

# 黄土高原不同植被带刺槐生态化学计量特征

乔雨宁<sup>1</sup>, 董从国<sup>1</sup>, 黄敏<sup>2</sup>, 曹扬<sup>1,3</sup>, 陈云明<sup>1,3</sup>, 吴旭<sup>3</sup>, 薛文艳<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;  
2.延安市林业工作站, 陕西 延安 716000; 3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**为阐释刺槐(*Robinia pseudoacacia*)人工林在不同植被带下的化学计量特征,明确气候因素对其的影响,采用样地调查与实验室分析结合处理的方法对黄土高原森林带、森林草原带、草原带中刺槐人工林的叶片、枯落物及土壤进行 C、N、P 含量测定,分析了化学计量比,同时剖析了气候因子与各元素之间的关系。结果表明:(1)不同组分 C、N、P 含量差异均显著,表现为叶片>枯落物>土壤,各植被带内养分含量表现各异,其中森林草原带叶片与土壤养分含量处于最高水平。(2)同植被带 C/P 与 N/P 均呈现出叶片与枯落物显著高于土壤的趋势,而植被带间各组分化学计量比差异程度不同。(3)各植被带养分含量在叶片—枯落物—土壤间均具有一定的相关性,表明养分在生态系统内持续流动。(4)叶片 C、N、P 含量随着年均降水(MAP)和年均温度(MAT)的升高而降低,而枯落物与之表现出相反的趋势,土壤养分随年均太阳辐射量(MASR)增大而降低。研究结果为深入探索黄土高原刺槐人工林养分在空间上的耦合机制提供一定的参考依据。

**关键词:**生态化学计量; 植被带; 刺槐人工林; 叶片—枯落物—土壤系统; 气候因子

中图分类号:S792.27; S714.8

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)04-0031-08

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2020.04.005

## Ecological Stoichiometric Characteristics of *Robinia pseudoacacia* in Different Vegetation Zones on the Loess Plateau

QIAO Yuning<sup>1</sup>, DONG Congguo<sup>1</sup>, HUANG Min<sup>2</sup>, CAO Yang<sup>1,3</sup>,  
CHEN Yunming<sup>1,3</sup>, WU Xu<sup>3</sup>, XUE Wenyan<sup>1</sup>

(1.State key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Yan'an Forest Station, Yan'an, Shaanxi 716000, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** To understand stoichiometric characteristics of *Robinia pseudoacacia* plantation in different vegetation zones, clarify the impact of climatic factors, forest, forest steppe and steppe zones on the Loess Plateau were selected to study C, N and P contents of the leaf, litter and soil of *Robinia pseudoacacia* plantation and analyze stoichiometric ratios by combining field investigations and laboratory analyses, meanwhile, analyze the relationship between climatic factors and various elements. The results show that: (1) there are significant differences in contents of C, N and P of different components, and the contents decreases in the order: leaf>litter>soil; in addition, the nutrients of each vegetation zone are different, among which the nutrient contents of leaf and soil in forest & steppe zone are the highest level; (2) in the same vegetation zone, C/P and N/P of leaf and litter are significantly higher than those of the soil, and stoichiometric ratios of components in different vegetation zones are different; (3) the nutrient contents of each vegetation zone have a certain correlation between leaf, litter and soil, indicating that nutrient continues to flow in the ecosystem; (4) contents of C, N and P of leaf decrease with the increase of annual precipitation (MAP) and annual average temperature (MAT), litter is on the contrary, nutrient contents show the significant positive correlation with MAP and MAT, respectively, while litter presents the opposite trend, and soil nutrients decrease with the increase of annual average solar radiation. These results can provide the reference for exploring the spatial coupling mechanism of the nutrient of *Robinia pseudoacacia* plantation on the Loess Plateau.

收稿日期:2019-07-14

修回日期:2019-09-21

资助项目:国家自然科学基金(41771556);国家重点研发计划课题(2016YFC0501703);陕西省水保研发项目(2017sbkj-01)

第一作者:乔雨宁(1994—),男,陕西西安人,硕士研究生,研究方向为水土保持工程。E-mail:brooklyn941127@outlook.com

通信作者:陈云明(1967—),男,陕西渭南人,研究员,博士生导师,主要从事植被生态与水土保持研究。E-mail:ymchen@ms.iswc.ac.cn

**Keywords:** ecological stoichiometry; vegetation zone; *Robinia pseudoacacia* plantation; leaf-litter-soil system; climatic factors

生态化学计量学主要通过通过对生态系统中碳(C)、氮(N)、磷(P)等化学元素的耦合过程及化学计量比(C/N, C/P, N/P)揭示元素之间的交互效应及制约因素<sup>[1-3]</sup>。我国学者 Han 等<sup>[4]</sup>最早研究出较大区域范围植物化学计量特征具有不同的规律性差异,经过深入探索,该理论逐渐在草地与森林等生物地理群落趋于完善<sup>[5-7]</sup>。森林是构造最完备的系统,内部生态过程错综复杂,其最主要的两个部分分别为土壤及植物<sup>[8]</sup>。土壤供给地上植被生长吸收所需养分,通过落叶和枯落物的形式,将已分解养分转移至土壤,从而调控土壤自身养分利用状态,构成地上植被—枯落物—土壤的生态系统连续体<sup>[9]</sup>。因此,生态计量学为森林系统生态过程中有机 C 及主要养分间的动态平衡与循环机理提供一种重要的研究手段。

目前,国内外森林系统植物化学计量研究已涉及多个层面及范畴。例如,Reich 等<sup>[10]</sup>分析了全球范围 1 280 种植物 N, P 叶片化学计量特征;王晶苑等<sup>[11]</sup>在我国范围内量化了 4 种典型森林系统叶片与枯落物间化学计量的差异性;崔高阳等<sup>[12]</sup>通过在陕西境内布设 121 个典型样点,得出了不同树种在植物体各组分间养分循环特征及 N, P 元素间紧密的联系;Zhang 等<sup>[13]</sup>研究了西北暖温带森林不同植物叶片—枯落物—土壤生态系统化学计量特征,结果表明三者养分间存在相互作用;淑敏等<sup>[14]</sup>分析了不同年限樟子松人工林各组分间 C, N, P 化学计量特征,结果表明年限对不同组分化学计量有显著影响;李慧等<sup>[15]</sup>通过分析不同年限刺槐人工林小型生态系统化学计量特征,得出各组分间应对生长年限的增长而改变自身养分含量的机制有所差异;赵姗宇等<sup>[16]</sup>研究了沙地樟子松人工林对 4 种降水梯度下化学计量特征的响应结果,得出叶片 C, N, P 随降水量的变化关系不一致;温培才等<sup>[17]</sup>对西南喀斯特森林系统进行研究,得出化学计量特征与气候因子相关性较强。综上所述,目前在不同树种间养分特征、不同生长年限乔木养分差异及气候因子影响下的养分变化规律研究较多,但针对不同植被带,气候因子对植物生态系统内部化学计量影响的研究还有所不足,而植物养分含量的差异主要是温度、降水等区域水热变化效应的长期影响综合作用产生的结果。

