

卢建男,刘凯军,王瑞雄,等.中国荒漠植物-土壤系统生态化学计量学研究进展[J].中国沙漠,2022,42(2):173-182.

中国荒漠植物-土壤系统生态化学 计量学研究进展

卢建男^{1,2},刘凯军³,王瑞雄^{1,2},李彦杰⁴,宁志英^{1,2},陈雪萍^{1,2},
赵思腾^{1,2},王少昆¹,赵学勇¹

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 乌拉特荒漠草原研究站/奈曼沙漠化研究站,甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学,北京 100049; 3.乌拉特后旗林业和草原局,内蒙古 巴彦淖尔 015500; 4.兰州大学 地质科学与矿产资源学院,甘肃 兰州 730000)

摘要:荒漠生态系统是中国陆地生态系统的重要组成部分,具有独特的结构和功能。生态化学计量学重点关注C、N、P元素比例及权衡关系,已成为揭示生态系统养分循环及其限制等生态过程的有力工具。植物自身体现出对养分元素的调控能力和对环境变化的响应及适应性,土壤C:N:P可表征土壤养分供应能力和储量变化,植物-土壤系统中N、P的养分循环关系密切。从植物营养器官元素化学计量,区域尺度荒漠植物与土壤化学计量特征及其影响因素,化学计量平衡(C:N:P)在个体发育、种群动态和群落结构形成过程中的作用,以及植物-土壤系统生态化学计量学的相互关系等角度,论述近10年来中国荒漠生态系统生态化学计量学研究进展,并就今后研究内容进行展望。

关键词:荒漠;生态化学计量;异速生长;环境响应

文章编号: 1000-694X(2022)02-173-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00109

中图分类号: Q948.15;S153.6

文献标志码: A

0 引言

生态化学计量学是研究生态交互作用和过程中多种化学元素及生物系统能量平衡的科学^[1]。其核心是基于元素在生命过程和生物地球化学循环中存在相互作用的特性,研究元素(特别是碳(C)、氮(N)和磷(P)等)在生态过程中呈现出的计量关系和规律。C是构成有机物骨架的基础,N、P是酶、遗传物质和细胞结构的基本组成部分。生物体需要严格的元素比例来催化代谢反应和合成生命的组成部分,包括蛋白质、三磷酸腺苷(ATP)和结构化合物^[2-3]。生态化学计量理论通过将复杂的生态过程简化为研究物质基本组成成分元素之间的数量关系和动态平衡,能够从元素比率角度将不同层次(个体、种群、群落、生态系统等)研究结果统一起来^[4-7]。

植物N、P养分的可利用性对陆地生态系统生

产力和C固存具有重要作用^[8]。C、N、P之间的生物地球化学循环与光合过程、呼吸作用和凋落物分解等过程密切相关^[9],进而影响物质和能量在不同器官和组织之间的分配^[7,10]。化学计量平衡(C:N:P)已被证明是定量认识和分析生态系统平衡和过程的有力工具^[11-12]。C:N:P比率可用于反映植物的生长速率^[11],N:P临界值可以作为判断土壤对植物生长的养分供应状况的指标^[13-15],以及揭示元素在植物器官之间的分配异速关系和策略等^[16-19]。

荒漠是中国北方重要的生态系统类型,约占中国陆地总面积的1/5。荒漠植物普遍具有适应干旱、高温、贫瘠等逆境的特殊结构和机能,虽然种类较少,平均生产力较低,但分布面积大、影响范围广,具有重要的生态和生产功能^[20]。深入开展对荒漠生态系统植物-土壤生态化学计量特征的研究,有助于进一步认识气候变化和人类活动影响下植物-

收稿日期:2021-04-30; 改回日期:2021-08-25

资助项目:国家科技基础资源调查专项(2017FY100200)

作者简介:卢建男(1991—),男,甘肃通渭人,博士研究生,主要从事生态化学计量学研究。E-mail: lujnmooc@lzb.ac.cn

通信作者:赵学勇(E-mail: zhaoxy@lzb.ac.cn)

土壤系统C、N、P等多种元素分配策略,以及它们之间的平衡关系如何进一步影响荒漠植物发育、植被组成和物种多样性、植被生产力和生态系统物质循环的维持等诸多生态学过程。

1 植物营养器官元素化学计量特征

植物生物量和养分的分配模式是植物结构策略的重要部分,植物不同组织在C:N:P化学计量上的差异性及其相对分配模式共同决定了整株植物生长过程中C、N、P的总体分配^[1]。

植物营养器官之间的内部差异是由植物组织结构与功能分化引起的,而元素的外部供应速率则限制了养分的吸收^[21]。受植物养分需求和土壤养分供应之间动态关系的影响,植物叶、茎和根之间的养分比率往往会趋向于异速生长的尺度关系^[12,19,22]。植物营养器官C、N和P分配策略的研究主要关注元素含量、表型可塑性(变异性)和分配率,可塑性强的植物具有较大的生态域和适应性^[16]。

1.1 植物器官间养分元素的分配比例与存量

He等^[18]关于阿拉善荒漠植物营养器官元素化学计量特征的研究表明,叶片中所有元素(N、P、K、Na、Ca、Mg、Mn、Zn、Cu、Fe)的浓度均高于茎和根。荒漠草本植物地上部分与光合作用和水分利用效率相关元素(N、P、Mg、K)的含量也高于根系^[23]。荒漠植物叶片N含量高于茎和根^[24-29],与中国植被叶、枝干、根N含量的变化研究结果一致^[30]。这表明植物可能会向叶片分配更多的N,以提供单位叶面积更大的羧化酶-N投资,从而增强光合能力,降低气孔导度,提高水分利用效率^[18,31]。由于水分对养分的稀释作用,也可导致茎干和根的N、P含量低于叶片^[32];土壤中的养分输送往往遵循与环境波动(如干湿、冻融循环)相关的脉冲模式^[33]。

