

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.018.

李响, 袁志友, 焦峰. 温度和降水对中国草本植物、灌木和乔木养分重吸收特征的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 87-92.

LI Xiang, YUAN Zhiyou, JIAO Feng. Response of Nutrient Resorption of Herbs, Shrubs and Trees to Temperature and Precipitation in China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 87-92.

温度和降水对中国草本植物、灌木和乔木养分重吸收特征的影响

李响¹, 袁志友^{1,2}, 焦峰^{1,2}

(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.中国科学院 水土保持研究所水利部 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)

摘要:为进一步完善我国植物养分循环模型,收集了51篇国内外中英文文献进行meta分析,研究了草本植物、灌木、乔木氮(N)、磷(P)重吸收特征的差异及温度和降水量对其产生的影响。结果表明:(1)我国草本植物、灌木、乔木凋落叶平均N含量分别为9.05,14.91,12.72 mg/g,草本植物、灌木、乔木凋落叶平均P含量分别为0.50,0.79,0.76 mg/g。草本植物、灌木、乔木的平均N重吸收率分别为64.16%,51.97%,35.82%,草本植物、灌木、乔木的平均P重吸收率分别为65.51%,46.74%,41.72%;(2)草本植物凋落叶N、P含量显著低于灌木和乔木,但草本植物N、P重吸收率显著高于灌木和乔木,灌木N重吸收率显著高于乔木,灌木的其他养分重吸收特征与乔木没有显著差异;(3)3种生活型植物凋落叶N和P含量与年均温呈正比,而N重吸收与年均温呈反比,P重吸收率与年均温不相关。3种生活型植物凋落叶N含量和N重吸收率分别与年均降水量呈正比和反比,凋落叶P含量和P重吸收率均与年均降水量不相关。本研究草本植物较高的养分重吸收率可能说明其相较于灌木和乔木更新速率更快,不同生活型植物对生境具有不同的养分适应策略。该研究中,N的重吸收相较于P受降水和温度的影响更大,这意味着气候梯度上植物N吸收和利用的策略可能比P更灵活。植物的氮、磷重吸收特征与温度和降水的响应关系可能反映了植物对气候梯度上水热条件的适应性差异。

关键词:凋落叶养分含量;养分重吸收效率;温度;降水量;meta分析

中图分类号:Q948.11

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)02-0087-06

Response of Nutrient Resorption of Herbs, Shrubs and Trees to Temperature and Precipitation in China

LI Xiang¹, YUAN Zhiyou^{1,2}, JIAO Feng^{1,2}

(1.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the

Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract:In order to further improve the plant nutrient cycle model in China, we used meta-analyses to collect 51 published studies to explore the different N/P resorption pattern between herbs, shrubs and trees and the relationships between N/P resorption, temperature and precipitation in China. The results showed that: (1) average N contents of senesced leaves in herbs, shrubs and trees were 9.05 mg/g, 14.91 mg/g, 12.72 mg/g, respectively; average P contents of senesced leaves of herbs, shrubs and trees were 0.50 mg/g, 0.79 mg/g, 0.76 mg/g, respectively; average N resorption efficiencies of herbs, shrubs and trees were 64.16%, 51.97% and 35.82%, respectively; average P resorption efficiencies of herbs, shrubs and trees were 65.51%, 46.74% and 41.72%, respectively; (2) N and P contents of senesced leaves of herbs were significantly lower than those of shrubs and trees; N and P resorption efficiencies of herbs were significantly higher than those of shrubs and trees; N resorption efficiency of shrubs was significantly higher than that of trees;

收稿日期:2022-05-13

修回日期:2022-05-23

第一作者:李响(1997—),女,内蒙古呼和浩特人,硕士研究生,研究方向为林草生态工程研究。E-mail:lixiang1997@nwfufu.edu.cn

通信作者:袁志友(1971—),男,山东济南人,博士,研究员,主要从事生物地球化学研究。E-mail:zyyuan@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcj.paperonice.org>

There was not remarkable difference to other variables of nutrient resorption between shrubs and trees; (3) N and P contents of senesced leaves were positively correlated with temperature; there was a negative relationship between N resorption efficiency and temperature, while P resorption efficiency was not related to temperature; N content of senesced leaves and N resorption efficiency were positively and negatively correlated with precipitation, respectively; there was no correlation between P content of senesced, P resorption efficiency and precipitation; this result indicated that the high nutrient resorption efficiency of herbs might reflect that the regeneration rate of herbs was higher than that of shrubs and trees; it also indicated that different life-form plants had various nutrient adaptation strategies to the environment shifts. In this study, N resorption was more sensitive to the changes of precipitation and temperature than P resorption. It suggested that the strategy of plant N uptake and utilization might be more flexible than that of P along the climate gradients. The response of N and P resorption pattern to temperature and precipitation may imply the difference adaptability of plant to hydrothermal conditions under the climate change.