刺槐(*Robinia pseudoacacia*)由于其发达的根系、较快的生长速度对提升黄土高原的水土保持效益具有显著的作用。前人已发现由于人为干扰及过高的初植密

度而导致刺槐人工林林分单一,易形成“小老树”<sup>[18]</sup>;刺槐 80—150 cm 土层水分损耗最大,易使土壤形成“干层”<sup>[19]</sup>。量化养分指标,阐明刺槐养分动态循环机理可以优化刺槐人工林的结构。目前有关刺槐人工林养分特征的研究覆盖较大,主要有:刺槐各组分或器官、不同年限、林下土壤的化学计量关系,刺槐养分动态与气象因子之间的关系,然而,对不同植被带刺槐人工林系统养分动态特征的研究相对较少,因此,通过本研究,试图回答以下科学问题,即生长在不同植被带的刺槐相同组分化学计量特征、不同组分在相同植被带化学计量特征是否存在显著差异?同植被带不同组分 C, N, P 含量是否相关?各植被带不同组分 C, N, P 含量对气候因子有何响应?因此,本文选择黄土高原森林带、森林草原带、草原带的刺槐人工林为研究对象,分析“叶片—枯落物—土壤”连续体 C, N, P 化学计量特征,旨在揭示区域变化森林系统养分循环机理,阐释刺槐人工林与气候因子的反馈机制,为黄土高原不同区域人工林的空间动态管理提供基础。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 研究区概况及样地布设

有资料表明,陕西省植被区由南向北主要划分为亚热带常绿阔叶林区、暖温带落叶阔叶林区、温带草原区 3 个大区,在上述区域中,根据植被地带不同,又分为森林带、森林草原带与草原带<sup>[20]</sup>,本研究分别选取宜川县、安塞县与绥德县作为 3 种植被带的典型采样点(图 1)。3 个样点均位于陕西省延安市,属山地丘陵沟壑区,空间范围为暖温带半湿润区至温带大陆性半干旱区,具有明显的地带性差异。多年平均降雨量 486~568 mm,年内降雨分配不均,且多集中在 7—9 月,自南向北降雨量逐渐降低,年均温度 8.8~9.9℃,气温年较差大,太阳辐射量充足,日照时长在 2 395.6~2 615.2 h 范围内。土壤类型以黄绵土及褐色森林土为主,各区人工林有刺槐、油松(*Pinus tabulaeformis*)等,灌木主要有柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等,草本植被包括丁香(*Syzygium aromaticum*)、连翘(*Forsythia suspensa*)、异叶败酱(*Patrinia heterophylla*)等优势种。

在 3 个研究区选取林木分布均匀,坡位及坡向较为相近的 19~22 a 中龄刺槐林设置典型样地,每个类型区选择 3 个样点,每个样点 3 个重复,共布设 9 个 20 m×20 m 的样方,3 个类型区共计 27 个,每个样地内按对角

线布设 3 个枯落物小样方,大小为 1 m×1 m。样地内对胸径、树高等基本信息进行调查,从延安市气象部门获取样点所在地降雨、温度等信息(表 1)。

### 1.2 样品采集与处理

在对各样地内刺槐林进行每木检尺基础上,选取接近平均胸径的 3 株长势良好刺槐作为标准采样木。于 2016 年 8 月植物生长旺季对样品进行采集,用高枝剪在标准木冠部高、中、低不同方位剪切枝条,摘取鲜叶并去除叶柄,放入自封袋均匀混装约 250 g;收集、清除每个小样方内与叶片等量地表枯落物,并用土钻钻取 1 个 0—30 cm 深的土芯。以上样品均带回实验室进行处理,对鲜叶及枯落物进行杀青、烘干及粉碎处理,土样晾干,捡除杂质并研磨,所有样品均过 0.25 mm 直径筛。全 C 含量测定方法采用重铬酸钾—外加热法测定,全 N 采用半微量凯氏定氮法测定,全 P 采用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> 消煮—钼锑抗比色分光光度计法测定。

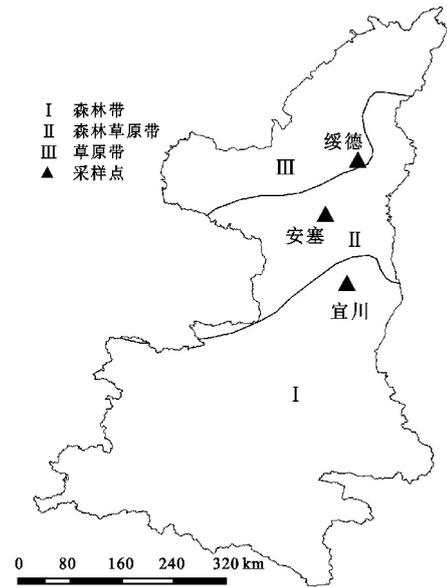


图 1 采样点位置分布

表 1 样地基本情况

项目	森林带	森林草原带	草原带
地理位置	109°41'—110°32'E, 35°42'—36°23'N	108°5'—109°26'E, 36°30'—37°19'N	109°04'—109°41'E, 37°16'—37°45'N
采样地点	宜川	安塞	绥德
年均降雨量/mm	568	505	486
年均温度/°C	9.9	8.8	9.7
平均太阳辐射/(MJ·m <sup>-2</sup> )	5014	4929	5527
平均光照时长/h	2435.6	2395.6	2615.2
林龄/a	22	20	19
平均胸径/mm	14.79	14.14	13.67
树高/m	11.74	7.34	6.44
林分密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	975	843	741

### 1.3 数据分析与处理

数据整理应用 Microsoft Excel 2016 完成,数据分析通过 SPSS 25.0 进行处理,采用 Origin 2017 软件进行图像绘制。其中,采用单因素方差(One-Way ANOVA)分析刺槐人工林 C,N,P 含量及化学计量比值的差异性,LSD 法和 Tamhane's T2 法对齐性、非齐性方差进行多重比较,显著性水平为  $p=0.05$ 。不同组分间 C,N,P 含量及化学计量特征相关性用 Pearson 法进行检验。气候因子与叶片、枯落物及土壤 C,N,P 含量的关系通过建立回归方程分析两者的相关程度。