初级生产者体内元素化学计量特征在种内种间具有多变性^[11,34]。不同功能群植物对器官之间营养元素的吸收、分配并不一致^[18,27]。植物C、N、P化学计量特征也呈现出年内季节、年际间变动^[34-36]。不同生长阶段沙冬青叶片和枝条的元素含量相对稳定,而霸王不同器官C、N和P含量随着年内季节波动变化较大^[28]。早生芦苇C、P、C:N和C:P的变异主要受生长季节变化的影响,但器官结构性差异对芦苇N、N:P变化的影响大于季节变化^[37]。胡杨不同器官C、N含量差异显著,林龄对胡杨叶的C含

量影响显著($P<0.05$),对叶、枝和根的N、P含量差异影响不显著($P>0.05$)^[36]。由此可见,植物在其生命不同阶段养分元素及其比例的需求不同。

中国荒漠区各生境土壤养分有效性往往存在差异,除受植物自身遗传特性影响外,不同生活型植物营养器官C、N和P含量、利用、获取和分配及功能上的多样化(以保守的异速分配方式)反映了其对变化环境的不同适应策略。

1.2 异速生长与植物器官化学计量特征

异速生长在植物体生长发育过程中普遍存在,是生长和分配之间的定量关系^[38]。植物进化出异速生长模式是对自然选择和资源限制的响应。多数研究关注植物生物量的分配,对元素的吸收、利用和分配过程也可用异速生长关系来反映^[39]。

在植物的生长过程中,C、N和P是协同变化的^[10,19]。叶片N含量以P含量的3/4^[40]、2/3^[41]指数增长。阿拉善荒漠植物代谢活性器官(叶片)和结构性器官(茎和根)之间的元素比例关系呈异速生长^[18]。新疆荒漠灌木根系N含量与P含量呈0.699指数增长^[25]。科尔沁沙地主要植物细根N、P含量以叶片N、P含量的1/2比例变化^[42]。由此可见,异速生长必然伴随着植物体内元素化学计量特征的变化。

古尔班通古特沙漠4种荒漠草本植物生长过程中的生物量分配与叶片N、P化学计量特征相关性较弱^[35]。但关于中国北方126种灌木植物器官N-P尺度关系研究表明,植物中N、P的分配主要依赖于生物量的分配^[17]。邢磊等^[43]通过唐古特白刺幼苗叶片生物量与N含量较好地拟合出全株生物量与全株N含量之间的预测模型。植物器官之间N素分配与N利用策略一致,从而提供了一种评估区域规模植被中N存储量的方法^[30]。

不同的植物功能(如生长、储存、防御和抗胁迫机制)对元素的利用存在差异^[44]。考虑到植物在积累生物量的过程中,必然伴随着各器官C、N、P等元素的形成,今后研究叶、茎、根中总N和总P是如何分配到构建光合机制的不同部分以及分别用于构建rRNA和非结构蛋白的比例,可以更好地解释荒漠植物器官的N、P含量以及生物之间呈现出的异速生长指数关系^[39]。

1.3 植物营养器官化学计量特征的逆境响应

N、P等元素在植物体内的分配是自然植物群落

结构稳定和功能优化的重要基础^[16]。在环境胁迫条件下,植物表现出一定程度的可塑性和内稳态,如果某一特定元素受到限制,植物会根据不同器官之间化学计量模式进行优化、分配,产生逆境响应^[1,16,45]。例如,植物叶片衰老前养分重吸收是荒漠植物适应水分胁迫和N、P受限环境的一种重要的养分保存机制^[46-47]。

干旱胁迫条件下小叶锦鸡儿幼苗受N限制作用增强,细根C、N含量增加以维持生长及代谢活动,促进水分和养分吸收^[48],说明根系具有较高的元素可塑性。He等^[49]通过整合分析研究了植物对干旱处理和干旱胁迫持续时间的响应,结果表明干旱胁迫可能会增强植物生长的N、P限制,但随着干旱处理和干旱-复湿周期的延长,水分的可利用性(而非N、P的有效性)可能是减缓植物生长的主要原因。在水分和养分共同限制条件下,旱生植物在N、P化学计量方面可能表现出很少的可塑性,并保持低组织养分吸收^[45-46]。在不利于C同化和养分吸收的条件下,茎和根中储存的营养物质可以在支持叶片生长方面发挥重要作用^[47]。此外,对盐生植物来说,其体内总盐分、盐离子与N、P及N:P之间具有一定的相互促进关系^[50]。荒漠盐生植物的叶片性状和C:N:P化学计量特征在不同盐渍化生境中具有相对稳定性^[51]。

结合区域生境特点,研究水分和养分添加对荒漠植物器官元素含量及比值以及养分重吸收率等

方面的影响,揭示荒漠生态系统优势物种、特有种对环境变化的响应和适应规律,这无疑是今后研究的一个重要内容。

2 区域尺度荒漠植物生态化学计量学格局及其驱动因素

植物化学计量学表现出大尺度的宏观生态模式,包括较强的纬度趋势和P含量(相对于N)的环境相关性^[12,52-55]。绿叶是陆地生态系统功能的基础,植物对C的同化和N的吸收以及叶片的可分解性驱动着生物地球化学循环^[53-54]。植物的大小和代谢过程受到环境要素的强烈影响,地理区域尺度上植被化学计量学研究集中于植物叶片C、N和P等元素比例关系与环境要素间的相关性等问题^[56-58]。

2.1 荒漠区植物生态化学计量基本特征

在地域上,中国荒漠区生态系统较大的跨度使其生态系统特征存在很大的空间异质性^[59],不同区域植被C、N、P化学计量特征也呈现出较大的变异性。

北方典型荒漠分布地区植物叶片平均N含量之间无显著差异($P>0.05$),半干旱区沙地植物叶片平均P含量高于干旱荒漠区植物(年降水量<250 mm)^[42,60-64]。为了更进一步说明中国荒漠区植物叶片C、N、P含量的分布特征,本文搜集了具有一定空间尺度的荒漠植物叶片化学计量特征研究案例,并以乌兰布和-阴山北麓荒漠植物叶片元素含量为对照(表1)。