Keywords: nutrient of senesced leaves; nutrient resorption efficiency; temperature; precipitation; meta-analysis

养分重吸收(Nutrient resorption)是指植物在叶片脱落之前,养分从衰老叶片转移到贮藏器官或生长组织的过程^[1-2],它影响着植物的养分吸收、循环以及生长和繁殖等关键过程^[3],极大地提高了植物对环境的适应性。研究表明,不同生活型物种养分重吸收特征存在差异^[4],不同区域的气候条件(如温度和降水)也影响着植物的养分重吸收特征,这可能与不同植物对环境变化的适应策略的差异有关^[5]。因此,深入研究不同生活型植物养分重吸收特征的差异以及环境因素对其的影响可以增强对陆地生态系统养分循环规律和调控机制的理解。了解植物养分的留存、利用能力及其环境可塑性也能够为我国陆地生态系统的科学管理提供参考。然而,我国对植物的养分重吸收特征的研究目前多集中在特定地点或单一生活型的植物,在全国气候梯度下的不同生活型植物养分重吸收特征的对比及其对气候因子变化的响应仍有待研究。

大量研究表明,不同生活型植物的养分重吸收存在差异^[6-7]。对美国 and 欧洲植物养分重吸收的研究发现,除了常绿植物和落叶植物间的养分重吸收可能没有差异,常绿树、落叶树、禾本科和非禾本科草本植物的N、P重吸收率均存在差异^[8]。对中国北方植物的研究发现,乔木N、P重吸收率均显著高于灌木,针叶树高于阔叶树^[9]。在全球尺度上,N重吸收率则表现为禾草类>非禾草类>松柏类>落叶植物>蕨类植物>常绿植物,P重吸收率表现为禾草类>松柏类>非禾草类>蕨类>落叶植物>常绿植物^[10]。目前针对该方面的研究尚未得出一致结论。不同生活型植物的凋落物养分含量、叶面积指数和生长速率等不同可能导致了养分重吸收的差异^[7]。例如,有研究表明木本植物的N、P重吸收率低于非木本植物^[10-11],可能是因为木本植物中养分的滞留时间较非木本植物长,从而减弱了木本植物对养分重吸收的依赖^[12]。

综上,研究我国不同生活型植物养分氮、磷养分重吸收特征的差异对于揭示物种间差异化的养分利用策略具有重要的意义。

空间尺度上,气候因素(如温度和降水)对植物养分重吸收有着重要的影响^[11]。温度的变化可调节微生物呼吸及凋落物分解速率,影响土壤养分供应和植物代谢活动,从而改变植物群落水平的养分含量及化学计量比,进而导致植物养分重吸收发生变化^[13-14]。因此,不同的气候区植物养分重吸收特征可能会由于温度的变化而存在差异。降水也是限制陆地植物生长的主要非生物因子之一,降水影响着植物的气孔活动、水力传导、光合能力以及植物体内脱落酸浓度大小等诸多植物生理过程^[15],此外,降水会通过影响土壤水分和肥力状况来调控土壤养分的可利用性^[12]。从而可知,降水可能是影响植物养分吸收和重吸收的关键因子之一。Yuan等^[11]研究发现,全球的植物N重吸收率随着年平均温度和年平均降水量的增加而减少,P重吸收率却随之增加。Vergutz等^[10]研究结果显示,N和P重吸收率均随着年平均温度和年平均降水量的增加而降低。由此可见,植物养分重吸收特征对气候因子变化的响应规律仍无一致的结论。基于此,本文通过对中国有关植物叶片养分重吸收特征的研究进行整合,分析不同生活型植物养分重吸收特征的差异,以及其对温度和降水变化的响应。以期为我国植被生长的限制性养分元素的判定和养分管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据收集