## 2 结果与分析

### 2.1 刺槐人工林各组分 C,N,P 含量变化特征

在同植被带下,刺槐人工林各组分间均存在显著差异( $p<0.05$ ),叶片养分相比枯落物与土壤维持在较高水平,土壤的 C,N,P 含量最低(图 2)。刺槐人工林平均 C 含量在同植被带下差异显著( $p<0.05$ ),

且均表现为土壤<枯落物<叶片(图 2A),其中,叶片平均 C 含量除森林带略低于 400 g/kg 外,其余各植被带均高于此临界值,枯落物平均 C 含量均大于 200 g/kg,两者均显著大于土壤 C 含量;全 N 含量在同植被带下差异显著( $p<0.05$ ),均表现为叶片>枯落物>土壤(图 2B),叶片 N 含量除森林带略低于 30 g/kg 外,其余植被带均大于此限值,枯落物 N 含量均高于 10 g/kg,土壤全 N 较枯落物及叶片处于较低水平;全 P 含量在同植被带下差异显著( $p<0.05$ ),且均表现为叶片>枯落物>土壤(图 2C),除叶片 P 含量大于 1 g/kg 外,其余组分 P 含量变化范围为 0.5~1 g/kg。

对于相同组分,不同植被带刺槐人工林的 C,N,P 养分含量变化各异,在各植被带间未呈现出明显的规律(图 2)。刺槐人工林叶片 C 含量表现出森林带显著低于其他各植被带( $p<0.05$ ),枯落物中表现出森林带显著高于其他各植被带( $p<0.05$ ),土壤中 C 含量以草原带最小,其中森林带枯落物 C 含量为

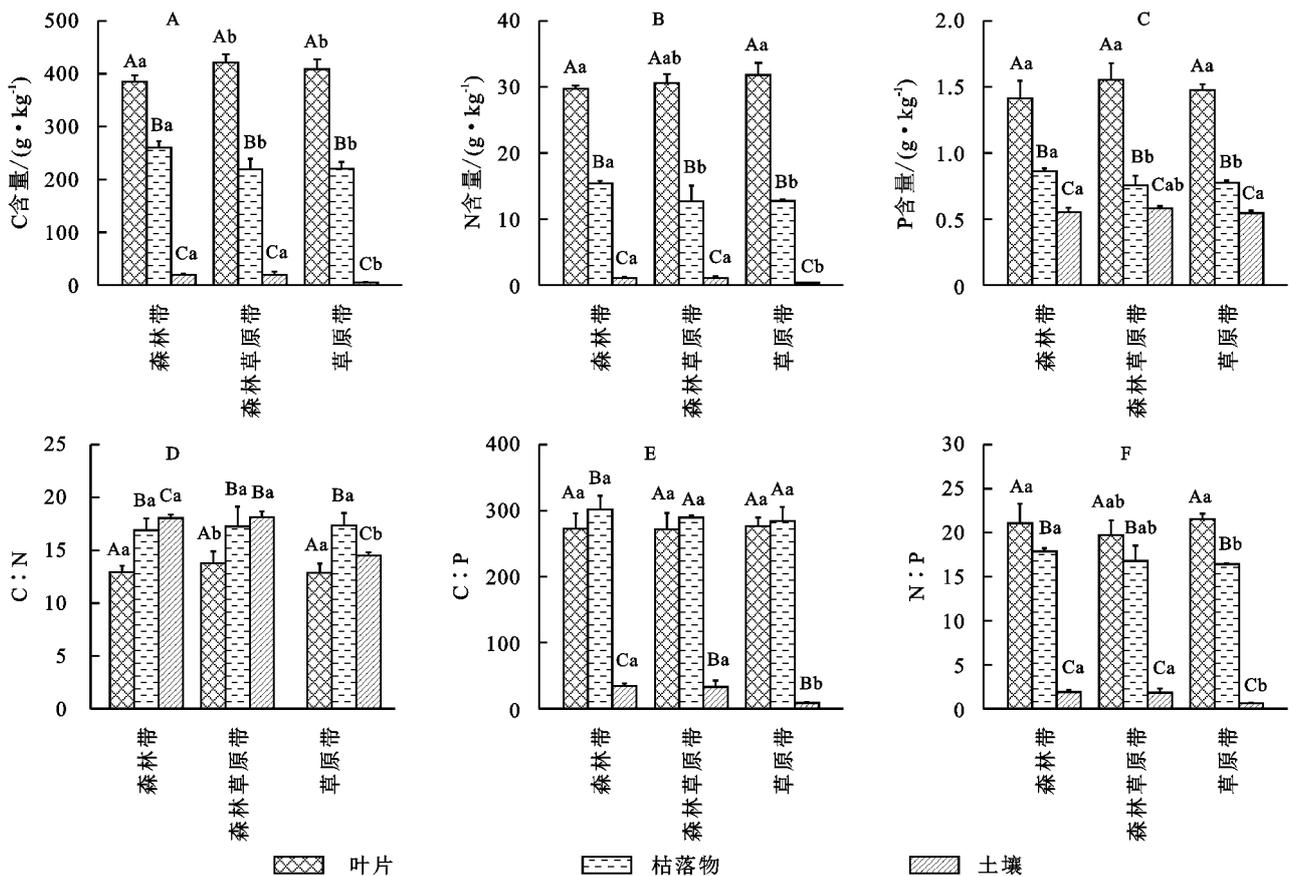
260.50 g/kg,三者有机 C 含量大小趋势表现不一致(图 2A);N 含量在刺槐人工林中具有不同的变化趋势,在叶片中表现为草原带最大,枯落物在森林带处于最高水平,森林草原带土壤 N 含量最多,其中叶片 N 含量仅表现出草原带显著大于森林带( $p < 0.05$ ),森林带枯落物 N 含量显著高于其他植被带( $p < 0.05$ ),土壤中则呈现出草原带显著低于其他植被带的规律( $p < 0.05$ )(图 2B);P 含量在各组分中变化程度较小,表现为叶片 P 含量在不同植被带间均无显著性差异,森林带枯落物 P 含量最大且显著高于其他两带( $p < 0.05$ ),土壤 P 含量仅在森林草原带与草原带表现出一定的差异( $p < 0.05$ )(图 2C)。