表1 不同研究区域植物叶片碳氮磷化学计量特征比较

Table 1 Comparison of stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus of leaf in different study areas

研究区域	物种数(样本量)	C/(mg·g ⁻¹)	N/(mg·g ⁻¹)	P/(mg·g ⁻¹)	N:P(质量比)	数据来源
乌兰布和-阴山北麓荒漠	31(385)	383.81±54.35	23.36±7.21	1.32±0.62	19.93±6.76	未发表
北方典型荒漠区	214	—	24.45 ± 8.1	1.74±0.88*	15.77±7.5*	[59]
新疆荒漠	67(220)	393.58±78.55	18.43±7.01*	1.14±0.56*	18.03±7.27	[24]
安西盐渍化荒漠	18(142)	396.7±45.4	28.1±9.4*	1.85±0.5*	15.4±3.7*	[51]
阿拉善荒漠	54(276)	379.01±55.42	10.65±7.91*	1.04±0.81*	11.53± 5.06*	[64]
毛乌素沙地	28(149)	445.62±29.60*	26.37±8.69*	1.54±0.70*	19.54±8.14	[60]
科尔沁沙地	60(400)	424.20±1.50*	25.60±0.35*	2.10±0.04*	12.9 ± 0.2*	[42]
中国陆生植物	753	—	20.20±8.41*	1.46±0.99	16.30±9.32*	[56]
中国草地	525	442.4±28.1*	26.5±8.5*	1.91±0.84*	15.3±5.2*	[57,61]
东部森林样带	102(306)	480.1±53.2*	18.3±5.0*	2.0±1.2*	11.5±5.1*	[62]
全球	1280	—	20.09±8.71*	1.77±1.12*	13.8±9.47*	[52]

C、N、P含量及N:P均为算数平均值±标准差;*代表0.001水平上的显著性;乌兰布和-阴山北麓荒漠植物叶片元素含量数据为笔者未发表数据,以作对比分析。

中国荒漠不同区域间植物叶片C、N、P及N:P化学计量特征表现出明显的趋同与分异特征。西北干旱荒漠区植物叶片C含量之间无显著差异,各荒漠区植物叶片P含量之间差异均显著($P<0.001$)。由于P元素主要来自于岩石风化^[52],说明不同研究区的土壤养分来源和有效性存在差异。阿拉善荒漠区植物叶片N、P含量及N:P均显著低于其他荒漠区;盐渍化荒漠区盐生植物叶片N含量显著高于其他地区,可能是盐胁迫条件下盐生植物非蛋白氮积累量较高的原因,其在渗透调节中发挥着至关重要的作用^[51]。

在不同地理区域尺度的研究表明,中国西北荒漠植物叶片C含量普遍低于沙地、草地、森林。可能是因为荒漠区日照充足、太阳辐射强,降雨量少且蒸发量大,影响植物光合作用C同化过程^[24,63]。除科尔沁沙地外,其他荒漠区植物叶片P含量均低于东部森林^[62]和草地^[57,61]的平均值。较低的叶片P含量也造成大部分荒漠研究区植物叶片N:P计量比要高于全球、中国草地和东部森林的平均值。中国各荒漠区水、土、气、生要素差异性大,植物生长受N限制^[64],或P限制^[24]或N、P共同限制。植物叶片N:P是反映环境中养分制约的重要指标。目前研究发现较低的N:P临界值指示植物生长主要受N素限制已基本得到认可^[59];也有研究指出典型的N:P阈值(N:P>16受P限制,N:P<14受N限制)在用于检测植物养分限制时可能引入很大的不确定性^[65]。

此外,以往的研究主要比较不同研究区优势物种或植物功能群C、N和P元素含量平均值的趋同与分异^[16]。鉴于植物叶片N-P计量关系的变异,混合不同科、属、种等植物叶片元素含量在一起的数据计算方法,可能会掩盖一些真实的生态学现象^[19]。今后可能更需要关注植物群落层面化学计量学特征变化^[7,16]和荒漠植物根、茎、叶、花、果实、种子器官的生态化学计量学特征,以深入揭示植物生长过程中内部的养分分配和权衡关系等。

2.2 荒漠植物生态化学计量驱动因素

植物具有特定的叶片元素组成和化学计量特征,这主要取决于自身遗传特性^[66],但也表现出一定程度的化学计量灵活性,以适应非生物条件(如干旱)和生物条件(如群落组成)的变化^[44]。

2.2.1 生物因素

国内学者在不同研究区研究了不同发育阶段

荒漠植物不同功能(类)群C、N、P等元素和化学计量比的基本特征。研究表明,不同生活型、光合作用途径、固氮类型植物叶片N、P含量及N:P之间存在显著差异。例如豆科灌木比非豆科灌木具有更高的N稳态^[67]。

草本植物叶片P含量均高于灌木植物^[24,59,68];根据生长速率假说,生长速率快的物种需要保证核糖体RNA的快速高效合成来支持植物生长所需的蛋白质合成,从而使得生长率高的生物具有较低的C:P和N:P。这类植物往往寿命短、结构脆弱、叶片薄、叶面积大^[12]。对于荒漠灌木,考虑到贮藏和结构组织中不活跃的营养物质的存在,要想进一步理解N:P化学计量和生长之间的相互作用,需要对植物中P向RNA的分配进行进一步的研究。Niu等^[69]指出,荒漠灌木霸王的生长并不符合生长速率假说。