本研究以中国知网文献数据库(CNKI)和Web of science数据库为检索数据来源,在中文数据库中以“养分转移”“养分重吸收”“养分回收”“温度”“降水”“空间梯度”“中国”为关键词进行检索;在英文数据库中以

“nutrient resorption”“nutrient reabsorption”“nutrient retranslocation”“temperature”“precipitation”“gradient”“China”为关键词进行检索,检索日期截至 2021 年 12 月 31 日。本研究收集了有衰老叶片养分含量和养分重吸收率的数据或可以通过文中已有数据计算养分重吸收率的研究。所选取的研究中大部分衰老叶片养分含量数据来自于新落叶,只有小部分数据来自凋落物捕集器。虽然养分淋溶偶尔会导致衰老落叶层中养分含量被低估^[16],但一项对 40 个亚北极植物种的强化淋溶试验提出:氮淋失量不超过叶片氮库的 1%,磷淋失量不到叶片磷库的 0.01%,平均氮、磷的重吸收量分别比潜在的氮和磷淋失量高 55 倍和 10 000 倍^[17]。同理,光降解和分解者对衰老叶片的分解也可能导致凋落叶的养分损失,然而,与叶片的衰老和脱落相比,光降解是一个相对缓慢的过程^[18]。同样,尽管分解者可以降解凋落叶的养分,但在大多数生态系统中,这一过程也较为缓慢^[3]。所以在缺乏更具体数据的情况下,我们假设落叶时间和采

叶时间内产生的凋落叶养分损失可以忽略不计。

我们选区的研究均以陆地植被为研究对象,包括草本植物、灌木和木本植物,且均来源于中国的天然草地或林地。为了确保数据的准确性和可比性,本研究对检索到的文献设置以下标准:(1) 文中需明确表明是植物叶片养分重吸收特征;(2) 具有明确的试验地点,且至少具有 3 个重复。此外,我们没有采纳施肥后的植物养分重吸收特征。经筛选,共纳入来自我国不同区域 51 篇中英文文献(291 条数据),收集草本植物(161 条数据)、灌木(27 条数据)和乔木(104 条数据)凋落物的 N、P 含量和 N、P 重吸收率。并同时收集了试验地点的经度、纬度、年均温及年均降水量数据。本研究所选取的文章中试验地点覆盖我国纬度范围 21°27′—47°35′N,经度范围 80°20′—113°31′E,包括新疆、西藏、云南、甘肃、青海等 20 个省份,年均温范围为−5.16~21.36℃,年均降水量范围为 29~1 919 mm(表 1)。此外,本研究中使用的生活型(life-form)的概念来源于 Eckstein 等^[19]。

表 1 3 种生活型植物养分重吸收特征及其环境因子范围值

植物类型	年均温度/℃	年均降水量/mm	凋落叶氮含量/(mg·g ⁻¹)	凋落叶磷含量/(mg·g ⁻¹)	氮重吸收率/%	磷重吸收率/%
草本植物	−2.86~17.76	29~1552	1.12~28.34	0.04~1.54	26.40~86.85	26.24~87.53
灌木	−5.16~17.47	71~1178	8.05~32.92	0.44~1.59	31.61~82.60	17.76~79.58
乔木	−2.55~21.36	386~1919	5.29~21.40	0.23~1.35	10.07~73.72	8.62~75.52

1.2 数据处理

进行数据收集时,若文献中数据以正文或表格形式列出则直接读取;若数据以图片的形式呈现,则使用 GetData Graph Digitizer (version 2.24, <http://getdata-graph-digitizer.com>)提取。采用单因素方差分析及多重比较检验不同生活型植物叶片 N、P 重吸收率、凋落物 N、P 含量的差异,使用普通最小二乘法(OLS)回归来确定年均温、年均降水量对植物叶片 N、P 重吸收率、凋落物 N、P 含量的影响。N、P 重吸收率、凋落物 N、P 含量数据在回归分析前进行了 lg 的转换。所有数据分析在软件程序 R4.0.3 版本中进行^[20],使用 Origin 9.0 作图。