## 2.2 刺槐人工林各组分 C,N,P 化学计量比特征

同植被带内,刺槐人工林除 C/N 外,C/P 与 N/P 均呈现出叶片、枯落物显著高于土壤( $p < 0.05$ )(图 2)。刺槐人工林 C/N 在森林带及森林草原带表现为土壤 > 枯落物 > 叶片的趋势,草原带中以枯落物 C/N 最高,叶片最低,其中,森林草原带叶片 C/N 显著低于枯落物与土壤( $p < 0.05$ ),草原带中两两组分差异显著( $p < 0.05$ )(图 2D);刺槐人工林 C/P 在各植被带内变化具有一致性,均表现为枯落物 > 叶片 > 土壤,其中,各植被带内枯落物 C/P 分别为土壤的 8.8,8.7,

31.5 倍,森林带内两两组分差异显著( $p < 0.05$ ),森林草原带与草原带内叶片与枯落物无显著性差异(图 2E);与 C/N 和 C/P 不同,刺槐人工林各组分 N/P 均有显著差异( $p < 0.05$ ),呈现出叶片 > 枯落物 > 土壤的趋势,其中在各植被带中,与枯落物 N/P 相比,叶片高出其 18.7%,18.6%,31.0%,土壤低于其 8.4,8.1,25.5 倍(图 2F)。

刺槐人工林各组分化学计量比在不同植被带表现出不同的差异(图 2)。各组分 C/N 均以森林草原带最大,其中,叶片表现出显著高于其余两带的趋势( $p < 0.05$ ),枯落物未在各植被带间表现出显著的差异,均值为 17.16,土壤 C/N 呈现出森林带及森林草原带显著大于草原带的趋势( $p < 0.05$ )(图 2D);各组分 C/P 除土壤表现出森林带、森林草原带显著高于草原带外( $p < 0.05$ ),其余组分均未在各带间达到显著水平,叶片与枯落物 C/P 均值分别为 273.51,291.99,枯落物 C/P 在各植被带中均处于最高水平(图 2E);各组分 N/P 的变化规律不一致,其中,叶片 N/P 仅在森林草原带呈现出显著低于草原带的趋势( $p < 0.05$ ),枯落物 N/P 仅在森林带与草原带中存在显著差异( $p < 0.05$ ),土壤 N/P 则以草原带低于其余两带表现出显著差异性( $p < 0.05$ )(图 2F)。



注:大写字母表示同一植被带不同组分间差异显著( $p < 0.05$ ),小写字母表示同一组分不同植被带间差异显著( $p < 0.05$ )。

图 2 刺槐人工林 C,N,P 含量及化学计量比

### 2.3 刺槐人工林各组分 C,N,P 含量的相关性

对叶片—枯落物—土壤连续体的养分含量进行了 Pearson 相关性分析(表 2),在刺槐人工林中,C 含量仅在森林草原带中枯落物与土壤,草原带中叶片与枯落物呈极显著正相关( $p < 0.01$ ),而在其他组分间均为负相关关系,其中,森林草原带内叶片与枯落物、叶片与土壤,草原带内叶片与土壤表现出较强的显著性( $p < 0.05$ );N 含量除在森林带、草原带内叶片与土壤呈现负相关外,其他各植被带组分间均表现出正相关性,其中森林草原带两两组分间表现出极显著正相关( $p < 0.01$ );P 元素在森林带与森林草原带各组分间存在正相关关系,其中,森林带各组分间呈现极显著正相关( $p < 0.01$ ),森林草原带中除叶片与土壤存在极显著正相关( $p < 0.01$ ),其余组分间均未呈现显著相关性,草原带中叶片与土壤表现出极显著正相关( $p < 0.01$ ),而其余各组分虽呈现负相关但未表现出显著性。

表 2 刺槐人工林养分含量及化学计量的相关性( $n=9$ )

元素	组分	森林带	森林草原带	草原带
C	叶片与枯落物	-0.623	-0.765*	0.833**
	叶片与土壤	-0.028	-0.767*	-0.766*
	枯落物与土壤	-0.654	0.980**	-0.320
N	叶片与枯落物	-0.727*	0.983**	-0.154
	叶片与土壤	0.340	0.990**	0.461
	枯落物与土壤	0.335	0.976**	0.650
P	叶片与枯落物	0.897**	0.360	-0.128
	叶片与土壤	0.978**	0.935**	0.832**
	枯落物与土壤	0.940**	0.158	-0.369

注:\*代表  $p < 0.05$ ,\*\*代表  $p < 0.01$ 。

### 2.4 刺槐人工林各组分 C,N,P 含量与影响因子的关系

各组分 C,N 含量均与 MAP 之间存在极显著的相关性( $p < 0.01$ ),其中叶片呈现极显著负相关,枯落物与土壤表现出极显著正相关,枯落物中仅有 P 元素与 MAP 表现出极显著正相关(表 3);MAT 与各组分相关性表现不一致,其中,叶片 C,P 元素与 MAT 呈现出极显著的负相关( $p < 0.01$ ),枯落物各元素均与 MAT 存在显著正相关( $p < 0.05$ ),土壤中仅有 P 元素与 MAT 表现出极显著负相关( $p < 0.01$ )(表 3);枯落物各元素含量与 MASR 均未表现出显著相关,叶片仅 N 含量与 MASR 间呈现极显著正相关( $p < 0.01$ ),土壤各元素含量均与 MASR 有显著负相关性( $p < 0.05$ )(表 3)。依据各组分的元素含量与影响因子表现出的显著相关做进一步回归分析,选取较好的拟合效果绘制二者关系曲线(图 3)。

表 3 各组分养分含量与影响因子的相关性( $n=27$ )

组分	元素	MAP	MAT	MASR
叶片	C	-0.621**	-0.640**	0.030
	N	-0.558**	-0.051	0.508**
	P	-0.376	-0.511**	-0.095
枯落物	C	0.803**	0.559**	-0.286
	N	0.725**	0.485*	-0.276
	P	0.718**	0.595**	-0.168
土壤	C	0.606**	-0.326	-0.902**
	N	0.610**	-0.321	-0.901**
	P	0.068	-0.540**	-0.427*

注:\*代表  $p < 0.05$ ,\*\*代表  $p < 0.01$ ;MAP 代表年均降雨量(mm);MAT 代表年均温度( $^{\circ}\text{C}$ );MASR 代表年均太阳辐射量( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )。