植物养分含量变化的重要部分可以用分类学或系统发育关系来解释^[57,61],表明植物C、N、P是一个有意义的物种水平性状^[12]。

2.2.2 非生物因素

在北方荒漠区,水分是植物生长的主要限制因素。关于气候因子、土壤养分与荒漠植物元素化学计量特征的相关性,不同空间尺度范围的相关研究显示出不一致的结果。

阿拉善荒漠植物叶片N、P含量与年平均气温呈较弱负相关,但与年平均降水量没有相关关系,灌木叶片P含量与深层(40—100 cm)土壤P更相关^[58]。其中,相比气候因子,土壤性质和植物分类解释了荒漠灌木、草本植物器官间元素含量的大部分变异^[47,58]。荒漠灌木对未来气候变化可能不是特别敏感,因为大多数与光合作用、渗透调节、酶活性和水分利用效率相关的元素(N、P、K、Ca、Mn、Zn和Cu)主要取决于土壤条件^[18]。相反的是,新疆荒漠(采样点主要布设在北疆)植物叶片和粗根C、N、P化学计量特征主要受气候因子的影响^[24-25],反映了荒漠植物生长主要受水分限制。北方典型荒漠及荒漠化地区植物叶片P含量以及N:P分别与多年平均降水量呈显著正相关和负相关关系,但与各研究区年平均温度没有明确相关性^[59]。

关于以上研究变化可能的原因是,不同研究区地理范围大小和植物生长季节水热变化波动的影响掩盖了N、P化学计量特征与年平均气候参数的空间关系^[58]。同时,北方荒漠不同研究区的土壤养

分有效性存在差异^[59]。荒漠植物粗根通常受水分、土壤养分胁迫,以消耗含C化合物为代价来提高对N、P利用率^[25]。Zhang等^[68]对河西走廊荒漠生态系统生物量和养分分配策略的研究表明,虽然与功能性状相关的植物生物量和养分主要依赖于土壤条件,但年平均降水量和年平均温度对根系生物量和养分贮藏的影响更大。也有研究表明,与非固氮灌木叶片N含量变化趋势不同,豆科灌木叶片N含量并不随土壤全N含量增加呈显著变化,可能是其固氮能力增强了对土壤养分缺乏的稳态^[67]。

此外,N沉降^[70]、干扰^[71]及沙漠化^[72]等都会直接或间接地导致荒漠植物元素化学计量特征的变化,这种变化与气候、土壤、植被类型以及植物个体遗传特性有关。因此,结合所在区域生境特点研究不同植物群落根、茎、叶以及土壤的C、N和P化学计量学特征,对于定量化揭示植物自身对营养元素的需求和土壤的养分供给能力,以及植物对环境的适应与反馈能力具有重要作用。

3 C:N:P在个体发育、种群动态和群落结构形成过程中的作用

异速生长和N:P化学计量学理论的融合将蛋白质/核糖体代谢机制与植物个体发育的生长速率概念性地联系在一起^[39]。植物生长过程的本质就是元素的积累及相对比例的调节过程。植物个体不同发育阶段,种群内与种群间以及群落和生态系统等不同水平对C、N、P等多种元素资源需求与环境供应之间的权衡过程影响着植物生理和生态学过程^[7,73]。

研究表明,植物功能群间(灌木和草本)叶片元素组成的差异最大,同一功能群内物种间化学计量特征的差异最小。这可能反映了一个生态系统中不同的功能生态位^[21]。广泛分布于中国干旱荒漠区的红砂-珍珠群落,两者分别以单生或者互利共生的方式共存于一个混生群落。两者对Na、K等矿物质离子的吸收与分布具有互补互利的效应^[74]。跨物种叶片和茎组织中N和P含量的一致相关性表明营养元素化学计量特征具有较强的配位性。

荒漠草原主要植物种群生态化学计量学特征呈季节性变化,N、P含量均表现出在生长初期显著大于其他生长时期^[75]。沙地植被的C、N、P化学计量特征能够影响植物群落的物种多样性^[76]。在荒漠生态系统中,干旱和盐度对植物养分的影响从物

种到群落水平逐步扩大,通过降低叶片N、P含量,使植物适应干旱和盐碱化环境^[77]。不同植物对水分和N素的利用能力不同,而区域特有物种化学计量特征的变化可能是引起植物群落响应的重要因素^[78]。植物各器官间的养分分配模式表现为植物功能群和生物群落间的保守性,在较活跃的器官(叶片)中养分的相对变化一直较小,这种保守策略意味着存在限制植物养分分配的一般规则^[79]。

同一群落的不同物种对严重干旱的响应比生长在不同群落的同一物种更相似,说明化学计量变化更依赖于群落,而且相对于单一物种的群落,复杂的植物群落对干旱的反应能力更强^[44]。内蒙古草原植物化学计量研究表明,具有稳态的植物或植物群落能使不同元素的含量及其比例在环境变化中保持相对稳定,这一现象反映了植物体在长期进化过程中对环境的适应^[80]。一旦两者的化学计量比值不相匹配,就会引发有机体种群行为和进化的改变,影响生物的生长发育过程和形态的改变^[6]。内稳性高的物种具有较高的优势度和稳定性,而由较多这类物种(优势种)组成的生态系统具有较高的生产力和稳定性^[81]。因此,C、N、P的化学计量将反映对当地生长条件的调节以及物种更替的影响^[12]。

4 荒漠区域尺度土壤碳氮磷化学计量学研究

土壤C、N、P及其化学计量比能指示土壤养分储量、养分循环及其平衡,是反映土壤有机质组成和质量程度的一个重要指标。例如土壤有机质C:N可以表征其分解速度,较低的C:N表明有机质具有较快的矿化作用,相应地有效N含量也较高^[22];此外,植物主要从土壤中获取N和P,土壤养分含量是调节植物C:N:P化学计量学的重要因素^[82]。

4.1 荒漠土壤C:N:P的分布特征

与农田、草地和森林土壤C、N、P储量相比,荒漠土壤C:N:P化学计量比最低^[83]。根据第二次全国土壤普查资料,Tian等^[84]得出中国土壤C:N:P约为60:5:1,土壤C:N在不同气候带、土纲、土层深度和风化阶段的变化相对较小,但P元素分布表现出较高的空间异质性和较大的变异。温带荒漠土壤生产力低下,C和N含量较低,但土壤受淋溶损失较小,土壤P含量反而较高,使其土壤C:P和N:P