2 结果与分析

2.1 不同生活型植物的养分重吸收特征

所有植物的凋落叶 N、P 含量平均值分别为 11.26, 0.65 mg/g,N、P 重吸收率平均值分别为 45.79%,47.49%。草本植物、灌木、乔木凋落叶 N 含量平均值分别为 9.05, 14.91,12.72 mg/g(表 1)。草本植物凋落叶 N 含量显著低于灌木和乔木,而灌木和乔木的凋落叶 N 含量不存在显著差异。草本植物、灌木、乔木凋落叶 P 含量平均值分别为 0.50,0.76,0.79 mg/g,灌木和乔木的凋落叶 P

含量显著高于草本植物,灌木和乔木的凋落叶 P 含量不存在显著差异(图 1)。草本植物、灌木、乔木 N 重吸收率的平均值分别为 64.16%,51.97%,35.82%。草本植物、灌木、乔木 P 重吸收率平均值分别为 65.51%,46.74%,41.72%(表 1)。草本植物的 N、P 重吸收率显著高于灌木和乔木,灌木的 N 重吸收率显著高于乔木的 N 重吸收率,灌木和乔木的 P 重吸收率不存在显著差异(图 1)。

2.2 植物养分重吸收特征与温度和降水的响应关系

植物凋落叶 N 含量和 P 含量均随着年均温的增大而增大,植物的 N 重吸收率随着年均温的增大而减小,而植物 P 重吸收率与年均温无显著相关关系(图 2)。

植物凋落叶 N 含量随年均降水量的增多而增大,植物凋落叶 P 含量与年均降水量没有明显相关关系。植物的 N 重吸收率随着年均降水量的增大而减小,植物的 P 重吸收率与年均降水量没有显著相关关系(图 3)。

3 讨论

3.1 3 种生活型植物养分的重吸收特征

本研究表明,不同生活型的植物具有不同的养分重吸收策略,这与 Aerts^[2]提出的不同植物类型的养分重吸收效率只有微小差异的结论不同。本研究结果显示,

草本植物的凋落叶养分含量显著低于灌木和乔木的凋落叶养分含量,并且草本植物养分重吸收率显著高于灌木和乔木的养分重吸收率。这可能是因为与草本植物相比,灌木、乔木生长速率低、组织养分含量低且更新速

率慢,且灌木和乔木具有较深的根系,因而对养分重吸收的需求较小,养分重吸收能力也较弱。研究结果表明,与草本植物相比,木本植物可能更依赖通过根系吸收养分以维持自己生长发育的需要和适应贫瘠环境。