## 3 讨论

### 3.1 各组分 C,N,P 含量变化特征

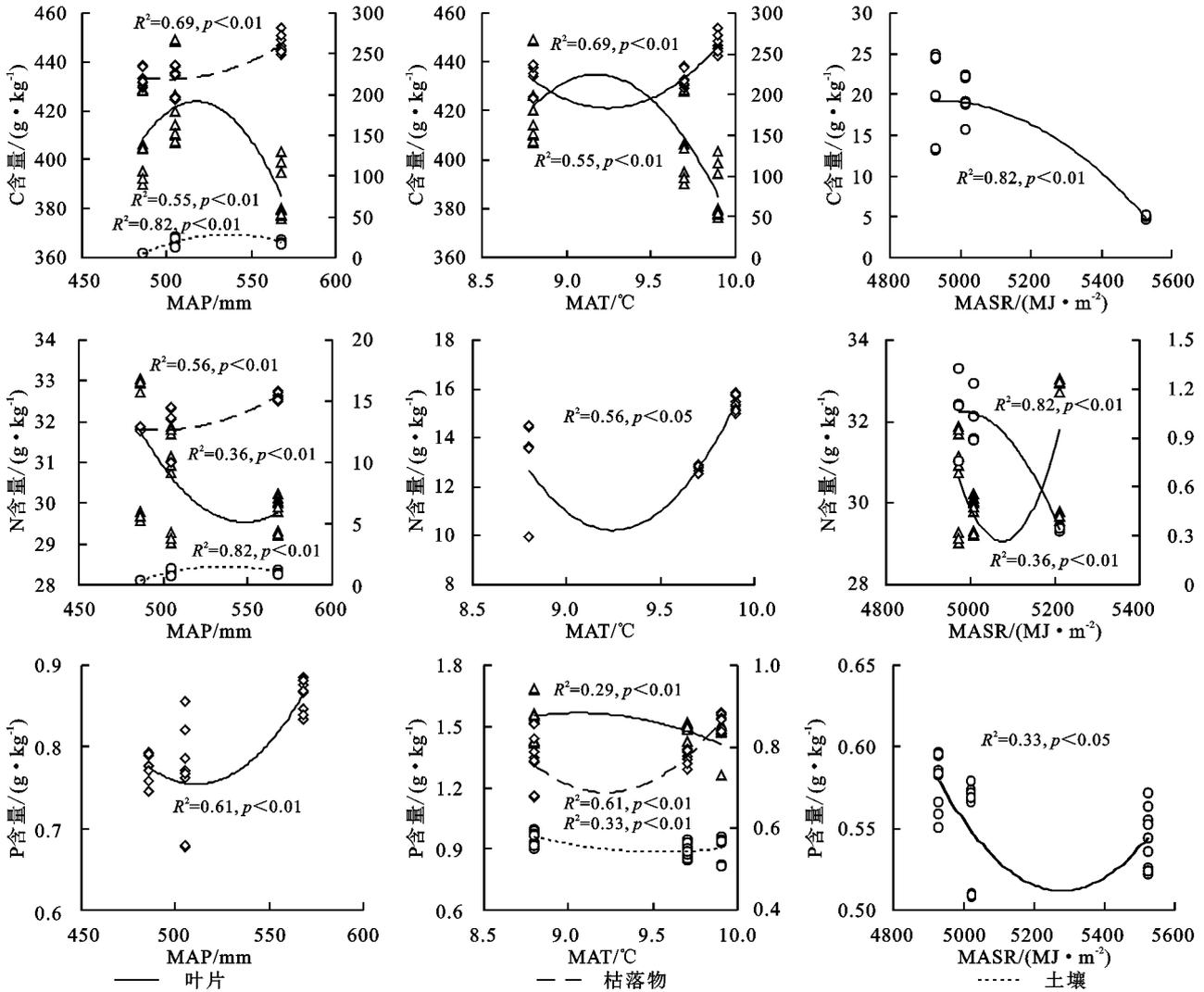
在刺槐人工林生长过程中,叶片是养分循环中对外界条件响应最敏感的因子,在其凋落之前,会将养分提前转移至新鲜组织避免不必要的损失<sup>[21]</sup>,而植物对林下土壤养分的再利用受制于枯落物的分解速度及生物量大小<sup>[22]</sup>。本研究中刺槐人工林 C,N,P 含量在不同组分间差异显著且表现出叶片 > 枯落物 > 土壤的趋势,与杨佳佳等<sup>[23]</sup>研究结果保持一致。本研究发现各植被带 P 含量在各组分间虽表现出显著差异,但在数值上相较 C,N 含量处于较低水平,原因可能是 P 在生态系统内主要来源与循环特性造成的<sup>[24]</sup>。

叶片 C 平均含量(405.06 g/kg)小于黄土高原叶片 C 含量(438 g/kg)<sup>[25]</sup>,说明黄土高原特有的气候及刺槐人工林内较为贫乏的物种多样性导致有机质合成缓慢;叶片 N 含量远大于黄土高原叶片 N 含量(24 g/kg)<sup>[26]</sup>,与刺槐良好的固氮效果有直接关系;P 作为刺槐生长的限制性元素,叶片 P 低于黄土高原叶片 P 含量(1.6 g/kg)<sup>[27]</sup>。本研究枯落物平均 C,N,P 含量与陕西省木本叶片、枯落物各元素含量变化特征类似<sup>[28]</sup>,这是由于枯落物是散落地表上的植物枯枝落叶,在微环境、影响因子相似条件下,枯落物养分含量接近叶片含量的变化趋势。土壤平均 C 含量高于黄土高原刺槐 C 含量,原因可能是由于刺槐在不同生长环境下水热状况迥异造成的,土壤平均 N,P 含量与黄土高原基本一致<sup>[29]</sup>。

本研究发现刺槐人工林枯落物 C 含量表现出森林带显著高于其他各植被带的趋势,原因可能是由于枯落物 C 积极响应降水及太阳辐射共同作用;由于太阳辐射能够显著影响叶片 N 的合成,故在光照充分的草原带刺槐叶片 N 含量显著高于降水充沛的森林带,降水与枯落物 N 呈正比<sup>[30]</sup>,森林带枯落物 N 显著大于其他各植被

带,有研究表明,干旱、半干旱地区中,枯落物分解速率与降水的关系最为显著<sup>[31]</sup>,而草原带降水量最低,这可能是导致土壤 N 含量在草原带显著低于其他各植被带的原因;枯落物 P 含量与 C、N 含量变化特征

保持一致,土壤 P 含量在森林草原带与草原带差异显著,原因可能是由于森林草原带物种多样性在 3 种植被带中最为丰富,枯落物覆盖厚度最大,降低了降水对土壤表层 P 元素的淋融侵蚀。