较低^[84-85]。

荒漠土壤有机C、全N、全P含量整体水平较全国平均水平低^[58,86-87]。陶冶等^[86]认为,准噶尔荒漠区浅层土壤有机C、N和P缺乏程度表现为 $N>C>P$,但土壤有机C($5.73\pm 0.49\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、全N($0.347\pm 0.004\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和全P($0.207\pm 0.009\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)含量显著高于科尔沁沙化草地表层土壤(有机C、全N、全P含量平均值分别为 $1.39\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $0.117\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $0.079\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$),也高于乌兰布和沙漠天然灌木林土壤有机C($2.45\pm 1.06\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和全N含量($0.26\pm 0.09\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[88]。目前,尽管已有区域尺度荒漠土壤养分元素比例关系的一般结论,但关于中国荒漠区域尺度土壤C、N和P等元素化学计量特征与分布格局的整合研究仍需要深入。

4.2 荒漠土壤C:N:P的影响因素

土壤C:N:P化学计量受区域水热条件和成土作用特征的影响^[22]。不同荒漠生境、植被类型也会影响土壤C、N、P化学计量特征^[86-89]。温度和降水控制着来自植物残体的C输入和通过土壤微生物分解SOC的C输出之间的平衡^[80]。

在区域尺度上,准噶尔荒漠区土壤C、N、P及其化学计量比受年降水量、年均温以及海拔的影响。孙小东等^[90]指出,干旱是影响河西走廊荒漠区土壤有机C、N、P含量和C:N:P比值下降的关键因素。气温的降低会使得土壤有机C分解缓慢,有机物质不断积累。同时,由于元素在土壤中的渗透和扩散速率比较缓慢,表层富有机质土壤的C:N、C:P和N:P比值可以较好地反映土壤发育过程中的养分状况^[84]。因降雨量不足导致的这一现象在荒漠生态系统中非常明显^[58]。降水量增加会降低荒漠草原土壤有机C、全N,促进土壤N和P的迁移和转化,调节土壤元素化学计量平衡关系^[91]。总体来讲,荒漠土壤有机C、N和P含量在土壤表层最高,且随土层深度的增加而降低^[58,68,87]。

土壤微生物和胞外酶在生态系统C、N和P循环中起着关键的调控和驱动作用^[92]。黄菊莹等^[93]通过2年的模拟增减雨试验得出控雨对土壤C:N:P影响较小,但增雨促进了植物生长和微生物量积累。研究发现荒漠草地沙漠化过程中土壤-微生物-胞外酶系统生态化学计量特征之间存在协变关系^[94]。植物和土壤微生物对N素的利用是一种竞争关系,微生物还需要C源,且与土壤中的多种胞外酶有关

系。与根际土壤化学计量学相关的系统协变关系仍需进一步深入研究。

5 植物-土壤系统生态化学计量学的相互作用

植物-土壤是一个直接进行物质和能量交换的系统,两者之间的反馈已成为了解陆地生态系统中植物种群动态、群落组成和功能的重要概念^[95]。

荒漠植物的生长和养分吸收受到土壤N、P有效性的制约^[58]。Yang^[96]等指出,北方沙漠化地区植物群落叶片、根系和凋落物的C、N和P含量与0—5 cm土层C、N和P含量呈正相关,且相关度随土壤深度的增加而逐渐减弱;叶片、根系和凋落物C:N:P化学计量特征的变化主要受土壤性质的控制,尤其是土壤微生物生物量C和N的变化。科尔沁沙地土壤N、P含量显著影响植物种类组成,沙漠化草地的土壤肥力(特别是土壤N含量)直接决定了植物群落的C、N、P含量和C:N:P^[97]。由于植物在元素含量和凋落物输入方面存在差异,N含量高的植物物种可以通过缓解N限制来改善草地恢复。

尽管研究者得出了一些有助于深刻认知荒漠生态系统植物与土壤的元素比例关系及其环境解释的结论和一般性规律,但是依然需要在未来研究中更为关注植物-土壤系统内部的物质分配规律、权衡及其与荒漠区变化着的生境要素的关系。例如土壤母质的养分供给时空格局与数量、土壤养分有效性与植物输入量的关系及其受到气候要素影响或干扰的阈限等。

6 展望

近年来,生态化学计量理论被广泛应用于生态系统中各生态过程的研究。鉴于陆地生态系统的复杂性,对内稳性理论和生长速率假说仍需要大量的实验和观测来进行验证。结合生态学代谢理论和其他植物功能性状,进行大尺度荒漠植物C、N、P计量关系的整合研究,有助于从功能生物地理学角度认识和解释大自然是如何进行生态系统结构与功能的维持。

利用同位素示踪技术,研究大气-植物-凋落物-土壤-土壤微生物这一系统的C:N:P的连接关系,有助于了解生态系统不同组分间的化学计量权衡关系。

生态化学计量学从元素水平上为生态学家提

供了一个连接分子、细胞、个体、种群、群落、生态系统等不同尺度的思路,但如何实现这一从微观到中观、宏观过程的联系与转换,需要有针对性地对某一特定生态系统进行多层次的C、N和P等元素计量关系研究。

除C、N和P以外,植物生理和生态过程中必然伴随着多种元素的协同作用。因此,其他元素如何参与并影响C、N和P三者之间的化学计量关系还需进一步探索。例如,钾(K)元素是仅次于叶片中N的第二大营养素,与植物水分利用效率密切相关^[98]。

参考文献:

- [1] Sterner R W, Elser J J. Ecological Stoichiometry: the Biology of Elements from Molecules to the Biosphere [M]. Princeton, USA: Princeton University Press, 2002.
- [2] Ågren G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities [J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2008, 39: 153–170.
- [3] Finzi A C, Austin A T, Cleland E E, et al. Responses and feedbacks of coupled biogeochemical cycles to climate change: examples from terrestrial ecosystems [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2011, 9(1): 61–67.
- [4] Elser J J, Acquisti C, Kumar S. Stoichiogenomics: the evolutionary ecology of macromolecular elemental composition [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2011, 26(1): 38–44.
- [5] Elser J J. Biological stoichiometry: a chemical bridge between ecosystem ecology and evolutionary biology [J]. The American Naturalist, 2006, 168(S6): 25–35.
- [6] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索 [J]. 植物生态学报, 2005, 29(6): 141–153.
- [7] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 2–6.
- [8] Tang Z Y, Xu W T, Zhou G Y, et al. Patterns of plant carbon, nitrogen, and phosphorus concentration in relation to productivity in China's terrestrial ecosystems [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(16): 4033–4038.
- [9] Delgado-Baquerizo M, Maestre F T, Gallardo A, et al. Decoupling of soil nutrient cycles as a function of aridity in global drylands [J]. Nature, 2013, 502(7473): 672–676.
- [10] 杨惠敏, 王冬梅. 草-环境系统植物碳氮磷生态化学计量学及其对环境因子的响应研究进展 [J]. 草业学报, 2011, 20(2): 244–252.
- [11] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems [J]. Ecology Letters, 2000, 3(6): 540–550.
- [12] Elser J J, Fagan W F, Kerkhoff A J, et al. Biological stoichiometry of plant production: metabolism, scaling and ecological response to global change [J]. New Phytologist, 2010, 186(3): 593–608.
- [13] Koerselman W, Meuleman A F. 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.
- [14] Drenovsky R E, Richards J H. Critical N:P values: predicting nutrient deficiencies in desert shrublands [J]. Plant and Soil, 2004, 259(1/2): 59–69.
- [15] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, et al. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions [J]. Ecological Applications, 2010, 20(1): 5–15.
- [16] Zhang J H, Zhao N, Liu C C, et al. C:N:P stoichiometry in China's forests: from organs to ecosystems [J]. Function Ecology, 2018, 32: 50–60.
- [17] Yang X, Tang Z Y, Ji C J, et al. Scaling of nitrogen and phosphorus across plant organs in shrubland biomes across Northern China [J]. Scientific Reports, 2014, 4: 5448.
- [18] He M Z, Song X, Tian F P, et al. Divergent variations in concentrations of chemical elements among shrub organs in a temperate desert [J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 20124.
- [19] 田地, 严正兵, 方精云. 植物化学计量学: 一个方兴未艾的生态学研究方向 [J]. 自然杂志, 2018, 40(4): 235–241.
- [20] 赵哈林. 沙漠生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [21] Minden V, Kleyer M. Internal and external regulation of plant organ stoichiometry [J]. Plant Biology, 2014, 16(5): 897–907.
- [22] 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 [J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937–3947.
- [23] He M Z, Dijkstra F A, Zhang K, et al. Influence of life form, taxonomy, climate, and soil properties on shoot and root concentrations of 11 elements in herbaceous plants in a temperate desert [J]. Plant and Soil, 2016, 398(1/2): 339–350.
- [24] 何茂松, 罗艳, 彭庆文, 等. 新疆 67 种荒漠植物叶碳氮磷计量特征及其与气候的关系 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2171–2180.
- [25] 何茂松, 罗艳, 彭庆文, 等. 新疆 45 种荒漠植物粗根碳、氮、磷计量特征及其与环境的关系 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(9): 2603–2614.
- [26] 罗艳, 贡璐. 塔里木盆地南缘不同生境下芦苇生态化学计量特征 [J]. 生态学杂志, 2016, 35(3): 684–691.
- [27] 刘珮, 马慧, 智颖颀, 等. 9 种典型荒漠植物生态化学计量学特征分析 [J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 207–216.
- [28] 石莎, 陈春, 韩航, 等. 蒙古沙冬青和霸王两种子遗植物化学计量特征与生态适应性 [J]. 云南大学学报(自然科学版), 2018, 40(5): 1042–1052.
- [29] Luo Y, Peng Q, Li K, et al. Patterns of nitrogen and phosphorus stoichiometry among leaf, stem and root of desert plants and responses to climate and soil factors in Xinjiang, China [J]. Catena, 2021, 199: 105100.
- [30] Zhao H, He N P, Xu L, et al. Variation in the nitrogen concentration of the leaf, branch, trunk, and root in vegetation in China [J]. Ecological Indicators, 2019, 96: 496–504.
- [31] Farooq M, Hussain M, Wahid A, et al. Drought stress in plants:

- an overview [M]//Aroca R. Plant Responses to Drought Stress. Berlin, Germany: Springer, 2012: 1–33.
- [32] Kerkhoff A J, Fagan W F, Elser J J, et al. Phylogenetic and growth form variation in the scaling of nitrogen and phosphorus in the seed plants [J]. *The American Naturalist*, 2016, 168(4): 103–122.
- [33] Sinsabaugh R L, Manzoni S, Moorhead D L, et al. Carbon use efficiency of microbial communities: stoichiometry, methodology and modelling [J]. *Ecology Letters*, 2013, 16(7): 930–939.
- [34] 牛得草, 李茜, 江世高, 等. 阿拉善荒漠区6种主要灌木植物叶片C:N:P化学计量比的季节变化 [J]. *植物生态学报*, 2013, 37(4): 317–325.
- [35] 肖遥, 陶冶, 张元明. 古尔班通古特沙漠4种荒漠草本植物不同生长期的生物量分配与叶片化学计量特征 [J]. *植物生态学报*, 2014, 38(9): 929–940.
- [36] 史军辉, 马学喜, 刘茂秀, 等. 胡杨 (*Populus euphratica*) 枝叶根化学计量特征 [J]. *中国沙漠*, 2017, 37(1): 109–115.
- [37] 李红林, 贡璐, 洪毅. 克里雅绿洲旱生芦苇根茎叶C、N、P化学计量特征的季节变化 [J]. *生态学报*, 2016, 36(20): 6547–6555.
- [38] Weiner J. Allocation, plasticity and allometry in plants [J]. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2004, 6(4): 207–215.
- [39] Niklas K J. Plant allometry, leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry, and interspecific trends in annual growth rates [J]. *Annals of Botany*, 2006, 97(2): 155–163.
- [40] Niklas K J, Cobb E D. N, P and C stoichiometry of *Eranthis hymenalis* (Ranunculaceae) and the allometry of plant growth [J]. *American Journal of Botany*, 2005, 92(8): 1256–1263.
- [41] Reich P B, Oleksyn J, Wright I J, et al. Evidence of a general 2/3-power law of scaling leaf nitrogen to phosphorus among major plant groups and biomes [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2010, 277(1683): 877–883.
- [42] 宁志英, 李玉霖, 杨红玲, 等. 科尔沁沙地主要植物细根和叶片碳、氮、磷化学计量特征 [J]. *植物生态学报*, 2017, 41(10): 1069–1080.
- [43] 邢磊, 薛海霞, 李清河, 等. 白刺幼苗生物量与氮含量在叶与全株间的尺度转换 [J]. *北京林业大学学报*, 2018, 40(2): 76–81.
- [44] Urbina I, Sardans J, Beierkuhnlein C, et al. Shifts in the elemental composition of plants during a very severe drought [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, 111: 63–73.
- [45] 王珊, 单立山, 李毅, 等. 降水变化对红砂-珍珠碳、氮、磷化学计量特征的影响 [J]. *西北植物学报*, 2020, 40(2): 335–344.
- [46] Drenovsky R E, James J J, Richards J H. Variation in nutrient re-sorption by desert shrubs [J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(11): 1564–1568.
- [47] He M Z, Zhang K, Tan H J, et al. Nutrient levels within leaves, stems, and roots of the xeric species *Reaumuria soongorica* in relation to geographical, climatic, and soil conditions [J]. *Ecology and Evolution*, 2015, 5(7): 1494–1503.
- [48] 王凯, 雷虹, 王宗琰, 等. 干旱胁迫下小叶锦鸡儿幼苗C、N、P分配规律及化学计量特征 [J]. *林业科学研究*, 2019, 32(4): 47–56.
- [49] He M Z, Dijkstra F A. Drought effect on plant nitrogen and phosphorus: a meta-analysis [J]. *New Phytologist*, 2014, 204(4): 924–931.
- [50] 雍艳华, 张霞, 王绍明, 等. 新疆典型盐生植物营养器官盐分积累与生态化学计量特征 [J]. *植物生态学报*, 2016, 40(12): 1267–1275.
- [51] Wang L L, Zhao G X, Li M, et al. C:N:P stoichiometry and leaf traits of halophytes in an arid saline environment, northwest China [J]. *PLoS One*, 2015, 10(3): e0119935.
- [52] 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.
- [53] Wright I J, Reich P B, Westoby M, et al. The worldwide leaf economics spectrum [J]. *Nature*, 2004, 428(6985): 821–827.
- [54] Zhang S B, Zhang J L, Slik J, et al. Leaf element concentrations of terrestrial plants across China are influenced by taxonomy and the environment [J]. *Global Ecology & Biogeography*, 2012, 21(8): 809–818.
- [55] Du E Z, Terrer C, Pellegrini A F A, et al. Global patterns of terrestrial nitrogen and phosphorus limitation [J]. *Nature Geoscience*, 2020, 13(3): 221–226.
- [56] Han W X, Fang J Y, Guo D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377–385.
- [57] He J S, Wang L, Flynn D F B, et al. Leaf nitrogen: phosphorus stoichiometry across Chinese grassland biomes [J]. *Oecologia*, 2008, 155(2): 301–310.
- [58] He M Z, Dijkstra F A, Zhang K, et al. Leaf nitrogen and phosphorus of temperate desert plants in response to climate and soil nutrient availability [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 6932.
- [59] 李玉霖, 毛伟, 赵学勇, 等. 北方典型荒漠及荒漠化地区植物叶片氮磷化学计量特征研究 [J]. *环境科学*, 2010, 31(8): 1716–1725.
- [60] 张文瑾. 毛乌素沙地典型植物叶片生态化学计量特征 [D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [61] He J S, Fang J Y, Wang Z H, et al. Stoichiometry and large-scale patterns of leaf carbon and nitrogen in the grassland biomes of China [J]. *Oecologia*, 2006, 149(1): 115–122.
- [62] 任书杰, 于贵瑞, 姜春明, 等. 中国东部南北样带森林生态系统102个优势种叶片碳氮磷化学计量学统计特征 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(3): 581–586.
- [63] 智颖颀, 刘珮, 马慧, 等. 中国荒漠植物生态化学计量学特征与驱动因素 [J]. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(1): 97–105.
- [64] 张珂, 何明珠, 李新荣, 等. 阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征 [J]. *生态学报*, 2014, 34(22): 6538–6547.
- [65] Yan Z B, Tian D, Han W X, et al. An assessment on the uncertainty of the nitrogen to phosphorus ratio as a threshold for nutrient limitation in plants [J]. *Annals of Botany*, 2017, 120(6):