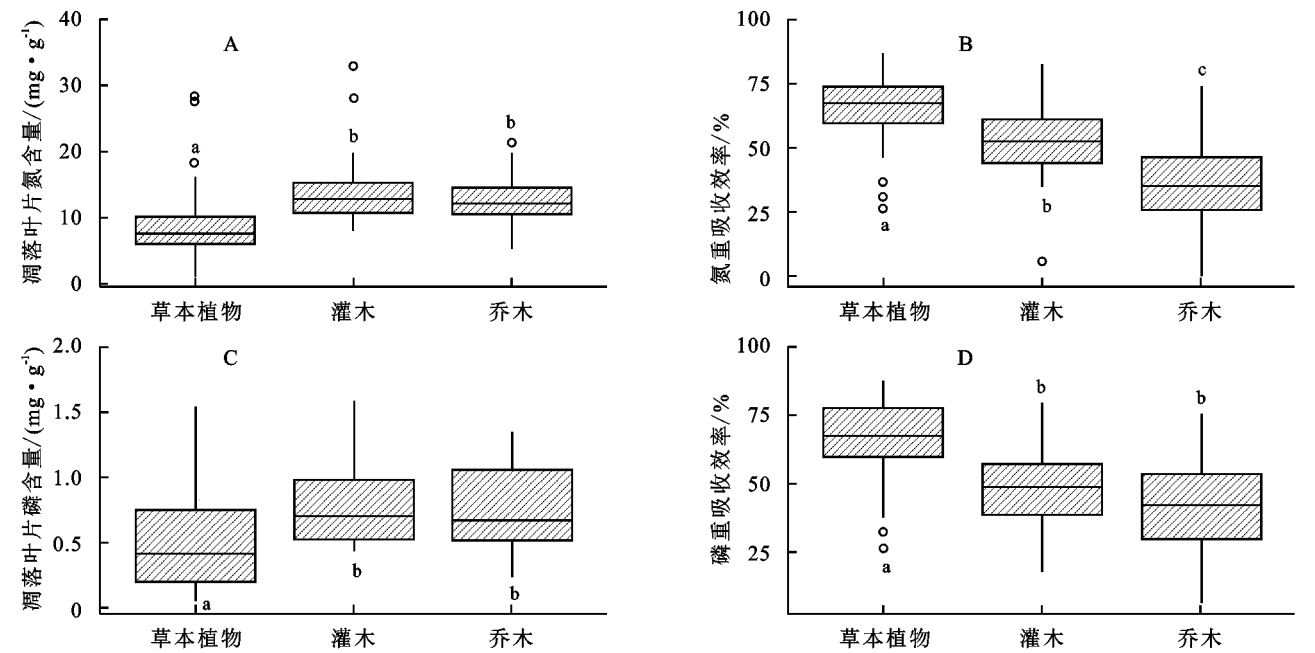


图 1 3 种不同生活型植物叶片的凋落氮、磷含量和氮、磷重吸收率

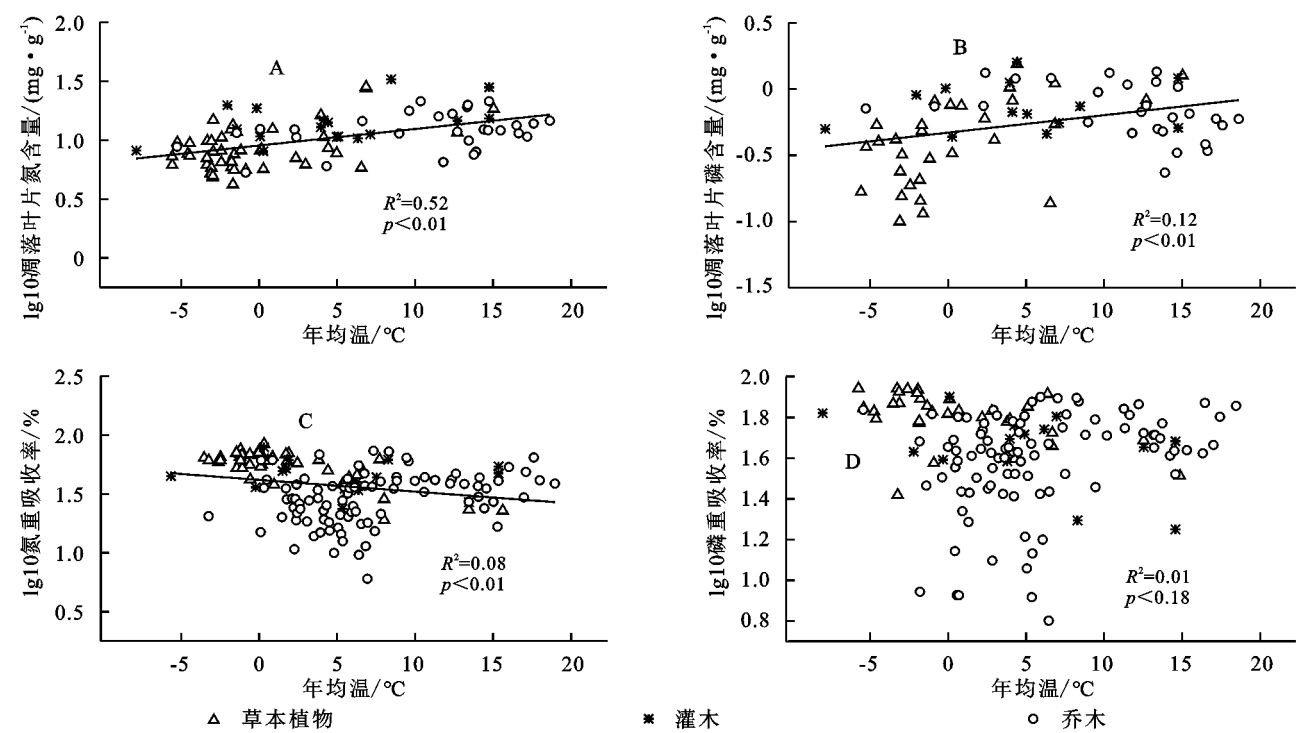


图 2 3 种不同生活型植物的凋落叶片氮、磷含量和氮、磷重吸收率对年均温度的响应

考虑到养分重吸收率受植物的不同生长形态特征的影响,不同生活型植物非叶片部分的养分库大小不同可能是导致草本植物、灌木和乔木的养分吸收特征存在较大差异的原因^[21]。植物的养分重吸收依赖叶片和其他器官的养分传递,不同植物生活型的其他器官养分库的大小差异对养分重吸收能力有不可忽

