergreen broad-leaved forests, evergreen coniferous forests and deciduous broad-leaved forests in the Tiantong region, Zhejiang Province, eastern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 48-57.
- [43] Elser J J, Acharya K, Kyle M, Cotner J, Makino W, Markow T, Watts T, Hobbie S, Fagan W, Schade J, Hood J, Sterner R W. Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota. *Ecology Letters*, 2003, 6(10): 936-943.
- [44] Makino W, Cotner J B, Sterner R W, Elser J J. Are bacteria more like animals or plants? Growth rate and resource dependence of bacterial C:N:P stoichiometry. *Functional Ecology*, 2003, 17(1): 121-130.
- [45] Zheng S X, Shangguan Z P. Spatial patterns of leaf nutrient traits of the plants in the Loess Plateau of China. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(8): 965-973.

- [46] Ma Y H, Guo S L, Yang Y L, Wang X L, Yang G. Influence of vegetation types on soil organic C at Yangou catchment in the loess hilly—gully region. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(1): 97-105.
- [47] Yan E R, Wang X H, Zhou W. N:P stoichiometry in secondary succession in evergreen broad-leaved forest, Tiantong, east China. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(1): 13-22.
- [48] Xu Q, Rui W Y, Liu J L, Liu Z, Yang L, Yin Y J, Zhang W J. Spatial variation of coupling characteristics of soil carbon and nitrogen in farmland of China. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(3): 57-60.
- [49] Lian G, Guo X D, Fu B J, Hu C X. Spatial variability and prediction of soil nutrients on a county scale on the Loess Plateau—A case study of Hengshan County, Shaanxi Province. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(4): 577-584.
- [16] 郑元, 赵忠, 周慧, 周靖靖. 刺槐树冠光合作用的空间异质性. *生态学报*, 2010, 30(23): 6399-6408.
- [17] 郝文芳, 韩蕊莲, 单长卷, 梁宗锁. 黄土高原不同立地条件下人工刺槐林土壤水分变化规律研究. *西北植物学报*, 2003, 23(6): 964-968.
- [18] 赵忠, 李剑, 袁志发, 胡小宁, 曹扬, 王迪海. 黄土沟坡刺槐林地土壤水分垂直变化的数学模型. *林业科学*, 2009, 45(10): 9-13.
- [19] 王征, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳的影响. *生态学报*, 2010, 30(14): 3947-3952.
- [20] 马昕昕, 许明祥, 杨凯. 黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探. *环境科学*, 2012, 33(11): 3893-3900.
- [21] 张景群, 苏印泉, 康永祥, 徐喜明, 秦乐. 黄土高原刺槐人工林幼林生态系统碳吸存. *应用生态学报*, 2009, 20(12): 2911-2916.
- [22] 王凯博, 上官周平. 黄土丘陵区燕沟流域典型植物叶片 C、N、P 化学计量特征季节变化. *生态学报*, 2011, 31(17): 4985-4991.
- [23] 李佳颖, 于建军, 叶协锋, 史双双, 王龙, 马君红, 王伟宁. 四川烟区烟叶化学成分与纬度相关性研究. *中国生态农业学报*, 2012, 20(11): 1494-1499.
- [24] 刘金根, 薛建辉. 坡向对香根草护坡地植物群落特征的影响. *生态学杂志*, 2009, 28(3): 384-388.
- [26] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 王绍强. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究. *环境科学*, 2007, 28(12): 2665-2673.
- [27] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 官丽莉, 方华军, 姜春明. 兴安落叶松 (*Larix gmelinii* Rupr.) 叶片养分的空间分布格局. *生态学报*, 2009, 29(4): 1989-1906.
- [28] 刘旻霞, 王刚. 高山草甸坡向梯度上植物群落与土壤中的 N、P 化学计量学特征. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2012, 48(3): 70-75.
- [29] 刘旻霞, 马建祖. 阴坡——阳坡梯度上的植物叶片 N:P 化学计量学特征研究. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(3): 139-145.
- [30] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [31] 林波, 刘庆, 吴彦, 庞学勇, 何海. 川西亚高山针叶林凋落物对土壤理化性质的影响. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(4): 346-351.
- [32] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 陈利顶. 黄土高原小流域土壤养分的时空变异及其影响因子. *自然科学进展*, 2004, 14(3): 294-299.
- [33] 张社奇, 王国栋, 张蕾. 黄土高原刺槐林对土壤养分时空分布的影响. *水土保持学报*, 2008, 22(5): 91-95.
- [34] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 邵明安. 黄土高原典型土壤全氮和微生物氮剖面分布特征研究. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(6): 1020-1027.
- [35] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 陈利顶, 余莉. 黄土高原小流域土壤养分的空间分布格局——Krigin 插值分析. *地理研究*, 2003, 22(3): 373-379.
- [36] 涂夏明, 曹军骥, 韩永明, 沈振兴, 张宝成. 黄土高原表土有