注:双纵坐标下,主坐标代表叶片含量,次坐标代表枯落物及土壤含量。

图 3 气象因子与元素含量之间的拟合关系

### 3.2 各组分 C、N、P 化学计量比特征

化学计量比可对元素间关系进行高效预测,同时也是植物体内养分受到的制约程度的量化指标<sup>[32]</sup>。本研究中,同植被带刺槐人工林 C/N 在森林带与森林草原带表现出土壤>枯落物>叶片的变化规律,刺槐的固 N 特性及叶片枯落前将部分富集养分转移是上述规律的主要原因,而草原带却呈现出枯落物 C/N 显著高于土壤的现象,其原因与草原带降水量衰减从而影响土壤 C、N 的合成处于较低水平有关;C/P 与 N/P 呈现出叶片与枯落物均显著高于土壤的趋势,这与刺槐叶片存在多种固 C 的形式、固 N 能力较强及植物体对 P 的吸收受到限制有关。

一般认为 N/P 是表示植物生长中养分局限性的参数<sup>[33]</sup>,本研究中各植被带的叶片 N/P 均>16,表

示 3 种植被带中刺槐人工林生长过程均受到 P 元素的限制<sup>[34]</sup>;叶片 C/N 和 C/P 的大小能定性地表示植物生长快慢,比值越高则说明植物对 N、P 利用的低效化<sup>[22]</sup>,本研究各植被带叶片 C/N 远低于全球尺度植物叶片平均 C/N(22.5),表明相比于大部分植被,刺槐人工林在单位时间的生长量更大;而全球平均叶片 C/P(232)均低于本研究各植被带叶片 C/P,说明刺槐对 P 的有效利用度较低<sup>[35]</sup>。森林草原带叶片 C/N 显著高于其余各带,主要原因是森林草原带叶片 C 蓄积量维持较高水平,从而主导了变化。

相关学者表明,枯落物 C/N 与枯落物养分回归土壤的快慢及营养物质的累积量有直接联系<sup>[5]</sup>,枯落物 C/P 控制着 C、P 元素的循环,枯落物 N/P 是影响

枯落物分解程度高低的关键因素之一。在本研究中枯落物 C/N, N/P 均  $< 25$ , 表明微生物在分解枯落物过程中不受 N 的限制, 枯落物分解速率较快, 但对养分贮存不利<sup>[35]</sup>。枯落物 N/P 仅表现出森林带显著高于草原带的趋势, 说明草原带枯落物分解速率较快, 这主要是由于草原带较低的降水量造成的。

有研究指出, 土壤 C/N 是评判土壤质量的重要依据, 能够预测土壤养分是否均衡, 一般而言, 随着土壤 C/N 减小, 其有机质腐殖化速度增快<sup>[36]</sup>; 土壤 C/P 作为土壤在矿化作用下 P 元素释放程度大小的指标, 与 P 的有效性成反比; 土壤 N/P 能对养分受限程度进行判定<sup>[37]</sup>。土壤 3 种化学计量比均表现出草原带显著低于森林带及森林草原带的趋势, 造成此结果的原因可能是各养分元素在应对气候变化时会产生一定的差异性。土壤 C/N 呈现出草原带  $<$  森林带  $<$  森林草原带的规律, 与曾全超等<sup>[38]</sup> 研究不一致, 可能是由于复杂的地理环境、频繁的生物活动与多种土壤有机质来源而导致的, C/P 及 N/P 表现出森林带  $>$  森林草原带  $>$  草原带的趋势, 表明森林带与森林草原带较草原带 P 具有更高的有效性。

### 3.3 各组分 C, N, P 含量的相关性

通过对刺槐人工林两两组分间的养分含量进行相关性分析, 掌握局部变量之间的联系, 有助于阐释养分间耦合有效性的强弱<sup>[34]</sup>。本研究中, 森林草原带各组分间养分含量相关性较强, 表明森林草原带小型生态系统元素库之间会保持共同的循环特征<sup>[36]</sup>。C 含量在各组分间具有一定联系, 其中, 森林草原带各组分间均呈显著相关, 草原带表现为叶片与枯落物、叶片与土壤间存在较强的相关性, 这说明植物叶片、枯落物、土壤间不断地进行有机质再分配。森林草原带各组分间 N 含量表现出极显著相关, 森林带各组分间 P 含量表现出极显著相关, 表明在降水较为丰沛地区, 叶片、枯落物与土壤的交互作用表现出三者 N, P 养分的传递性, 其中 P 元素在各植被带叶片与土壤间相关系数呈现较高势态, 与前人指出的植物 P 素在叶片与土壤间具有紧密联系保持一致<sup>[39]</sup>。另有研究发现, 植物 ATP 与 RNA 主要源于 N, P, 具有调节植物生长的功能, 不同组分间 N, P 含量均呈现出一定的相关性<sup>[40]</sup>, 与本研究不同组分间 N, P 相关性结果不完全一致, 可能是由于水热条件的差异以及当地农民对林分的人为干预, 导致刺槐人工林养分状况各异, 具体原因有待进一步研究剖析。

### 3.4 各组分 C, N, P 含量与影响因子的关系

各组分 C, N, P 含量与气象因子 MAP, MAT 及 MASR 紧密相关。本研究中, 叶片 C 含量与 MAP, MAT 呈显著负相关, 主要因为降水增多将导致植物

光合作用下降, 植物为维持体内养分平衡, 加速 C 的耗损, 同时降水会产生较低的温度, 低温会使植物光合作用减弱进而降低叶片 C 含量<sup>[6]</sup>; 叶片 N, P 含量随 MAP 的增加呈现降低趋势, 这与丁小慧等<sup>[41]</sup> 结果一致。Han 等<sup>[4]</sup> 通过分析大陆 753 种植被, 得出 MAT 与叶 N, P 元素成反比, 本研究中叶片 N 含量与 MASR 呈极显著正相关, 这是由于刺槐在应对太阳辐射量增加时, 通过在叶片类囊体和 RuBP 羧化酶中聚集更多的 N 保证刺槐正常的生长需求<sup>[42]</sup>; 叶片 P 元素与 MAT 呈负相关, 表明刺槐会通过主动增加 N, P 含量抵抗低温抑制效应<sup>[43]</sup>。枯落物 C, N, P 含量与 MAP, MAT 表现出显著正相关, 原因可能是温度升高与降水增多能促进枯落物 CO<sub>2</sub> 的呼吸交换率<sup>[44]</sup>, 枯落物 C 含量随之增大; 枯落物 N 含量与温度、降水呈显著正相关, 而 Yuan 等<sup>[45]</sup> 揭示了衰老叶片中 P 含量与 MAT, MAP 呈负相关关系, 与本研究结果相反, 可能是由于降水及高温提高枯落物的分解速率, 加速枯落物失重, 在同样质量下枯落物富集的养分更多。MASR 对枯落物养分影响较小, 原因可能是采样时间为 8 月, 正值刺槐生长最旺盛时期, 而枯落物存于林下一般接触不到太阳辐射。降水的增多能显著增加微生物活动频度, 加速对枯落物的分解, 促进土壤呼吸, 同时运送养分至土壤中, 本研究中土壤 C, N 含量与 MAP 呈显著正相关, 与王淑平等<sup>[46]</sup> 在东北样带土壤 C, N, P 含量与气候因子间关系得出的结论基本一致。本研究中 MAT 与土壤养分呈反比, 其中土壤 P 与 MAT 呈显著负相关, 可能是由于经自然修复改良后的水化光热状况会提高土壤对植被养分的补偿。MAT 可控制 MASR 的高低, 降水时数与太阳辐射量成反比, 故 MASR, MAP 与土壤养分含量的关系存在相反的结果。