视的影响^[13]。例如,与乔木和灌木相比,草本植物的非叶器官养分库较小,从而导致草本植物比灌木和乔木需要更高的养分重吸收率。此外,由于乔木的支撑结构需要较多的养分以维持功能,所以乔木细根的养分停留时间要高于草本植物^[22]。这说明乔木具有更高的养分储存、循环和利用的能力,与茎和根连续脱

落的草本植物相比, 乔木的茎和根中营养物质停留的时间较长, 可能会减少乔木对养分重吸收的依赖。我

们的结果表明, 不同生活型植物养分重吸收策略说明了植物对环境适应策略的差异^[12]。

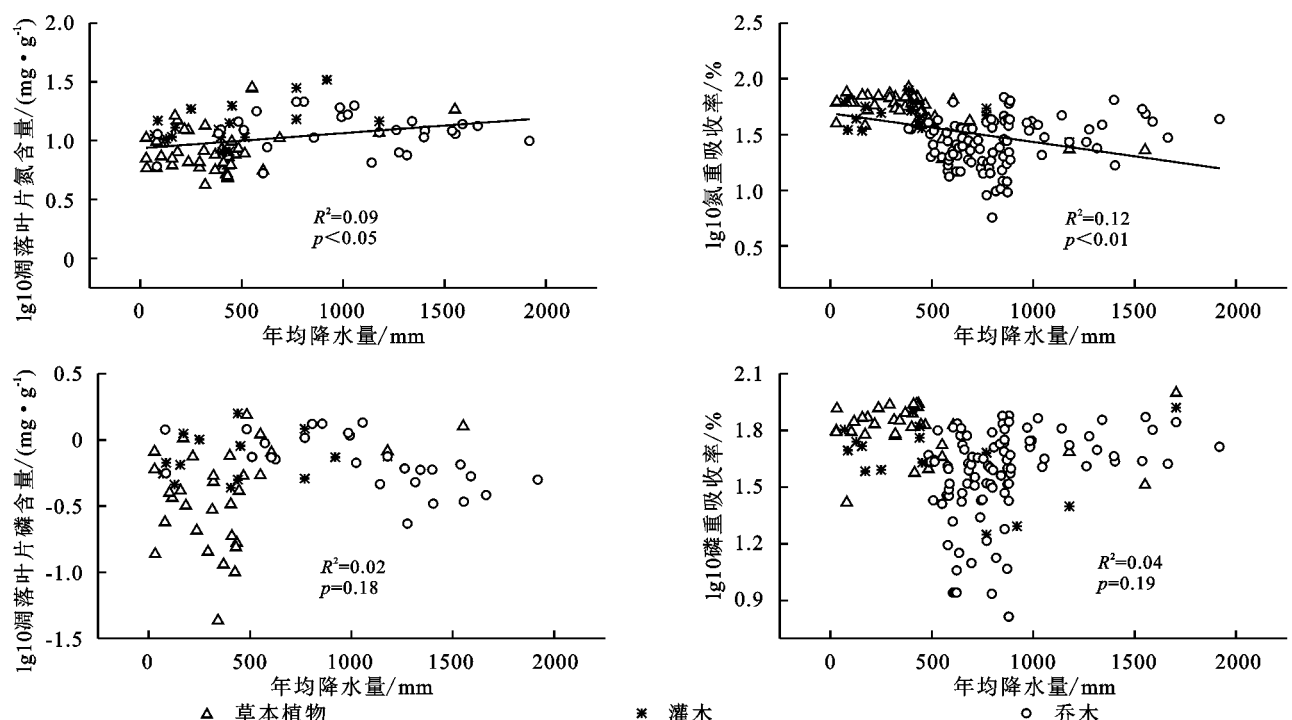


图 3 3 种不同生活型植物的凋落叶片氮、磷含量和氮、磷重吸收率对年均降水量的响应

3.2 植物养分重吸收特征和温度的响应关系

植物凋落物的养分含量反映了植物养分重吸收的能力, 凋落物养分含量越低, 说明其养分重吸收能力越强^[1]。本研究中, 植物凋落叶片 N、P 含量与年均温呈正比, 植物的 N 重吸收率与年均温呈反比, 这与 Yuan 等^[11]所得出的 N 重吸收率与年均温呈正比, P 重吸收率与其呈反比的结果不完全相同。这可能是因为我国位于北半球, 随着纬度的降低 (即由北向南), 气温和降水逐渐增加, 水热条件的改善可能会增加植物从土壤中摄取养分的速率。相对与氮而言, 我国热带的高纬度生态系统更受到磷的限制, 这可能增加了植物对 N 的吸收^[23]。并且随着纬度升高, 年均温度逐渐降低, 低温环境下的植物生长季较短, 生长较快^[10], 所以, 通过提高养分重吸收效率以解决自身养分的不足便成为植物适应环境的重要机制之一。这可能也是植物 N 重吸收率与温度表现出更明显的负相关关系的原因。此外, 本研究中植物凋落叶 P 含量和 P 重吸收率对年均温的响应不同, 这可能是这两种参数不同的计算方法所导致的。

此外, 高温胁迫会降低植物叶片对活性氧的清除能力, 加剧细胞膜脂质的过氧化程度, 从而加速叶片的衰老^[24]。这可能导致植物养分不能及时重吸收而留在了衰老组织中脱落, 所以植物凋落物会有较高的 N、P 含量, 从而降低了 N 和 P 的重吸收率。由此可见, 在我国, 随着温度升高, 植物可能会减少对内部养分循环过程的依赖。