参考文献:

- [1] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [2] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索. *植物生态学报*, 2005, 29(6): 1007-1019.
- [3] 莫非, 王彦辉, 熊伟, 于澎涛, 潘伟, 王晶, 徐丽宏. 六盘山华北落叶松人工纯林枯落物储量的空间变异分析. *林业科学*, 2009, 45(9): 1-5.
- [4] 马祥华, 焦菊英, 白文娟, 焦峰, 温仲明. 黄土丘陵沟壑区退耕地土壤养分因子对植被恢复的贡献. *西北植物学报*, 2005, 25(2): 328-335.
- [6] 彭文英, 张科利, 陈瑶, 杨勤科. 黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究. *自然资源学报*, 2005, 20(2): 272-278.
- [7] 王凯博, 时伟宇, 上官周平. 黄土丘陵区天然和人工植被类型对土壤理化性质的影响. *农业工程学报*, 2012, 28(15): 80-86.
- [8] 张社奇, 王国栋, 刘建军, 郭满才. 黄土高原刺槐林地土壤水分物理性质研究. *西北林学院学报*, 2004, 19(3): 11-14.
- [9] 秦娟, 上官周平. 白榆——刺槐互作条件下叶片养分与光合生理特性. *生态科学*, 2012, 31(2): 121-126.
- [10] 王力, 邵明安, 李裕元. 陕北黄土高原人工刺槐林生长与土壤干化的关系研究. *林业科学*, 2004, 40(1): 84-91.
- [11] 王迪海, 赵忠, 李剑. 黄土高原不同气候区刺槐细根表面积的差异. *林业科学*, 2010, 46(5): 70-76.
- [12] 赵忠, 成向荣, 薛文鹏, 王迪海, 袁志发. 黄土高原不同水分生态区刺槐细根垂直分布的差异. *林业科学*, 2006, 42(11): 1-7.
- [13] 胡小宁, 赵忠, 袁志发, 李剑, 郭满才, 王迪海. 黄土高原刺槐细根生长模型的建立. *林业科学*, 2010, 46(4): 126-132.
- [14] 郑淑霞, 上官周平. 黄土高原油松和刺槐叶片光合生理适应性比较. *应用生态学报*, 2007, 18(1): 16-22.
- [15] 郑元, 赵忠, 周慧, 周靖靖. 晴天和阴天对刺槐光合生理特性的影响. *林业科学*, 2011, 47(5): 60-67.

- 机碳和无机碳的空间分布及碳储量. 干旱区资源与环境, 2012, 26(2): 114-118.
- [37] 许明祥, 刘国彬. 黄土丘陵区刺槐人工林土壤养分特征及演变. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(1): 40-46.
- [41] 潘复静, 张伟, 王克林, 何寻阳, 梁士楚, 韦国富. 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C:N:P 生态化学计量特征. 生态学报, 2011, 31(2): 335-343.
- [42] 阎恩荣, 王希华, 郭明, 仲强, 周武. 浙江天童常绿阔叶林、常绿针叶林与落叶阔叶林的 C:N:P 化学计量特征. 植物生态学报, 2010, 34(1): 48-57.
- [45] 郑淑霞, 上官周平. 黄土高原地区植物叶片养分组成的空间分布格局. 自然科学进展, 2006, 16(8): 965-973.
- [46] 马玉红, 郭胜利, 杨雨林, 王小利, 杨光. 植被类型对黄土丘陵区流域土壤有机碳氮的影响. 自然资源学报, 2007, 22(1): 97-105.
- [47] 阎恩荣, 王希华, 周武. 天童常绿阔叶林演替系列植物群落的 N:P 化学计量特征. 植物生态学报, 2008, 32(1): 13-22.
- [48] 许泉, 芮雯奕, 刘家龙, 刘智, 杨玲, 尹宇静, 张卫建. 我国农田土壤碳氮耦合特征的区域差异. 生态与农村环境学报, 2006, 22(3): 57-60.
- [49] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 虎陈霞. 黄土高原县域土壤养分空间变异特征及预测——以陕西省横山县为例. 土壤学报, 2008, 45(4): 577-584.