## 4 结论

(1) 陕北各植被带刺槐人工林 C, N, P 含量均表现出叶片  $>$  枯落物  $>$  土壤的规律, 各组分平均含量较黄土高原略有差异, 不同植被带间养分含量变化各异, 其中, 叶片与土壤 C, N, P 含量均以森林草原带最大。

(2) 各植被带叶片 N/P 均  $> 16$ , 表明刺槐在生长过程主要受到 P 元素的限制, 较快的生长速度使其较全球植物叶片具有更低的 C/P 及 C/N, 同植被带 C/P 与 N/P 呈现出叶片与枯落物均显著高于土壤的趋势, 而不同植被带间各组分化学计量比差异程度不同。

(3) C, N, P 含量在各组分间均有一定的关系, 其中, 森林草原带养分含量在各组分间相关性较强, 但其余各植被带组分间相关程度具有一定的差异性。

(4) 叶片 N 含量与太阳辐射量呈正比, 而 C, N,

P 含量与年均降水量、年均温度均呈反比, 枯落物较叶片表现出相反的趋势, 太阳辐射量与土壤养分呈显著负相关, 降水与土壤养分呈正比。

#### 参考文献:

- [1] 周晓兵, 陶冶, 张元明. 塔克拉玛干沙漠南缘荒漠绿洲过渡带不同土地利用影响下优势植物化学计量特征[J]. 草业学报, 2018, 27(5): 15-26.
- [2] Elser J J, Dobberfuhl D R, MacKay N A, et al. Organism size, life history, and N : P stoichiometry[J]. *Bio-science*, 1996, 46(9): 674-684.
- [3] 马鑫雨, 方斌, 常艳春, 等. 阅海湿地植物叶片和土壤 C, N, P 季节动态及其累积[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 136-143.
- [4] Han W, Fang J, Guo D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New phytologist*, 2005, 168(2): 377-385.
- [5] Yang Y, Liu B R, An S S. Ecological stoichiometry in leaves, roots, litters and soil among different plant communities in a desertified region of Northern China [J]. *Catena*, 2018, 166: 328-338.
- [6] 侯阁, 孙建, 朱军涛, 等. 羌塘高原高寒草地植物地上地下碳氮生态化学计量特征及其影响因素[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(2): 187-194.
- [7] 刘瑜, 王庆贵, 邢亚娟. 温带森林叶部生态化学计量学特征研究进展[J]. 中国农学通报, 2018, 34(10): 95-100.
- [8] 赵一婷, 曹扬, 陈云明, 等. 黄土丘陵沟壑区森林生态系统生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5451-5460.
- [9] 陈亚南, 马露莎, 张向茹, 等. 陕西黄土高原刺槐枯落叶生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2014, 34(15): 4412-4422.
- [10] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [11] 王晶苑, 王绍强, 李幼兰, 等. 中国 4 种森林类型主要优势植物的 C : N : P 化学计量学特征[J]. 植物生态学报, 2011, 35(6): 587-595.
- [12] 崔高阳, 曹扬, 陈云明. 陕西省森林各生态系统组分氮磷化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2015, 39(12): 1146-1155.
- [13] Zhang G, Zhang P, Peng S, et al. The coupling of leaf, litter, and soil nutrients in warm temperate forests in northwestern China[J]. *Scientific reports*, 2017, 7(1): 1-11.
- [14] 淑敏, 王东丽, 王凯, 等. 不同林龄樟子松人工林针叶凋落叶—土壤生态化学计量特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 174-179.
- [15] 李慧, 许亚东, 王涛, 等. 不同林龄刺槐人工林植物与土壤 C, N, P 化学计量特征演变[J]. 西北农业学报, 2018, 27(11): 1651-1659.
- [16] 赵姗姗, 黎锦涛, 孙学凯, 等. 樟子松人工林原产地与不同自然降水梯度引种地土壤和植物叶片生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2018, 38(20): 7189-7197.
- [17] 温培才, 王霖娇, 盛茂银. 我国西南喀斯特森林生态系统生态化学计量学研究[J]. 世界林业研究, 2018, 31(2): 66-71.
- [18] 吴多洋, 焦菊英, 于卫洁, 等. 陕北刺槐林木生长及林下植被与土壤水分对种植密度的响应特征[J]. 西北植物学报, 2017, 37(2): 346-355.
- [19] 张建军, 李慧敏, 徐佳佳. 黄土高原水土保持林对土壤水分的影响[J]. 生态学报, 2010, 31(23): 7056-7066.
- [20] 刘静艳, 马鹏. 陕西省植被区划初步研究[J]. 陕西师大学报: 自然科学版, 1995, 23(2): 83-88.
- [21] 马任甜, 安韶山, 黄懿梅. 黄土高原不同林龄刺槐林碳、氮、磷化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(9): 2787-2793.
- [22] 郝玉琢, 周磊, 吴慧, 等. 4 种类型水曲柳人工林叶片—凋落物—土壤生态化学计量特征比较[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2019, 43(4): 101-108.
- [23] 杨佳佳, 张向茹, 马露莎, 等. 黄土高原刺槐林不同组分生态化学计量关系研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 133-142.
- [24] Crews T E, Kitayama K, Fownes J H, et al. Changes in soil phosphorus fractions and ecosystem dynamics across a long chronosequence in Hawaii [J]. *Ecology*, 1995, 76(5): 1407-1424.
- [25] Zheng S, Shanguan Z. Spatial patterns of leaf nutrient traits of the plants in the Loess Plateau of China [J]. *Trees*, 2007, 21(3): 357-370.
- [26] 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[J]. 自然科学进展, 2006, 16(8): 965-973.
- [27] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. *Nature*, 2000, 408(6812): 578-580.
- [28] 姜沛沛, 曹扬, 陈云明, 等. 不同林龄油松 (*Pinus tabulaeformis*) 人工林植物、枯落物与土壤 C, N, P 化学计量特征[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6188-6197.
- [29] 马任甜. 黄土高原刺槐、柠条人工林土壤—植物生态化学计量特征研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [30] Liu C, Berg B, Kutsch W, et al. Leaf litter nitrogen concentration as related to climatic factors in Eurasian forests [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 15(5): 438-444.
- [31] 赵娟, 刘佳楠, 常海涛, 等. 宁夏荒漠草原优势植物枯落物分解特征及其影响因素[J]. 草地学报, 2019, 27(1): 80-87.
- [32] Gusewell S. N : P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. *New Phytologist*, 2010, 164(2): 243-266.
- [33] 马任甜, 方瑛, 安韶山, 等. 黑岱沟露天煤矿优势植物叶片及枯落物生态化学计量特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(4): 1003-1014.