3.3 植物养分重吸收特征和降水的响应关系

降水是影响土壤水分和养分的关键因素, 影响着陆地生态系统养分循环的进程。本研究中, 植物凋落叶 N 含量随着年均降水量的增大而增加, 植物的 N 重吸收率随年均降水量的增加而减小。降水的增加改善了土壤水分条件, 增大了植被覆盖度, 并提高了土壤微生物的活性, 进而加速了土壤 N 的矿化速率^[25]。随着土壤 N 矿化速率的提高, 土壤有效 N 含量增加, 植物减少了对从衰老叶片中回收养分的依赖, 所以植物 N 的重吸收也相应减少。本研究中, 植物凋落叶 P 含量和植物的 P 重吸收率均不随年均降水量变化。这可能是由于土壤中磷主要来源于岩石的风化, 而降水的增多缓解了岩石的风化作用, 进而导致土壤全磷的减少^[23]。虽然降水量的升高促进了土壤微生物对全磷的分解作用, 但与全磷的减少相互抵消, 进而导致了本研究中植物 P 重吸收特征对降水量没有明显的响应。这说明在较大尺度下, 植物 N 重吸收相比于 P 而言更受空间格局上降水变化的影响。总的来说, 从植物环境因子变化对养分重吸收特征的解释率来看, 相比降水变化, 我国植物的养分重吸收特征更受温度变化的影响。

4 结论

本研究结果表明, 草本植物的养分重吸收能力显著强于灌木和乔木的养分重吸收能力, 灌木的 N 重吸收率

显著高于乔木的 N 重吸收率。不同生活型植物养分重吸收能力的差异可能说明了植物的养分利用特征的差异,这可能与植物的环境适应策略有关。不同生活型植物氮磷养分重吸收特征存在差异,但其空间格局也受温度或降水的控制。温度可能通过对土壤养分有效性和植物叶片的衰老速率来影响养分重吸收,降水可能通过影响土壤水分条件和土壤养分进而影响植物的养分重吸收。本研究中,植物凋落叶养分含量与年均温呈正比,N 重吸收率与年均温呈反比,植物凋落叶 N 含量和 N 重吸收率分别与年均降水量呈正比和反比,而降水对植物 P 重吸收没有明显影响。植物叶片凋落与分解是陆地生态系统养分循环过程中重要的一环,研究植物叶片的养分重吸收有助于为我国科学管理陆地生态系统的提供理论依据,对深入了解整个生态系统的养分循环也有重要意义。

参考文献:

- [1] Killingbeck K T. Nutrients in senesced leaves: Keys to the search for potential resorption and resorption proficiency [J]. *Ecology*, 1996, 77(6): 1716-1727.
- [2] Aerts R. Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: Are there general patterns [J]. *Journal of Ecology*, 1996, 84(4): 597-608.
- [3] Berg B, Mcclaugherty C. Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2014.
- [4] 任丽昀,袁志友,王洪义,等.中国北部半干旱区乔木、灌木和草本 3 种不同生活型植物的氮素回收特征[J]. *西北植物学报*, 2005, 25(3): 497-502.
- [5] 李素新,张芸香,郭晋平.氮添加对华北落叶松叶片化学计量与养分重吸收效率的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 249-254, 263.
- [6] Liang D, Zhang J, Zhang S. Patterns of nitrogen resorption in functional groups in a Tibetan alpine meadow [J]. *Folia Geobotanica*, 2015, 50(3): 267-274.
- [7] Huang G, Su Y, Mu X, et al. Foliar nutrient resorption responses of three life-form plants to water and nitrogen additions in a temperate desert [J]. *Plant and Soil*, 2018, 424: 479-489.
- [8] Aerts R, Chapin F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns [J]. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30: 1-67.
- [9] 汤璐瑛.木本植物叶片养分重吸收研究[D].北京:北京大学, 2012.
- [10] Vergutz L, Manzoni S, Porporato A, et al. Global resorption efficiencies and concentrations of carbon and nutrients in leaves of terrestrial plants [J]. *Ecological Monographs*, 2012, 82(2): 205-220.
- [11] Yuan Z Y, Chen H Y H. Global-scale patterns of nutrient resorption associated with latitude, temperature and precipitation [J]. *Global Ecology Biogeography*, 2009, 18(1): 11-18.
- [12] Brant A N, Chen H Y H. Patterns and mechanisms of nutrient resorption in plants [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2015, 34(5): 471-486.
- [13] 江大龙,徐侠,阮宏华.植物养分重吸收及其影响研究进展[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2017, 41(1): 183-188.
- [14] 康静,韩国栋,任海燕,等.不同降水条件下荒漠草原植物的养分含量及回收对增温和氮素添加的响应[J]. *西北植物学报*, 2019, 39(9): 1651-1660.
- [15] Zhou H, Chen Y, et al. Xylem hydraulic conductivity and embolism in riparian plants and their responses to drought stress in desert of Northwest China [J]. *Ecohydrology*, 2013, 6(6): 984-993.
- [16] Yuan Z Y, Li L H, Han X. G, et al. Nitrogen resorption from senescing leaves in 28 plant species in a semi-arid region of northern China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2005, 63(1): 191-202.
- [17] Fisher J B. Carbon cost of plant nitrogen acquisition: A mechanistic, globally applicable model of plant nitrogen uptake, retranslocation, and fixation [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24: GB1014.
- [18] Austin A T, Ballare C L. Dual role of lignin in plant litter decomposition in terrestrial ecosystems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107: 4618-4622.
- [19] Eckstein R L, Karlsson P S, Weih M. Leaf life span and nutrient resorption as determinants of plant nutrient conservation in temperate-arctic regions [J]. *New Phytologist*, 1999, 143(1): 177-189.
- [20] R Development Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing [M]. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2011.
- [21] Zhang K Y, Yang D, Zhang Y B, et al. Differentiation in stem and leaf traits among sympatric lianas, scandent shrubs and trees in a subalpine cold temperate forest [J]. *Tree Physiology*, 2021, 41(11): 1992-2003.
- [22] Luo Y, Wang X, Cui M, et al. Mowing increases fine root production and root turnover in an artificially restored Songnen grassland [J]. *Plant and Soil*, 2021, 465(1): 549-561.
- [23] Jiao F, Shi X R, Han F P, et al. Increasing aridity, temperature and soil pH induce soil C-N-P imbalance in grasslands [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19601.
- [24] 刘洪展,郑风荣,赵世杰.高温胁迫对不同衰老型小麦叶片中活性氧清除系统的影响[J]. *贵州农业科学*, 2006, 34(1): 8-10.
- [25] Xu M, Zhu X, Chen S, et al. Distinctive pattern and mechanism of precipitation changes affecting soil microbial assemblages in the Eurasian steppe [J]. *Iscience*, 2022, 25(3): 103893.