- 1120-1131.
- [66] 罗艳, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木河上游荒漠区4种灌木植物叶片与土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8326-8335.
- [67] Guo Y P, Yang X, Schöb C, et al. Legume shrubs are more nitrogen-homeostatic than non-legume shrubs[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1662.
- [68] Zhang K, Su Y Z, Yang R. Biomass and nutrient allocation strategies in a desert ecosystem in the Hexi Corridor, northwest China[J]. *Journal of Plant Research*, 2017, 130(4): 699-708.
- [69] Niu D C, Zhang C P, Ma P P, et al. Responses of leaf C:N:P stoichiometry to water supply in the desert shrub *Zygophyllum xanthoxylum*[J]. *Plant Biology*, 2019, 21(1): 82-88.
- [70] 黄菊莹, 赖荣生, 余海龙, 等. N添加对宁夏荒漠草原植物和土壤C:N:P生态化学计量特征的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(11): 2850-2856.
- [71] 赵生龙, 曾凡江, 张波, 等. 不同干扰处理对骆驼刺茎、叶、刺器官化学计量特征的影响[J]. 干旱区研究, 2017, 34(4): 837-846.
- [72] An H, Tang Z, Keesstra S, et al. Impact of desertification on soil and plant nutrient stoichiometry in a desert grassland[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1-8.
- [73] Moe S J, Stelzer R S, Forman M R, et al. Recent advances in ecological stoichiometry: insights for population and community ecology[J]. *Oikos*, 2005, 109(1): 29-39.
- [74] 赵昕, 杨小菊, 石勇, 等. 盐胁迫下荒漠共生植物红砂与珍珠的根茎叶中离子吸收与分配特征[J]. 生态学报, 2014, 34(4): 963-972.
- [75] 孙世贤, 运向军, 吴新宏, 等. 荒漠草原主要植物种群生态化学计量学特征季节变化[J]. 生态环境学报, 2018, 27(1): 47-54.
- [76] 杨祥祥, 李梦琦, 何兴东, 等. 沙地植被碳氮磷化学计量特征与物种多样性的关系[J]. 应用生态学报, 2018, 29(9): 2819-2824.
- [77] Gong Y M, Ling H B, Chen Y, et al. N:P stoichiometric changes via species turnover in arid versus saline desert environments[J]. *Ecology and Evolution*, 2020(6): 1-10.
- [78] Gong Y M, Lv G H, Guo Z J, et al. Influence of aridity and salinity on plant nutrients scales up from species to community level in a desert ecosystem[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-12.
- [79] Zhao N, Yu G R, Wang Q F, et al. Conservative allocation strategy of multiple nutrients among major plant organs: from species to community[J]. *Journal of Ecology*, 2020, 108(1): 267-278.
- [80] Yu Q, Chen Q S, Elser J J, et al. Linking stoichiometric homeostasis with ecosystem structure, functioning, and stability[J]. *Ecology Letters*, 2010, 13: 1390-1399.
- [81] Yu Q, Elser J J, He N P, et al. Stoichiometric homeostasis of vascular plants in the Inner Mongolia grassland[J]. *Oecologia*, 2011, 166(1): 1-10.
- [82] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. *New Phytologist*, 2004, 164(2): 243-266.
- [83] Chai H, Yu G R, He N P, et al. Vertical distribution of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in typical Chinese terrestrial ecosystems[J]. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(5): 549-560.
- [84] 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(1): 139-151.
- [85] 汪涛, 杨元合, 马文红. 中国土壤磷库的大小、分布及其影响因素[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008(6): 945-952.
- [86] 陶冶, 刘耀斌, 吴甘霖, 等. 准噶尔荒漠区域尺度浅层土壤化学计量特征及其空间分布格局[J]. 草业学报, 2016, 25(7): 13-23.
- [87] 董雪, 辛智鸣, 黄雅茹, 等. 乌兰布和沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6247-6256.
- [88] 宁志英, 李玉霖, 杨红玲, 等. 科尔沁沙地优势固沙灌木叶片氮磷化学计量内稳性[J]. 植物生态学报, 2019, 43(1): 46-54.
- [89] Wang X Y, Li Y Q, Gong X W, et al. Storage, pattern and driving factors of soil organic carbon in an ecologically fragile zone of northern China[J]. *Geoderma*, 2019, 343: 155-165.
- [90] 孙小东, 宁志英, 杨红玲, 等. 中国北方典型风沙区土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 中国沙漠, 2018, 38(6): 1209-1218.
- [91] 朱湾湾, 王攀, 樊瑾, 等. 降水量及N添加对宁夏荒漠草原土壤C:N:P生态化学计量特征和植被群落组成的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(9): 33-44.
- [92] 许森平, 任成杰, 张伟, 等. 土壤微生物生物量碳氮磷与土壤酶化学计量对气候变化的响应机制[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2445-2454.
- [93] 黄菊莹, 余海龙, 刘吉利, 等. 控雨对荒漠草原植物、微生物和土壤C、N、P化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(15): 5362-5373.
- [94] 吴秀芝, 阎欣, 王波, 等. 荒漠草地沙漠化对土壤-微生物-胞外酶化学计量特征的影响[J]. 植物生态学报, 2018, 42(10): 1022-1032.
- [95] Van der Putten W H, Bardgett R D, Bever J D, et al. Plant-soil feedbacks: the past, the present and future challenges[J]. *Journal of Ecology*, 2013, 101(2): 265-276.
- [96] 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.
- [97] Ning Z, Zhao X, Li Y, et al. Plant community C:N:P stoichiometry is mediated by soil nutrients and plant functional groups during grassland desertification[J]. *Ecological Engineering*, 2021, 162: 106179.
- [98] Sardans J, Peñuelas J. Potassium: a neglected nutrient in global change[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2015, 24(3): 261-275.

Research advances in stoichiometry of desert plant-soil system in China

Lu Jiannan^{1,2}, Liu Kaijun³, Wang Ruixiong^{1,2}, Li Yanjie⁴, Ning Zhiying^{1,2}, Chen Xueping^{1,2},
Zhao Siteng^{1,2}, Wang Shaokun¹, Zhao Xueyong¹

(1. *Urat Desert-Grassland Research Station / Naiman Desertification Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *Urat Rear Banner Forestry and Grassland Administration, Bayannur 015500, Inner Mongolia, China*; 4. *School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: Desert ecosystem is an essential part of the terrestrial ecosystem in China, with a unique structure and function. Ecological stoichiometry focuses on the ratio of C, N, and P chemical elements, and their balance relationships have become a powerful tool for revealing ecological processes such as nutrient cycles and limitations in ecosystems. Plants have the ability to regulate nutrient elements among organs and respond to environmental changes. Soil C:N:P characterizes changes in soil nutrient supply capacity and storage. There is also a close relationship between N and P nutrient circulation in plant-soil system. From the perspectives of plant-organ element stoichiometry, plant-soil stoichiometry characteristics and its influencing factors at the regional scale, the role of C:N:P stoichiometric balance in the process of ontogeny, population dynamics and community structure formation, and interrelationships of ecological stoichiometry in plant-soil systems, we discussed the research progress of ecological stoichiometry of desert ecosystems in China in the past ten years and looked forward to the future research content.

Key words: desert; ecological stoichiometry; allometric growth; environmental response