(下转第 46 页)

- [13] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等.2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J].地理学报,2012,67(9):1255-1268.
- [14] 李双双,延军平,万佳.近 10 年陕甘宁黄土高原区植被覆盖度时空变化特征[J].地理学报,2012,67(7):960-970.
- [15] 李占斌,朱冰冰,李鹏.土壤侵蚀与水土保持研究进展[J].土壤学报,2008,45(5):802-809.
- [16] 周为峰,吴炳方,李苗苗,等.利用植被和地形信息进行水土流失风险度评价[J].世界科技研究与发展,2005,27(5):51-55.
- [17] 周为峰.基于遥感和 GIS 的区域土壤侵蚀调查研究[D].北京:中国科学院研究生院,2005.
- [18] 曾大林,李智广.第二次全国土壤侵蚀遥感调查工作的做法与思考[J].中国水土保持,2000(1):28-31.
- [19] 陆建忠,陈晓玲,李辉,等.基于 GIS/RS 和 USLE 鄱阳湖流域土壤侵蚀变化[J].农业工程学报,2011,27(2):337-344.
- [20] 齐述华,蒋梅鑫,于秀波.基于遥感和 ULSE 模型评价 1995—2005 年江西土壤侵蚀[J].中国环境科学,2011,31(7):1197-1203.
- [21] 彭文甫,王广杰,周介铭,等.基于多时相 Landsat5/8 影像的岷江汶川—都江堰段植被覆盖动态监测[J].生态学报,2016,36(7):1975-1988.
- [22] 彭双云,杨昆,洪亮,等.基于 USLE 模型的滇池流域土壤侵蚀时空演变分析[J].农业工程学报,2018,34(10):146-154,313.
- [23] 陈学兄.基于遥感与 GIS 的中国水土流失定量评价[D];陕西杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [24] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准 SL190—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [25] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等.密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J].资源科学,2004,26(4):154-160.
- [26] 姜娜,邵明安.黄土高原小流域不同坡地利用方式的水土流失特征[J].农业工程学报,2011,27(6):36-41.
- [27] 于国强,李占斌,李鹏,等.不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J].水科学进展,2010,21(5):593-599.
- [28] 王凯,夏燕秋,马金辉.基于 CSLE 和高分辨率航空影像的孤山川流域土壤侵蚀定量评价[J].水土保持研究,2015,22(1):26-32.
- [29] 陈思旭,杨小唤,肖林林,等.基于 RUSLE 模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究[J].资源科学,2014,36(6):1288-1297.
- [30] 张雪峰,牛建明,张庆.内蒙古锡林河流域草地生态系统土壤保持功能及其空间分布[J].草业学报,2015,24(1):12-20.
- [31] 孙文义,邵全琴,刘纪远.黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价[J].自然资源学报,2014,29(3):365-376.
- [32] 张亭亭,张建军,郭敏杰.北洛河流域不同地貌和植被类型区径流演变特征及控制因素[J].水土保持学报,2014,28(4):78-84.
- [33] 周梦甜,李军,朱康文,等.近 15 a 新疆不同类型植被 NDVI 时空动态变化及对气候变化的响应[J].干旱区地理:汉文版,2015,38(4):779-787.

(上接第 38 页)

- [34] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N:P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [35] 赵维俊,刘贤德,金铭,等.祁连山青海云杉林叶片—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J].土壤学报,2016,53(2):477-489.
- [36] 向云西,陈胜魁,潘萍,等.马尾松叶片—枯落物—土壤的碳氮磷化学计量特征[J].森林与环境学报,2019,39(2):120-126.
- [37] 俞月凤,彭晚霞,宋同清,等.喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤 C, N, P 化学计量特征[J].应用生态学报,2014,25(4):947-954.
- [38] 曾全超,李鑫,董扬红,等.黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征[J].自然资源学报,2016,31(11):91-101.
- [39] 侯庆春,黄旭,韩仕峰,等.关于黄土高原地区小老树成因及其改造途径的研究Ⅲ:小老树的成因及其改造途径[J].水土保持学报,1991,5(4):80-86.
- [40] 张海鑫,曾全超,安韶山,等.黄土高原子午岭林区主要林分生态化学计量学特征[J].自然资源学报,2017,32(6):1043-1052.
- [41] 丁小慧,罗淑政,刘金巍,等.呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化[J].生态学报,2012,32(11):3467-3476.
- [42] 宋光,温仲明,郑颖,等.陕北黄土高原刺槐植物功能性状与气象因子的关系[J].水土保持研究,2013,20(3):125-130.
- [43] 任运涛,徐翀,张晨曦,等.贺兰山青海云杉针叶 C, N, P 含量及其计量比随环境因子的变化特征[J].干旱区资源与环境,2017,31(6):185-191.
- [44] 苏爱玲.气候变化对高寒草甸枯落物分解特性的影响及温度敏感性研究[D].北京:中国科学院,2010.
- [45] Yuan Z Y, Chen H Y H. Global trends in senesced-leaf nitrogen and phosphorus [J]. Global Ecology and Biogeography, 2010, 18(5):532-542.
- [46] 王淑平,周广胜,吕育财,等.中国东北样带(NECT)土壤碳、氮、磷的梯度分布及其与气候因子的关系[J].植物生态学报,2002,26(5):513-517.